

不同林龄木荷-青冈栎混交林幼林 土壤活性有机碳库研究

程彩芳¹, 李正才^{1*}, 周君刚², 吴亚丛¹, 赵志霞¹, 孙娇娇²

(1 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; 2 富阳市林业局, 浙江富阳 311400)

摘要:以中国北亚热带地区退化灌木林补植改造 7 a 和 11 a 后形成的木荷-青冈栎混交林为研究对象,以保留的灌木林为对照,分析了造林初期林龄对林分土壤活性有机碳含量的影响。结果表明:(1) 7 a 和 11 a 生木荷-青冈栎林 0~50 cm 各土层土壤总有机碳含量比灌木林分别增加了 22.79%~43.34% 和 52.33%~96.13%,易氧化碳含量增加了 11.11%~25.18% 和 57.89%~100.90%,轻组有机质含量增加了 18.18%~85.20% 和 74.50%~93.75%,水溶性有机碳含量 7 a 生木荷-青冈栎林比灌木林降低了 4.10%~9.53%(10~20 cm 除外),而 11 a 生林分比灌木林增加了 0.71%~5.37%。(2) 3 种林分土壤活性有机碳在总有机碳中所占的比率大小顺序、水溶性有机碳/土壤总有机碳均为灌木林>7 a 生木荷-青冈栎林>11 a 生木荷-青冈栎林,易氧化碳/土壤总有机碳为 11 a 生木荷-青冈栎林>灌木林>7 a 生木荷-青冈栎林。(3) 3 种林分各活性有机碳组分与土壤总有机碳的相关性均达到极显著水平,而水溶性有机碳与总有机碳的相关系数相对较低;各林分土壤总有机碳、易氧化碳、轻组有机质与土壤养分的相关性均达到极显著水平,而灌木林水溶性有机碳与土壤水解氮、速效钾相关性不显著。研究认为,灌木林改造为常绿阔叶人工林,林分土壤有机碳在幼林期已有显著变化,随着林龄增长,人工林有机碳的积累还有待进一步研究。

关键词:灌木林;林龄;土壤活性有机碳;木荷-青冈栎混交林

中图分类号: Q948.11 文献标志码: A

Analyse of Soil Labile Organic Carbon Pools in Mixed *Schima superba-Cyclobalanopsis glauca* Young Plantations at Different Stand Ages

CHENG Caifang¹, LI Zhengcai^{1*}, ZHOU Jungang², WU Yacong¹, ZHAO Zhixia¹, SUN Jiaojiao²

(1 Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang 311400, China; 2 Forestry Bureau of Fuyang City, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

Abstract: Taking 7- and 11-year-old mixed *Schima superba - Cyclobalanopsis glauca* plantations (SC) (plantations were transformed from degraded shrub forest) and the reserved shrub forest (SF) in north subtropical areas of China as test objects, we analyzed the effects of stand age on the soil labile organic carbon content. (1) As compared with SF, the soil total organic carbon content (TOC), easily-oxidized carbon content (EOC) and light fraction organic matter content (LFOM) in both 7- and 11-year-old SC stands were increased by 22.79%—43.34% and 52.33%—96.13%, 11.11%—25.18% and 57.89%—100.90%, 18.18%—85.20% and 74.50%—93.75%, respectively. The water-soluble organic carbon content (WSOC) in 7-year-old SC were decreased by 4.10%—9.53% (except in 10—20 cm soil layer) and in 11-year-old SC increased by 0.71%—5.37% compared with SF. (2) The ratios of WSOC/TOC in the soils followed the order of SF>7-year-old SC>11-year-old SC, whereas the EOC/TOC in the soils followed the order of 11-

收稿日期: 2015-04-08; 修改稿收到日期: 2015-07-02

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030); 浙江省自然科学基金(LY12C03012)。

作者简介: 程彩芳(1989—), 女, 在读研究生, 主要从事森林生态系统结构与功能研究。E-mail: chengcf19@163.com

* 通信作者: 李正才, 博士, 副研究员, 主要从事森林生态系统结构与功能研究。E-mail: lizccaf@126.com

year-old SC>SF>7-year-old SC. (3) In the three stands, soil WSOC, EOC, and LFOC had extremely significant correlations with soil TOC ($P<0.01$), and the correlation coefficients between WSOC and TOC were lower than others. The soil TOC, EOC, and LFOC in the three stands were extremely significantly correlated with soil nutrients, but the soil WSOC in SF had no significant correlations with soil hydrolysable N and available K. The soil organic carbon of evergreen broad-leaved young plantations transformed from shrub forest has changed significantly, and the long-term effect of stand age on the soil organic carbon accumulation need to be further studied.

Key words: shrub forest; stand age; soil labile organic carbon; mixed *Schima superba*-*Cyclobalanopsis glauca* plantation

森林是重要的陆地生态系统之一,森林土壤碳库约储存了全球土壤碳库的 39%^[1]。森林土壤碳库微小的变化都可能影响到大气中的 CO₂ 浓度^[2]。但是由于土壤有机碳的背景值高,对气候、土地利用及管理方式变化的反应具有滞后性,导致难以及时有效地检测出其微小变化^[3]。土壤活性有机碳是指土壤 K 中移动较快、稳定性差、容易被氧化和分解,且其形态和空间位置对植物和土壤微生物的活性较高的那部分碳素^[4]。虽然土壤活性有机碳在土壤总有机碳中所占的比例较小,但它直接参与土壤生物化学转化过程,且能够灵敏地反映土壤碳库的微小变化^[5-6],同时,还对土壤养分有效化有重要作用,是土壤养分循环的驱动力^[7-8],能够指示土壤有机质的早期变化。因此,土壤活性有机碳的研究是森林土壤碳库研究的重要方面,对土壤肥力维持和碳循环动态平衡具有重要意义。

20 世纪 80 年代,中国亚热带地区开展了大规模的造林运动^[9],以促进退化荒坡生态恢复,大量针叶树种作为先锋树种被广泛应用于造林^[10-11]。然而,在经营过程中发现这些以杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*) 等树种为主的单一物种的针叶林分容易发生病虫害,并且常引起土壤肥力降低,土壤酸化加剧^[12-13]。为了减少针叶人工纯林产生的不利影响,提高林分生态效益,阔叶树种逐渐用于营造人工林^[14-15]。在中国北亚热带地区,木荷、青冈栎等乡土阔叶树种被广泛用于荒山灌丛造林,人工促进林分更新。木荷是山茶科 (Theaceae) 木荷属 (*Schima*) 常绿乔木,对立地条件要求不严格,适应性强,是中国南方山区重要的生物防火和优质用材树种^[16],但由于木荷纯林生长不佳^[17-18],因而一般营造木荷混交林,且木荷在自然状态下常与青冈栎呈混交林状态,并形成稳定的植物群落。目前,关于木荷与针叶树种混交林分的研究较多^[19-20],木荷与阔叶树种混交林的研究在凋落物分解^[21]、林分空间分布格局^[22]等方面也有报道,而

关于木荷阔叶混交林土壤活性有机碳方面还很欠缺。本研究模拟自然状态下木荷、青冈栎混交林生态系统对原有退化灌木林进行补植更新造林,促进灌木林正向演替。通过分析不同林龄木荷-青冈栎混交林幼林土壤活性有机碳含量,探讨造林初期林分土壤有机碳的动态变化,进一步为北亚热带地区人工林固碳能力研究提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于浙江省富阳市境内,地理位置为 E119°25'~120°19.5', N29°44'~30°11',属于亚热带季风气候区,夏季雨热同期,冬季温和少雨,年平均降雨 1 464 mm,年均温为 16.2 °C,无霜期为 237 d。研究区为典型的低山、丘陵地貌,土壤类型为发育于石英、长石砂岩上的微酸性红壤。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但在过去农业用地扩张以及对木材、林产品和薪炭需求量大的背景下,大量森林被砍伐破坏,逐渐转化为农业用地、次生林和灌木林(薪炭林)等。其中,灌木林分发育 50 a 以上,土壤厚度约 50 cm,优势树种为木荷和青冈栎,由于人为干扰严重,地上植被生长差,灌木层平均高度为 1.8 m,盖度为 0.05,草本植物主要为茅草,灌木林生物量为 9.93 t·hm⁻²。

2002 年用乡土树种木荷和青冈栎的 1 年生苗木补植改造部分灌木林地,营建生态公益林,人工促进林分更新,木荷和青冈栎苗木以 1:1 的比例行间混交,初植密度为 3 m×3 m,采用挖穴造林方式,穴大小为 60 cm×60 cm×60 cm,人工林分郁闭前每年秋季抚育林下植被,以促进目的树种生长。2006 年以相同造林方式对仍然维持薪炭林经营的部分灌木林进行改造,目前已形成两种林龄的木荷-青冈栎混交林。造林前,在研究区灌木林地沿等高线设置 20 个 20 m×20 m 的样方,调查分析样方内的植被生长状况和土壤基本理化性质,以保证试验所设样地在造林前本底条件基本一致。

表 1 调查样地概况

Table 1 Basic situation of experimental plots

林分类型 Stand type	平均胸径 Average DBH /cm	平均树高 Average tree height/m	立木密度 Stem density / (Plant · hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density	坡度 Slope/°	坡向 Slope aspect	土壤容重 Bulk density / (g · cm ⁻³)	年均凋落量 Mean annual litter fall production / (t · hm ⁻² · a ⁻¹)	土壤养分 Soil nutrient		
									全氮 Total N / (g · kg ⁻¹)	水解氮 Hydrolysis N / (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K / (mg · kg ⁻¹)
SF(CK)	—	—	150	0.1	22	阳坡 Sunny slope	1.17	—	0.70	51.69	29.11
7-SC	4.2	4.5	2 200	0.6	25	阳坡 Sunny slope	1.15	0.98	0.91	72.87	35.52
11-SC	8.5	7	1 300	0.8	23	阳坡 Sunny slope	1.18	2.54	1.03	83.02	40.17

注:DBH为胸径;SF为灌木林(CK);7-SC,11-SC分别为7和11年生木荷-青冈栎混交林;下同。

Note:DBH,diameter at breast height;SF,shrub forest(CK);7-SC,11-SC,mixed *Schima superba* Gardn. et Champ. -*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst. plantation of 7 or 11 years old;The same as below.

2 材料和方法

2.1 样地调查及土样采集

2013年夏季,在研究区内设置15个面积为20 m×20 m的调查样地,其中保留的灌木林样地5个(仍维持薪炭林经营方式,作为试验对照),7和11年生木荷-青冈栎混交林样地各5个,所有样地在造林前立地条件(地形、土壤等)大体一致,处于同一气候背景之下,具有可比性。样地基本情况见表1(木荷和青冈栎均为亚热带萌芽力较强的常绿阔叶树种,因此人工林调查样地内的立木密度高于初植密度)。

在每个调查样地内S形选定5个土壤样品采集点,除去采样点地表枯落物后,挖掘土壤剖面,环刀法测定土壤容重;同时,以10 cm为一个层次,分层采集0~50 cm深度的土壤样品(50 cm以下为土壤母质层),将同一调查样地内各采样点同层次的土壤样品混合均匀,按四分法取足量(500 g以上)带回实验室,土样去除杂质过2 mm筛后分做2份,一份装入自封袋中于4℃条件下鲜样保存,用于测定土壤水溶性有机碳;另一份土样自然风干,用于测定土壤总有机碳、易氧化碳、轻组有机质和土壤养分。

2.2 土壤样品分析

土壤总有机碳测定采用重铬酸钾外加热法^[23],水溶性有机碳测定参照Liang等^[24]的方法;易氧化碳测定采用333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法^[25];轻组有机质测定采用1.7 g·mL⁻¹碘化钠重液分离法^[26];土壤养分各指标测定采用常规方法:土壤水解氮,碱解扩散法;土壤全氮,凯氏定氮法;速效钾,乙酸铵提取,原子吸收光谱法。

2.3 数据统计分析

采用Excel 2003和SPSS18.0软件进行数据统

计分析及制图。不同林分间土壤活性有机碳的差异显著性分析采用单因素方差分析法和多重比较法(LSD检验),土壤活性碳与土壤养分的相关性分析采用双变量Pearson相关系数分析法,双尾检验。

3 结果与分析

3.1 不同林龄木荷-青冈栎林的土壤活性有机碳

灌木林改造为木荷-青冈栎林生长7 a、11 a后,0~50 cm土壤各层总有机碳含量分别增加了22.79%~43.34%和52.33%~96.13%,其中,7 a生木荷-青冈栎林与灌木林土壤总有机碳在40~50 cm土层差异不显著,其他各层差异均达到显著水平。11 a生木荷-青冈栎林0~50 cm土壤各层总有机碳含量比7 a生提高了19.59%~46.17%,差异均达到显著水平(表2)。

不同林分土壤水溶性有机碳含量均在0~10 cm表层最高,随土壤剖面加深而下降,到30~40 cm土层又稍有上升,40~50 cm土层为最低。相比于灌木林,7 a生木荷-青冈栎林土壤各层水溶性有机碳含量总体表现为降低趋势,降低幅度为4.10%~9.53%(10~20 cm除外),且在0~10 cm差异显著;11 a生木荷-青冈栎林0~50 cm各土层水溶性有机碳含量增加了0.71%~5.37%,但各层均无显著差异。11 a生木荷-青冈栎林各层土壤水溶性有机碳比7 a生增加了3.91%~15.41%,在0~10 cm土层差异达到显著水平(表3)。

7 a、11 a生木荷-青冈栎林土壤易氧化碳含量分别比灌木林增加了11.11%~25.18%和57.89%~100.90%,且11 a生木荷-青冈栎林与灌木林各土层差异均达到显著(表4)。11 a生木荷-青冈栎林土壤各层易氧化碳含量高于7 a生39.94%~67.67%,除

20~30 cm 土层外,其余各层均差异显著。

7 a 生木荷-青冈栎林土壤轻组有机质含量高于灌木林 18.18%~85.20%(表 5),且在 0~40 cm 土层均差异显著;11 a 生林分土壤各层轻组有机质均显著高于灌木林,增加了 74.50%~93.75%。与 7 a 生木荷-青冈栎林相比,11 a 生林分土壤各层轻组有机质含量增加了 1.91%~47.65%,且在 30~40 cm 和 40~50 cm 土层差异显著。

3.2 土壤活性有机碳占总有机碳的比率

各林分土壤水溶性有机碳占总有机碳的比率为 0.27%~1.71%,且随着土层深度增加水溶性有机碳比率呈增大的趋势(表 6),各土层水溶性有机碳占总有机碳的比率均表现为:灌木林>7 a 生>11 a 生木荷-青冈栎林,其中,灌木林与两种林龄人工林

各层差异均达到显著水平,7 a 生和 11 a 生林分在 20~30 cm、30~40 cm 和 40~50 cm 土层有显著差异。3 种林分土壤易氧化碳占总有机碳的比率为 22.23%~29.91%,随土层加深而波动下降,各土层比率均表现为:11 a 生>灌木林>7 a 生木荷-青冈栎林,但各层差异不显著。

3.3 土壤活性有机碳与总有机碳的相关性分析

3 种林分 0~50 cm 层土壤各活性有机碳组分与总有机碳的相关性均达到极显著水平($P<0.01$),水溶性有机碳与总有机碳的相关性相对较低(图 1)。土壤水溶性有机碳与总有机碳的相关性表现为:灌木林<11 a 生<7 a 生;易氧化碳与总有机碳相关性表现为:灌木林<7 a 生<11 a 生;轻组有机质与总有机碳的相关性表现为:7 a 生<灌木林<11 a 生。

表 2 不同林型土壤总有机碳含量

Table 2 Content of soil total organic carbon in the stands/(g · kg⁻¹)

林分类型 Stand type	土层 Soil layer/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
SF(CK)	17.44±1.19c	10.74±1.42c	6.27±0.87c	4.13±0.57c	3.51±0.47b
7-SC	21.86±2.08b	13.68±1.55b	8.30±0.91b	5.92±0.83b	4.31±0.57b
11-SC	27.02±1.65a	16.36±0.69a	10.96±0.50a	8.10±0.81a	6.30±0.52a

注:数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: mean±SD; Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level; the same as below.

表 3 不同林型土壤水溶性有机碳含量

Table 3 Content of soil water-soluble organic carbon in the stands/(mg · kg⁻¹)

林分类型 Stand type	土层 Soil layer/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
SF(CK)	69.78±4.79a	61.88±3.85a	60.16±4.46a	61.70±2.64a	58.85±3.48a
7-SC	63.71±1.61b	61.92±1.27a	57.12±0.65a	57.95±2.04a	56.53±2.11a
11-SC	73.53±5.44a	64.34±4.89a	61.19±2.62a	62.14±5.14a	60.09±3.21a

表 4 不同林型土壤易氧化碳含量

Table 4 Content of soil easily-oxidized carbon in the stands/(g · kg⁻¹)

林分类型 Stand type	土层 Soil layer/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
SF(CK)	5.13±1.70b	2.78±0.80b	1.71±0.88b	1.11±0.41b	0.85±0.28b
7-SC	5.70±1.21b	3.48±0.96b	2.13±0.77ab	1.33±0.63b	0.98±0.47b
11-SC	8.10±1.10a	4.87±0.92a	3.09±0.81a	2.23±0.42a	1.55±0.39a

表 5 不同林型土壤轻组有机质含量

Table 5 Content of soil light fraction organic matter in the stands/(g · kg⁻¹)

林分类型 Stand type	土层 Soil layer/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
SF(CK)	19.46±1.98b	9.66±0.30b	6.70±1.01b	5.12±0.77c	4.51±0.54b
7-SC	36.04±5.18a	17.13±1.74a	10.19±1.36a	7.35±1.77b	5.33±1.13b
11-SC	36.73±1.75a	17.68±2.54a	11.83±1.18a	9.92±0.66a	7.87±0.72a

3.4 土壤有机碳与土壤养分的关系

土壤养分与土壤总有机碳、水溶性有机碳、易氧化碳

表 7 显示,在 7 a 和 11 a 生木荷-青冈栎林中, 和轻组有机质的相关性均达到极显著水平;在灌木

表 6 不同林分类型 0~50 cm 土壤活性有机碳占总有机碳的比率

Table 6 Ratios of 0-50 cm soil labile organic carbons to total organic carbon in the stands

土层 soil layer	WSOC/TOC/%			EOC/TOC/%		
	SF(CK)	7-SC	11-SC	SF(CK)	7-SC	11-SC
0~10	0.40a	0.29b	0.27b	29.41a	26.07a	29.98a
10~20	0.58a	0.45b	0.39b	25.88a	25.44a	29.77a
20~30	0.96a	0.69b	0.56c	27.27a	25.66a	28.19a
30~40	1.49a	0.98b	0.77c	26.88a	22.47a	27.53a
40~50	1.68a	1.31b	0.95c	24.22a	22.74a	24.60a

注: WSOC 表示土壤水溶性有机碳; EOC 表示土壤易氧化碳; TOC 表示土壤总有机碳; 下同。

Note: WSOC, water-soluble organic carbon; EOC, easily-oxidized carbon; TOC, total organic carbon; the same as below.

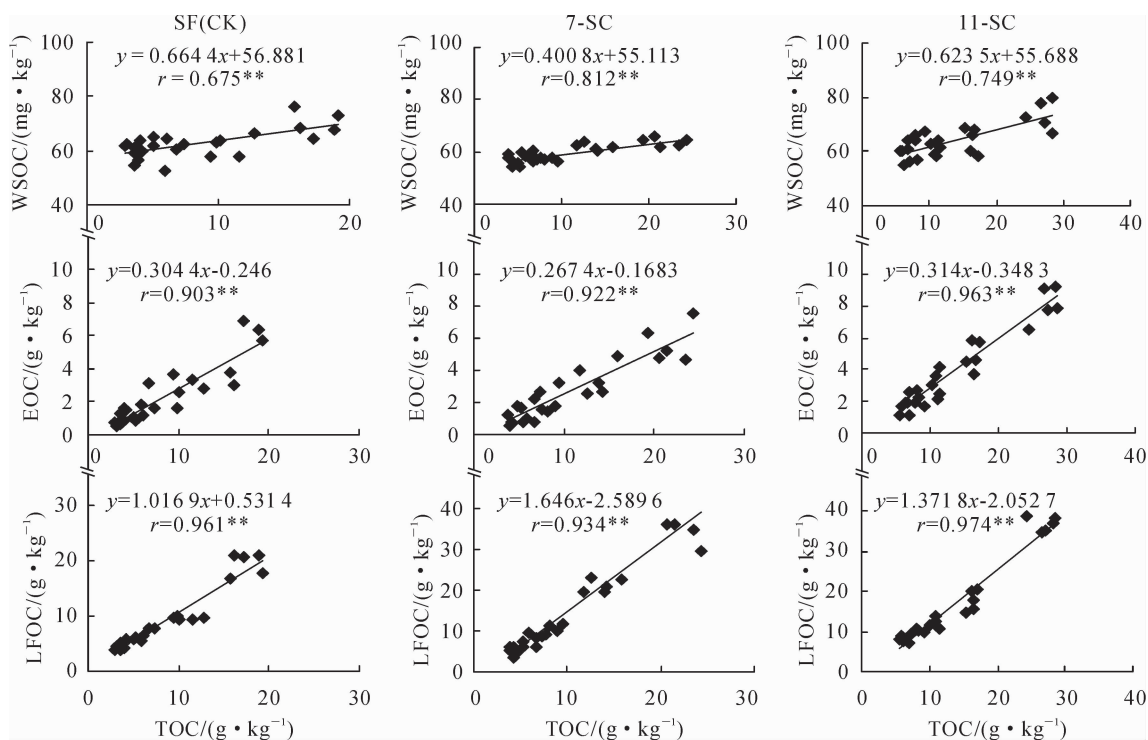


图 1 土壤活性有机碳与总有机碳的相关关系

Fig. 1 Relationships between soil labile organic carbons and total organic carbon in the stands

表 7 土壤养分与土壤有机碳的相关性

Table 7 Correlation coefficients between soil organic carbons and soil nutrients

林分类型 Stand type	土壤养分 Soil nutrient	总有机碳 TOC	水溶性有机碳 WSOC	易氧化碳 EOC	轻组有机质 LFOC
SF(CK)	全氮 Total N	0.904**	0.506**	0.971**	0.896**
	水解氮 Hydrolysis N	0.786**	0.287	0.883**	0.786**
	速效钾 Available K	0.518**	0.145	0.697**	0.594**
7-SC	全氮 Total N	0.854**	0.755**	0.885**	0.902**
	水解氮 Hydrolysis N	0.834**	0.770**	0.869**	0.886**
	速效钾 Available K	0.800**	0.742**	0.668**	0.919**
11-SC	全氮 Total N	0.944**	0.626**	0.933**	0.925**
	水解氮 Hydrolysis N	0.907**	0.612**	0.910**	0.903**
	速效钾 Available K	0.801**	0.659**	0.709**	0.861**

注: ** 表示相关性达到 0.01 显著水平。

Note: ** indicate significant correlation at 0.01 level.

林中,除水解氮、速效钾与水溶性有机碳的相关性不显著外,其他土壤养分与有机碳各组分表现出极显著相关。不同年龄林分土壤活性有机碳与土壤养分的相关系数有差异,11 a 生木荷-青冈栎林土壤养分与土壤活性碳的相关系数普遍高于灌木林,同一林分不同活性有机碳组分与土壤养分的相关性也不同,但均表现为水溶性有机碳与土壤养分的相关性较低。

4 讨 论

4.1 林龄对土壤总有机碳的影响

土壤有机碳储存主要取决于生物质碳输入量、分解释放量和进入水系统损失碳量三者之间的关系,与气候、地上生物量变化及干扰因素的时间、强度、方式等特征密切相关^[27]。本研究中,灌木林改造为木荷-青冈栎林后 0~50 cm 各层土壤总有机碳含量均有显著提高(7 a 生木荷-青冈栎林与灌木林 40~50 cm 土层除外)。这是因为森林土壤有机碳主要来源于凋落物和根系的归还^[28],灌木林植被以灌草为主,地上生物量积累少,对土壤的有机碳输入量也相应较低,加之植被覆盖差导致林内温湿度变化大,加剧土壤有机质的矿化作用^[29-30]而不利于土壤碳积累。灌木林改造为人工林后,随着林龄增长林内环境的改善和植被生物量的提高是土壤有机碳迅速积累的主要原因。此外,本研究区采用补植造林,未进行炼山整地,降低了对土壤团聚体和土壤结构的破坏程度,进而减小了对土壤有机碳分解速率的影响^[31]。11 a 生木荷-青冈栎林各层土壤有机碳含量均显著高于 7 a 生林分,这是因为一方面,植被凋落物是土壤有机碳的重要来源,其归还土壤的质量和数量对土壤碳循环有显著影响^[32-34],收集林分凋落物发现 11 a 生木荷-青冈栎林年凋落物量显著高于 7 a 生林分(分别为 2.54 和 0.98 t·hm⁻²·a⁻¹);另一方面,根系的周转和分解是森林土壤的重要有机碳源^[35],一些学者研究不同林龄常绿阔叶林发现林分细根系生物量与林龄呈正相关^[36],本研究中,11 a 生木荷-青冈栎林乔木层根系生物量是 7 a 生林分的 2.3 倍(分别为 12.58 和 5.53 t·hm⁻²),大量的细根代谢残体和分泌物释放到土壤中有利于有机碳的快速积累。

退化灌木林改造为木荷-青冈栎林后,随着植被的恢复林分生物量不断积累、林内环境逐渐改善,人工林土壤有机碳在幼林期已有显著提高,特别是造林 7 a 后土壤有机碳积累速度加快,随着林龄增长,

人工林土壤有机碳的动态变化还有待进一步研究。

4.2 林龄对土壤活性有机碳的影响

水溶性有机碳占土壤总有机碳的比例很小,但它却是土壤微生物能够直接利用的有机碳源^[37]。本研究中,11 a 生木荷-青冈栎林 0~50 cm 土壤各层水溶性有机碳含量均比灌木林有一定提高,而 7 a 生木荷-青冈栎林水溶性有机碳含量 0~10 cm 土层低于灌木林 9.53%,且差异显著。这一方面由于森林土壤水溶性有机碳主要来源于土壤有机质、枯枝落叶和根系分泌物,水溶性有机碳与土壤总有机碳常处于动态平衡中,一定条件下可互相转化^[38-39],11 a 生木荷-青冈栎林植被生物归还能力高,因此水溶性有机碳含量也较高;另一方面,灌木林地造林后直至林分郁闭前每年秋季对林下灌草进行抚育,使得 7 a 生木荷-青冈栎林缺少林下植被覆盖,有机质矿化作用强,特别在南方多雨季节,地表径流加重了土壤水溶性有机碳的流失量^[40]。Kalbitz 等^[41]认为,土壤水溶性有机碳含量受植被类型、地表径流、土壤养分质量及土壤微生物等多方面因素的影响。本研究中,造林初期土壤水溶性有机碳含量有一定程度下降,随着林龄增长林分逐渐郁闭,林内环境的改善将促进水溶性有机碳的积累。

土壤易氧化碳为微生物活动提供能源,是土壤养分的潜在来源,其稳定性相对较差。Laik 等^[42]研究发现凋落物的分解能够补充土壤易氧化碳的消耗,而林分生物量、林龄以及温度是影响森林凋落物量的主要因素^[43,20]。本研究中,两种林龄木荷-青冈栎林土壤易氧化碳含量均高于灌木林,且 11 a 生人工林与灌木林差异显著。这是因为易氧化碳含量很大程度上取决于土壤总有机碳量^[44],造林后,地上植被的恢复增加了凋落物和根系输入土壤的有机碳量,且随着恢复年限增长,土壤易氧化碳含量呈增长趋势。

森林生态系统中,地上植被凋落物和地下根系回归是土壤轻组有机质的主要来源^[45],轻组有机质含量与土壤有机碳储存及其短期动态有关^[46],对土壤肥力的改变有指示作用。本研究中,7 a 生和 11 a 生木荷-青冈栎林土壤轻组有机质含量分别比灌木林提高了 18.18%~85.20%和 74.50%~93.75%,差异显著(7 a 生林分 40~50 cm 土层除外)。这是由于随着人工林植被的恢复,林分碳储量快速积累,大大增加了轻组有机质的来源(样地调查时,灌木林、7 a 生和 11 a 生木荷-青冈栎林植被碳储量分别为 4.46,9.95 和 28.10 t·hm⁻²)。此外,林下植被的清除对凋落物的分解有一定的抑制作用^[47],使 7

a 生人工林中处于不同分解阶段的植物残体和一些微生物结构体积累增多,这也可能导致表层土壤轻组有机质含量较高。11 a 生木荷-青冈栎林轻组有机质含量高于 7 a 生,且在 30~40 cm 和 40~50 cm 土层有显著差异。Six 等^[48]研究发现,植被凋落物是表层土壤轻组有机质的主要来源,随土层加深其凋落物对轻组有机质的影响减弱,下层土壤轻组有机质只要依赖于植物细根代谢残体、分泌物以及死亡的微生物等。11 a 生木荷-青冈栎林下层土壤较高的轻组有机质含量可能主要来源于其较大的根系生物量。

土壤活性有机碳与总有机碳的比值比活性有机碳含量更能体现土壤有机碳库的状况。土壤全碳中水溶性有机碳的分配比例反映了土壤有机碳的流失水平^[49]。研究发现,灌木林水溶性有机碳占土壤总有机碳的比值显著高于其他两种林分,而 11 a 生木荷-青冈栎林水溶性有机碳的比值最低。这表明人工林植被恢复后有效减轻了土壤有机碳的流失量,且随着恢复年限增长改善效果更佳。土壤易氧化碳占总有机碳的比值反映了有机碳的活性强度,比值高意味着土壤有机碳的活性大,养分循环较快,而稳定性差^[50]。本研究中,3 种林分易氧化碳占总有机碳的比率表现为 11 a 生 > 灌木林 > 7 a 生木荷-青冈栎林,差异均不显著。这说明造林初期人工林分土壤化学活性下降,土壤肥力降低,随林龄增长,林分土壤碳素有效率提高,养分循环较快,但有机碳稳定性降低。

本研究中,3 种林分土壤各类活性有机碳含量与总有机碳含量均呈极显著相关关系,这一方面说明土壤总有机碳储量在很大程度上制约着土壤活性

有机碳的变化;另一方面,说明各类活性有机碳虽然在形态和测定方法上不同,但分别从不同角度表征了土壤中活性较高部分的碳含量^[51],对土地利用变化敏感,可以作为北亚热带地区指示土壤质量和肥力变化的指标。各林分土壤水溶性有机碳含量与总有机碳含量的相关系数小于其他活性碳指标与总有机碳含量的相关系数,这与刘荣杰等^[52]的研究结果一致,主要是因为土壤水溶性有机碳含量依赖于总有机碳量,同时也受到土壤黏粒吸附作用的影响并能够随渗透水迁移^[53],此外,夏季土壤微生物活动最旺盛,森林土壤中分解产生的大量水溶性有机碳被微生物消耗,水溶性有机碳处于不断产生与消耗的动态平衡,也可能是导致土壤水溶性有机碳与总有机碳的相关性较差的原因^[54]。11 a 生木荷-青冈栎林各活性有机碳组分与土壤养分均有较好的相关性,可能与 11 a 生人工林林分结构合理有关,其乔木层郁闭后改善了林内环境,同时,丰富的林下灌草和凋落物层提高了土壤抗侵蚀能力,有效阻止了表层土壤养分的流失。

木荷-青冈栎林 0~50 cm 各层土壤易氧化碳、轻组有机质含量均随林龄增长而增加,而土壤水溶性有机碳含量在造林后总体表现为先降低后增加的趋势(7 a 生 < 灌木林 < 11 a 生木荷-青冈栎林);随着人工林植被的恢复,土壤水溶性有机碳与总有机碳的比值逐渐减小,这意味着林内环境的改善降低了土壤水溶性有机碳的流失水平;11 a 生木荷-青冈栎林土壤有机碳与土壤养分的相关性相对较高,补植改造退化灌木林人工促进林分更新对土壤养分的维持有重要作用。

参考文献:

- [1] IPCC. Land Use, Land Use Change and Forestry. Special Report, Inter-Governmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, UK. 2000.
- [2] SUNDQUIST E T. The global carbon dioxide budget[J]. *Science*, 1993, 259: 934-941.
- [3] HAYNES R J, BEARE M H. Aggregation and organic matter storage in meso-thermal, humid soils[C]//CARTER M R, STEWART B A. Advances in soil science: Structure and organic matter storage in agriculture soils. Boca Raton, New York: CRC/Lewis Publishers, 1996: 213-262.
- [4] SHEN H(沈宏), CAO ZH H(曹志洪), HU ZH Y(胡正义). Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 1999, 18(3): 32-38(in Chinese).
- [5] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1 459-1 466.
- [6] WHITBREAD A M, LEFROY R D B, BLAIR G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4): 669-682.

- [7] COLEMAN D C, REID C P P, COLE C V. Biological strategies of nutrient cycling in soil systems[J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 1—55.
- [8] WANDER M M, TRAINA S J, STINNER B R, *et al.* Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1 130—1 139.
- [9] LI Z A, PENG S L, RAE D J, *et al.* 2001. Litter decomposition and nitrogen mineralization of soils in subtropical plantation forests of southern China, with special attention to comparisons between legumes and non-legumes[J]. *Plant and Soil*, 229(1): 105—116.
- [10] REN H, SHEN W J, LU H F, *et al.* Degraded ecosystems in China: status, causes, and restoration efforts[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2007, 3(1): 1—13.
- [11] PENG S L, HOU Y P, CHEN B M. Vegetation restoration and its effects on carbon balance in Guangdong Province, China[J]. *Restoration Ecology*, 2009, 17(4): 487—494.
- [12] 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: 广东科技出版社, 1996.
- [13] BI J, BLANCO J A, SEELY B, *et al.* Yield decline in Chinese Fir plantations: a simulation investigation with implications for model complexity[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(9): 1 615—1 630.
- [14] CARNEVALE N J, MONTAGNINI F. Facilitating regeneration of secondary forests with the use of mixed and pure plantations of indigenous tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 163(1): 217—227.
- [15] WANG W X(王卫霞), SHI Z M(史作民), LUO D(罗 达), *et al.* Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2013, 33(3): 925—933(in Chinese).
- [16] 陈存及, 陈伙法. 阔叶树种栽培[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [17] LIU Q W(刘其文), The management effects of *Schima superba* plantation[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*(福建林业科技), 2008, 35(4): 24—28(in Chinese).
- [18] LI ZH Y(李志勇), CHEN J J(陈建军), WANG Y H(王彦辉), *et al.* Effects of *Schima superba* plantations on soil chemical properties in the acid rain region of Chongqing, Southwestern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2008, 32(3): 632—638(in Chinese).
- [19] HUANG R ZH(黄儒珠), LI J M(李机密), ZHENG H ZH(郑怀舟), *et al.* Comparison on photosynthetic characteristics between *Pinus massoniana* and *Schima superba* at the two different rehabilitation vegetation, Changting County, Fujian Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, 29(11): 6 120—6 130(in Chinese).
- [20] YANG ZHI J(杨智杰), CHEN G SH(陈光水), XIE J SH(谢锦升), *et al.* Litter fall production and carbon return in *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba*, and their mixed plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2010, 21(9): 2 235—2 240(in Chinese).
- [21] ZHANG X P(张晓鹏), PAN K W(潘开文), WANG J CH(王进闯), *et al.* Effects of decomposition of mixed leaf litters of the *Castanopsis platyacantha-Schima sinensis* forest on soil organic carbon[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2011, 31(6): 1 582—1 593(in Chinese).
- [22] LI L(李 立), CHEN J H(陈建华), REN H B(任海保), *et al.* Spatial patterns of *Castanopsis eyrei* and *Schima superba* in mid-subtropical broad-leaved evergreen forest in Gutianshan National Reserve, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2010, 34(3): 241—252(in Chinese).
- [23] LY/T 1237—1999. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 1999.
- [24] LIANG B C, MACKNEZIE A F, SCHNITZER M, *et al.* Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26(2): 88—94.
- [25] SHEN H(沈 宏), CAO ZH H(曹志洪), XU ZH H(徐志红). Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 2000, 37(2): 166—173(in Chinese).
- [26] JANZEN H H, CAMPBELL C A, BRANDT S A, *et al.* Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1 799—1 806.
- [27] MA SH J(马少杰), LI ZH C(李正才), ZHOU B ZH(周本智), *et al.* Effects of community succession on soil organic carbon in North Subtropical Areas[J]. *Forest Research*(林业科学研究), 2010, 23(6): 845—849(in Chinese).
- [28] WANG Q K(王清奎). Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, 22(4): 1 075—1 081(in Chinese).
- [29] LÜ J L(吕家珑), ZHANG Y P(张一平), WANG X D(王旭东), *et al.* Protective effect of agri-land ecosystem for soil fertility[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2001, 21(4): 613—616(in Chinese).
- [30] XIE J SH(谢锦升), YANG Y SH(杨玉盛), YANG ZH J(杨智杰), *et al.* Seasonal variation of light fraction organic matter in degraded red soil after vegetation restoration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2008, 19(3): 557—563(in Chinese).
- [31] ZINN Y L, RESCK D V S, DA SILVA J E. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 166(1—3): 285—294.
- [32] BOONE R D, NADELHFFER K J, CANARY J D, *et al.* Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Nature*, 1998, 396(6711): 570—572.

- [33] SAYER E J, POWERS J S, TANNER E V J. Increased litterfall in tropical forests boosts the transfer of soil CO₂ to the atmosphere[J]. *Plos One*, 2007, **2**(12): 1–6.
- [34] CROW S E, LAJTHA K, FILLEY T R, *et al.* Sources of plant-derived carbon and stability of organic matter in soil: Implications for global change[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(8): 2 003–2 019.
- [35] BUSSE M D, COCHRAN P H, BARRETT J W. Changes in Ponderosa pine site productivity following removal of understory vegetation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**(6): 1 614–1 621.
- [36] LIU B(刘波), YU Y F(余艳峰), ZHANG Y Q(张贇齐), *et al.* Fine-root biomass and related nutrients in different aged stands of subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*(南京林业大学学报), 2008, **32**(5): 81–84(in Chinese).
- [37] BOYER J N, GROFFMAN P M. Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(6): 783–790.
- [38] TAO SH(陶澍), CAO J(曹军). Leachate kinetics of water soluble organic carbon from surface horizon of upland soil [J]. *China Environmental Science*(中国环境科学), 1996, **16**(6): 410–414(in Chinese).
- [39] HAGEDORN F, KAISER K, FEYEN H, *et al.* Effects of redox conditions and flow processes on the mobility of dissolved organic carbon and nitrogen in a forest soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(1): 288–297.
- [40] MA SH J(马少杰), LI ZH C(李正才), WANG B(王斌), *et al.* Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2012, **32**(8): 2 603–2 611(in Chinese).
- [41] KALBITZ K, SOLINGER S, PARK J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. *Soil Science*, 2000, **165**(4): 277–304.
- [42] LAIK R, KUMAR K, DAS D K, *et al.* Labile soil organic matter pools in a calciorthent after 18 years of afforestation by different plantations[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, **42**(2): 71–78.
- [43] NING X B(宁晓波), XIANG W H(项文化), WANG G J(王光军), *et al.* Litterfall production and dynamic for twenty years of a successive replanting *Cunninghamia lanceolata* plantation at Huitong, Hu'nan[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2009, **29**(9): 5 122–5 129(in Chinese).
- [44] ANDERSON T H, DOMSCH K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, **21**(4): 471–479.
- [45] BOONE R D. Light fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(11): 1 459–1 468.
- [46] POST W M, KWON K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(3): 317–327.
- [47] LI Y L(李媛良), WANG S L(汪思龙), YAN SH K(颜绍疆). Short-term effects of understory vegetation removal on nutrient cycling in litter layer of Chinese fir plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, **22**(10): 2 560–2 566(in Chinese).
- [48] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, **241**(2): 155–176.
- [49] WU Y C(吴亚丛), LI ZH C(李正才), CHENG C F(程彩芳), *et al.* Effects of understory removal on soil labile organic carbon pool in a *Cinnamomum camphora* plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2013, **24**(12): 3 341–3 346(in Chinese).
- [50] ZHU ZH J(朱志建), JIANG P K(姜培坤), XU Q F(徐秋芳). Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation[J]. *Forest Research*(林业科学研究), 2006, **19**(4): 523–526(in Chinese).
- [51] 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.
- [52] LIU R J(刘荣杰), WU Y C(吴亚丛), ZHANG Y(张英), *et al.* Comparison of soil labile organic carbon in Chinese fir plantations and natural secondary forests in north subtropical areas of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2012, **36**(5): 431–437(in Chinese).
- [53] BURFORD J R, BREMNER J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, **7**(6): 389–394.
- [54] XU Q F(徐秋芳), JIANG P K(姜培坤). Study on active organic carbon of soil s under different types of vegetation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2004, **18**(6): 84–87(in Chinese).