

北亚热带地区退化灌木林改造为人工阔叶林后 土壤活性碳库的变化

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. 浙江省富阳市林业局, 浙江 富阳 311400)

摘要:以我国北亚热带地区退化灌木林改造 11 a 后形成的木荷-青冈栎混交林和杜英纯林为研究对象,并以保留的退化灌木林为对照,分析了不同树种组成对林分土壤活性有机碳含量的影响。结果表明:木荷-青冈栎混交林和杜英纯林 0~50 cm 各土层土壤有机碳含量比退化灌木林分别增加了 52.33%~96.13% 和 77.93%~119.85%, 土壤易氧化碳增加了 57.89%~100.90% 和 21.44%~46.85%, 土壤轻组有机质增加了 74.50%~93.75% 和 27.24%~96.09%, 而土壤水溶性有机碳变化不明显。不同树种组成林分土壤活性有机碳占土壤总有机碳的比率大小顺序,土壤水溶性有机碳/土壤总有机碳为退化灌木林>木荷-青冈栎混交林>杜英纯林,土壤易氧化碳/土壤总有机碳为木荷-青冈栎混交林>退化灌木林>杜英纯林。3 种林分土壤各活性有机碳与土壤总有机碳的相关性均达到极显著水平($p < 0.01$),其中,木荷-青冈栎混交林相关系数大于其它两种林分。3 种林分中,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,而退化灌木林土壤水溶性有机碳与水解氮、速效钾相关性不显著,杜英纯林土壤水溶性有机碳与速效钾也无显著相关性。

关键词:退化灌木林;树种组成;活性有机碳;轻组有机质

中图分类号:S714

文献标识码:A

Change of Soil Labile Organic Carbon Pools after Conversion from Degraded Shrub Forest to Broadleaved Plantations in North Subtropical Areas of China

CHENG Cai-fang¹, LI Zheng-cai¹, ZHOU Jun-gang², WU Ya-cong¹, ZHAO Zhi-xia¹, SUN Jiao-jiao²

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;

2. Forestry Bureau of Fuyang City, Zhejiang Province, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: Taking *Schima superba-Cyclobalanopsis glauca* mixed stand (SP) and *Elaeocarpus sylvestris* pure stand (EP) (both were transformed from degraded shrub forest (DF)) in north subtropical areas of China as test objects, the effects of different species composition on the labile organic carbon contents in 0~50 cm soil depth were analyzed. As compared with the retained DF, the soil total organic carbon (TOC), easily-oxidized carbon (EOC) and light fraction organic matter (LFOM) in both SP and EP stands increased by 52.33%~96.13% and 77.93%~119.85%, 57.89%~100.90% and 21.44%~46.85%, 74.50%~93.75% and 27.24%~96.09%, respectively. No obvious change in water-soluble organic carbon (WSOC) was observed after reforestation. The ratios of WSOC/TOC in the soils followed the order of DF>SP>EP, whereas the EOC/TOC in the soils followed the order of SP>DF>EP. In the three stands, the soil WSOC, EOC, and LFOC had extremely significant correlations with soil TOC ($p < 0.01$), and the correlation coefficients of each labile organic carbon with soil TOC were higher in SP

收稿日期:2014-08-26

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项目(LY12C03012)

作者简介:程彩芳(1989—),女,河南安阳人,硕士研究生,主要从事森林生态系统结构与功能研究。

* 通讯作者:副研究员,博士,主要从事森林碳循环研究。E-mail: lizccaf@126.com

than in DF and EP. The soil TOC, EOC and LFOC in the three stands were extremely significantly correlated with soil nutrients, but the soil WSOC had no significant correlations with soil hydrolysable N and available K in DF, all the same, there was no significant correlation between soil WSOC and available K in EP.

Key words: degraded shrub forest; species composition; soil labile organic carbon; light fraction organic matter

土壤作为陆地生态系统的重要组成部分,其储存的碳量约为大气碳库的2~3倍^[1],土壤碳库微小的变化都可能影响大气中的CO₂浓度。但由于土壤有机碳背景值较高,对气候、土地利用方式和管理措施变化的反应具有一定的滞后性,难以在短期内检测出其微小变动^[2]。土壤活性有机碳是指土壤中具有一定的溶解性、移动较快、稳定性差、易氧化和分解,且活性较高、极易受植物和微生物影响的那部分土壤碳素^[3]。虽然它占土壤有机碳总量的比例较小,但它能够直接参与土壤的生物化学转化过程,并且灵敏地反映土壤全碳的微小变化^[4-5],同时,还是土壤养分循环的驱动力^[6-7]。土壤活性有机碳作为土壤碳库早期变化的敏感指示指标,对研究土壤肥力的维持和完善碳循环动态平衡机制具有十分重要的意义。

目前,关于土地利用方式变化对土壤活性有机碳影响的研究很多,且主要集中在非林地(耕地、草地、撂荒地等)与林地的转变^[8-12]、森林类型改变等方面^[13-15],此外,也有学者研究了抚育措施对森林土壤活性碳的影响^[16-17]以及植被恢复过程中土壤活性碳变化^[18-19],而有关低效灌木林常绿阔叶化改造后,造林树种组成对土壤活性碳库影响的研究还少见报道。本文以我国北亚热带地区退化灌木林改造11a后形成的木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)-青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.)混交林和杜英(*Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir)纯林为研究对象,通过分析森林土壤活性有机碳含量的变化,探讨不同造林树种对土壤活性有机

碳库的影响,为进一步研究北亚热带地区人工林固碳能力提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于浙江省富阳市龙门镇(119°25'~120°19.5' E, 29°44'~30°11' N),该地区属亚热带季风气候,年均气温16.2℃,年均降水量1464 mm,无霜期237 d。土壤类型为石英、长石砂岩上发育形成的微酸性红壤。试验区属低山丘陵地貌,历史上顶级森林群落为亚热带常绿-落叶阔叶林。由于农业发展对土地的开发,以及人类对木材、林产品和薪炭的大量需求,大部分原始林遭到砍伐破坏,逐渐退化为以青冈为优势树种的灌木林(薪炭林),人为干扰比较严重,植被生长较差。

2002年用乡土阔叶树种杜英、木荷、青冈栎(均为亚热带演替顶级树种)等1年生苗木对部分退化灌木林进行补植,营造生态公益林以促进植被恢复,其初植密度3 m×3 m,采用挖穴造林的方式,穴长、宽、深均为60 cm,形成杜英纯林和木荷-青冈栎混交林(木荷、青冈栎行间混交,混交比例为1:1)两种类型人工林,造林后每年秋季进行抚育管理直至林分郁闭。造林前,在研究区沿着等高线设立了20个面积为20 m×20 m的调查样方,调查分析各样方内的植被生长状况,并采集土壤样品分析土壤理化性质,以保证试验所设立的样方造林前土壤本底条件基本一致。样地基本情况见表1(杜英、青冈栎和木荷均为亚热带地区萌芽能力较强的常绿阔叶树种,因此调查样地立木密度都要高于造林初植密度)。

表1 调查样地基本情况

林分类型	平均树高 /m	平均胸径 /cm	立木密度 /(株·hm ⁻²)	林龄/a	郁闭度	坡向	坡度/(°)
退化灌木林(DF)	-	-	-	-	0.1	阳坡	22
木荷-青冈栎混交林(SP)	7	8.5	1 300	11	0.7	阳坡	23
杜英纯林(EP)	8	9.6	2 275	11	0.9	阳坡	25

2 材料与方法

2.1 样地调查及土样采集

2013年7月,在造林前土壤本底条件基本一致

的木荷-青冈栎混交林、杜英纯林和保留的部分灌木林(对照)中各设立5个具有可比性的固定调查样方(各样方面积均为20 m×20 m,坡向为阳坡,坡度为23°左右,设立于下坡位,土壤均为发育于石英、长

石砂岩上的微酸性红壤),在每个样方内,按S形布设5个土样采集点,清除采样点地表枯枝落叶层后,挖土壤剖面,环刀法测定土壤密度;同时,分层采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm和40~50 cm土壤样品(50 cm以下为土壤母质层),将同样方内各采样点相同层次的土样混合,四分法取足量土样带回实验室。土样过2 mm筛后分两份,一份保存(4℃)在自封袋中作为鲜样用于测定土壤水溶性有机碳(WSOC);另一份自然风干,用于测定土壤总有机碳(TOC)、轻组有机质(LFOC)、易氧化碳(EOC)和土壤养分。

2.2 土壤分析

土壤总有机碳分析采用重铬酸钾外加热法^[20];土壤水溶性有机碳的测定参照Liang等^[21]的方法;易氧化碳采用333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法^[22]测定;土壤轻组有机质采用1.7 g·mL⁻¹碘化钠重液分离法^[23]测定;土壤养分测定采用常规方法:土壤全氮,凯氏定氮法;水解氮,碱解扩散法;速效钾,乙酸铵提取,原子吸收光谱法。

2.3 数据统计分析

应用Excel 2003和SPSS18.0分析处理文中数据并制图。采用单因素方差分析法和最小显著差法(least significant difference, LSD)分析不同类型林分土壤活性碳的差异显著性,用双变量Pearson相关系数分析相关性(双尾检验)。

3 结果与分析

3.1 退化灌木林改造后的土壤活性有机碳含量

从表2可以看出,由退化灌木林改造的木荷-青冈栎混交林、杜英纯林两种阔叶人工林生长11 a后,0~50 cm各土层土壤有机碳含量均显著增加($p < 0.05$),增加幅度为52.33%~119.85%。造林树种不同的两种人工林之间土壤有机碳含量存在差异,杜英纯林各土层土壤有机碳含量均高于木荷-青冈栎混交林,变化幅度介于8.57%~19.06%之间,且在0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm土层差异达到显著水平。

表2 不同林分类型的土壤有机碳含量

g·kg⁻¹

林分类型	土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
退化灌木林	17.44 ± 1.19c	10.74 ± 1.42c	6.27 ± 0.87c	4.13 ± 0.57b	3.51 ± 0.47b
木荷-青冈栎混交林	27.02 ± 1.65b	16.36 ± 0.69b	10.96 ± 0.50b	8.10 ± 0.81a	6.30 ± 0.52a
杜英纯林	32.17 ± 3.02a	19.11 ± 2.41a	13.03 ± 1.75a	9.08 ± 1.14a	6.84 ± 0.78a

注:数值为平均值±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。

由表3可以看出,相比于退化灌木林,木荷-青冈栎混交林各土层土壤水溶性有机碳含量有所增加,而杜英纯林总体则表现为下降趋势,但各土层差异均未达到显著水平。木荷-青冈栎混交林各土层

土壤水溶性有机碳含量高于杜英纯林1.14%~9.89%(20~30 cm除外),且在0~10 cm土层差异显著。

表3 不同林分类型的土壤水溶性有机碳含量

mg·kg⁻¹

林分类型	土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
退化灌木林	69.78 ± 4.79ab	61.88 ± 3.85a	60.16 ± 4.46a	61.70 ± 2.64a	58.85 ± 3.48a
木荷-青冈栎混交林	73.53 ± 5.44a	64.34 ± 4.89a	61.19 ± 2.62a	62.14 ± 5.14a	60.09 ± 3.21a
杜英纯林	67.27 ± 2.68b	60.42 ± 2.11a	63.63 ± 2.43a	61.44 ± 3.31a	54.68 ± 4.67a

由表4可以看出,与退化灌木林相比,两种人工林各土层土壤易氧化碳含量均有一定幅度提高,木荷-青冈栎混交林各土层土壤易氧化碳含量增幅为57.89%~100.90%,差异均显著。木荷-青冈栎混交林各土层土壤易氧化碳含量高于杜英纯林24.10%~36.81%,且在0~10 cm土层有显著差异。两种林分土壤易氧化碳含量均在0~10 cm土

层最大,随着土层深度增加呈下降趋势。

由表5可以看出,林分改造后,两种林分各土层土壤轻组有机质含量均有显著提高,木荷-青冈栎混交林和杜英纯林各土层土壤轻组有机质含量分别增加了74.50%~93.75%和27.24%~96.09%。木荷-青冈栎混交林土壤轻组有机质含量在0~20 cm土层高于杜英纯林0.63%~48.34%,而其余土

层则低于杜英纯林,且仅在0~10 cm土层差异显著。土壤轻组有机质含量分布具有地表富集效应,

两种林分0~10 cm土层土壤轻组有机质含量为40~50 cm土层的3.00~4.67倍。

表4 不同林分类型的土壤易氧化碳含量

$g \cdot kg^{-1}$

林分类型	土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
退化灌木林	5.13 ± 1.70b	2.78 ± 0.80b	1.71 ± 0.88b	1.11 ± 0.41b	0.85 ± 0.28b
木荷-青冈栎混交林	8.10 ± 1.10a	4.87 ± 0.92a	3.09 ± 0.81a	2.23 ± 0.42a	1.55 ± 0.39a
杜英纯林	6.23 ± 1.06b	3.64 ± 1.03ab	2.49 ± 0.75ab	1.63 ± 0.57ab	1.19 ± 0.51ab

表5 不同林分类型的土壤轻组有机质含量

$g \cdot kg^{-1}$

林分类型	土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
退化灌木林	19.46 ± 1.98c	9.66 ± 0.30b	6.70 ± 1.01b	5.12 ± 0.77b	4.51 ± 0.54b
木荷-青冈栎混交林	36.73 ± 1.75a	17.68 ± 2.54a	11.83 ± 1.18a	9.92 ± 0.66a	7.87 ± 0.72a
杜英纯林	24.76 ± 1.90b	17.57 ± 2.11a	12.25 ± 2.11a	10.04 ± 1.50a	8.24 ± 1.10a

3.2 土壤活性有机碳占土壤总有机碳的比率

由表6可以看出,不同林分土壤水溶性有机碳(WSOC)占土壤总有机碳(TOC)的比率在0.21%~1.71%,3种林分土壤水溶性有机碳占土壤总有机碳的比率随着土层深度增加呈显著上升趋势。各土层水溶性有机碳分配比率均表现为灌木林>木荷-青冈栎混交林>杜英纯林,其中,退化灌木林与人工林各土层差异均达到显著水平,两种人工林仅在0~10 cm土层有显著差异。各林分土壤易氧化碳

(EOC)占土壤总有机碳(TOC)的比率为17.66%~29.91%,均表现为土壤表层比率最高,随着土层深度增加,其比率大致呈下降趋势。3种林分土壤易氧化碳占土壤总有机碳比率的大小顺序为木荷-青冈栎混交林>退化灌木林>杜英纯林,且在0~10 cm土层,退化灌木林与杜英纯林有显著差异;在0~10 cm和10~20 cm土层,木荷-青冈栎混交林和杜英纯林差异显著。

表6 不同林分0~50 cm土层土壤活性有机碳占总有机碳的比率

土层/cm	(WSOC/TOC)/%			(EOC/TOC)/%		
	退化灌木林	木荷-青冈栎混交林	杜英纯林	退化灌木林	木荷-青冈栎混交林	杜英纯林
0~10	0.40a	0.27b	0.21c	29.10a	29.91a	19.48b
10~20	0.58a	0.39b	0.32b	26.13ab	29.77a	19.13b
20~30	0.98a	0.56b	0.49b	26.85a	28.22a	19.22a
30~40	1.51a	0.77b	0.68b	26.80a	27.99a	18.10a
40~50	1.71a	0.96b	0.81b	24.12a	24.71a	17.66a

3.3 土壤总有机碳与土壤活性有机碳的相关性分析

由图1可以看出,3种林分0~50 cm土层土壤各活性有机碳与土壤总有机碳(TOC)之间的相关性均达到极显著水平($p < 0.01$)。土壤水溶性有机碳(WSOC)、轻组有机质(LFOC)与土壤总有机碳(TOC)的相关性均表现为:木荷-青冈栎混交林(SP)>退化灌木林(DF)>杜英纯林(EP),而土壤易氧化碳(EOC)与土壤总有机碳(TOC)的相关性为:木荷-青冈栎混交林(SP)>杜英纯林(EP)>退化灌木林(DF),可以看出林分植被类型不同,对土

壤各活性有机碳组分的影响存在差异。

3.4 土壤有机碳与土壤养分的关系

表7表明,木荷-青冈栎混交林土壤各类型有机碳与土壤养分的相关性均达到极显著水平,且相关性普遍高于退化灌木林和杜英纯林。退化灌木林分除土壤水溶性有机碳与水解氮、速效钾的相关性不显著外,其它活性有机碳组分与土壤养分均呈极显著相关性。杜英纯林分中除土壤水溶性有机碳与速效钾没有显著相关性外,其它均表现为极显著相关。

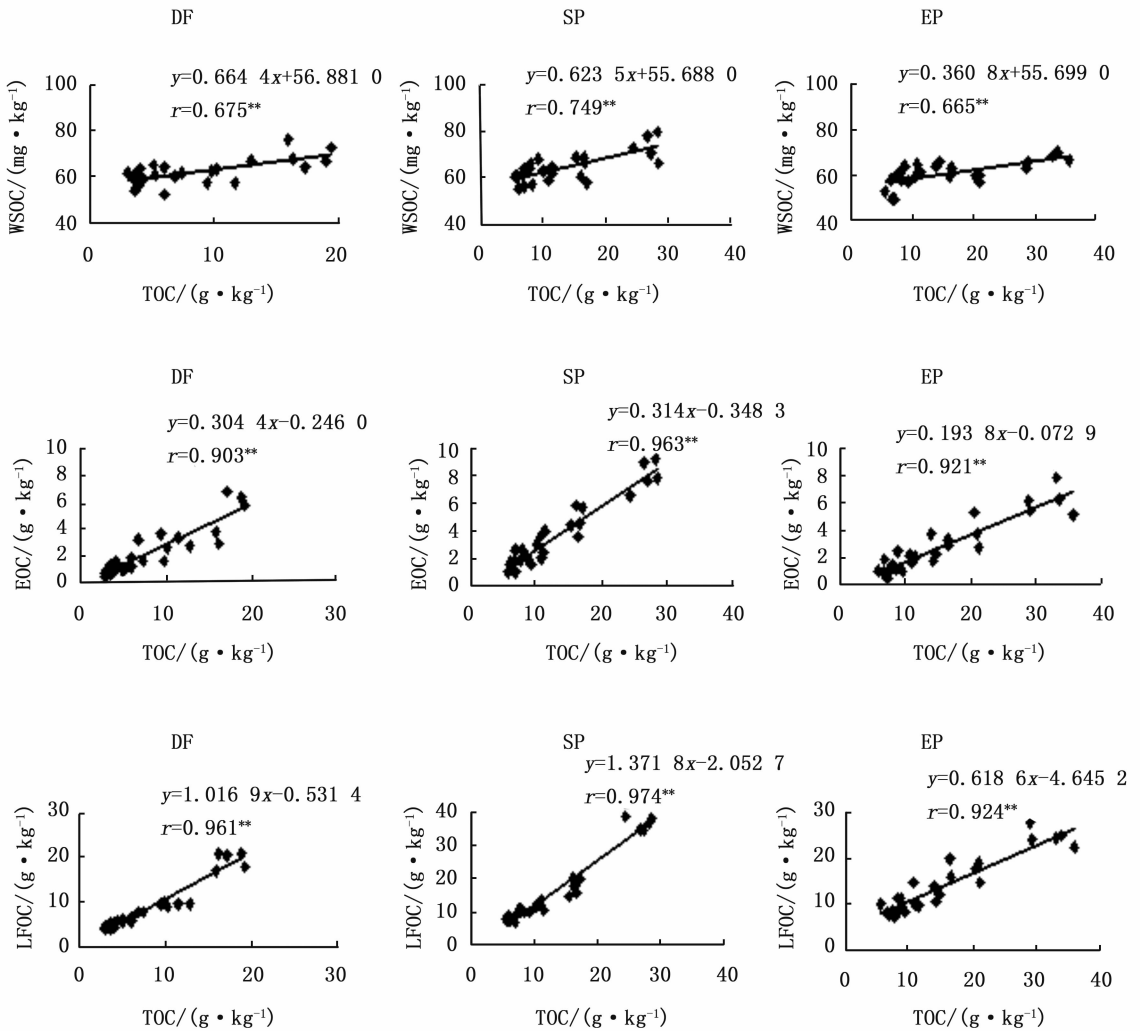


图 1 各林分类型土壤总有机碳与活性有机碳的相关关系

表 7 土壤有机碳与土壤养分的相关系数

林分类型	土壤养分	土壤总有机碳	土壤水溶性有机碳	土壤易氧化碳	土壤轻组有机质
退化灌木林	全氮	0.904**	0.506**	0.971**	0.896**
	水解氮	0.786**	0.287	0.883**	0.786**
	速效钾	0.518**	0.145	0.697**	0.594**
木荷-青冈栎混交林	全氮	0.944**	0.626**	0.933**	0.925**
	水解氮	0.907**	0.612**	0.910**	0.903**
	速效钾	0.801**	0.659**	0.709**	0.861**
杜英纯林	全氮	0.704**	0.659**	0.830**	0.736**
	水解氮	0.656**	0.614**	0.831**	0.628**
	速效钾	0.730**	0.367	0.521**	0.608**

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

4 结论与讨论

林分类型转变改变了凋落物输入的质量和数量及微生物的活动,进而影响土壤活性有机碳库^[14]。本研究通过比较退化灌木林、木荷-青冈栎混交林、杜英纯林 3 种林分土壤各活性有机碳组分的差异,

分析林分类型转变对土壤活性有机碳库的影响,并深入探讨了不同树种组成的人工林土壤活性有机碳的变化趋势。

4.1 林分改造对土壤有机碳的影响

研究表明,退化灌木林阔叶化改造后 0~50 cm 各土层土壤总有机碳含量均显著提高。森林植被每

年的碳归还量和分解速率是影响土壤总有机碳含量的主要因素,较大的碳归还量和缓慢的分解速率有利于土壤有机碳的积累^[24]。退化灌木林植被主要以灌木和草本为主,植被生长较差,植物残体输入土壤的有机碳量较少,此外,地表覆盖差导致温湿度变化大,加速了有机质矿化分解^[25-26],不利于土壤有机碳的积累。造林后,随着林龄的增长,林分逐渐郁闭,人工林乔木层生物量迅速积累,植被凋落物和根系分泌物以及细根周转产生的碎屑也显著增多,因此,人工林土壤有机碳的输入量要高于退化灌木林,此外,人工林林分逐渐郁闭改善了林内环境,对分解速率也有一定影响。

人工林生长 11 a 后,杜英纯林各土层土壤有机碳含量均高于木荷-青冈栎混交林,且在 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层差异达到显著水平。森林凋落物量主要受气候、林龄、树种组成和林分生物量等因素的影响^[27-28]。本研究中,两种人工林所选调查样地处于同一地区邻近位置,林龄相同,因此树种组成和林分生物量是影响林分凋落物归还量的最重要因素。树种组成不同的林分在凋落物数量^[29]、地上地下分配^[30]以及根系深度^[31]等方面有差异。杜英、木荷、青冈栎均为亚热带地区乡土阔叶树种,其中杜英较为速生,在幼林阶段表现更为明显^[32-33],杜英纯林在造林后乔木生物量迅速积累,两种林分生物量为:杜英纯林($124.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 木荷-青冈栎混交林($62.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),样地调查时林下凋落物层碳储量为:杜英纯林($2.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 木荷-青冈栎混交林($1.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),林分年凋落物归还量为:杜英纯林($2.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 木荷-青冈栎混交林($2.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) (未发表数据),植被生物量高、凋落物归还量大是杜英纯林土壤有机碳含量较高的主要原因。

4.2 林分改造对土壤活性有机碳的影响

水溶性有机碳在土壤总有机碳中所占比例很小,却是可以被土壤微生物直接利用的有机碳源^[34]。本研究中,3种林分土壤水溶性有机碳含量均表现为表层最高,随着土层深度增加大致呈下降趋势,而在 20~40 cm 土层有不同程度的提高。这主要是由于水溶性有机碳含量一定程度上取决于土壤总有机碳含量^[35],下层土壤受生物因素干扰小,因而总有机碳含量低,20~40 cm 土层水溶性有机碳不同层次的提高与心土层黏粒的吸附作用有关^[36]。木荷-青冈栎混交林各土层土壤水溶性有

机碳含量与退化灌木林相比有一定提高,但差异不显著,而杜英纯林土壤水溶性有机碳有所降低(20~30 cm 除外)。这是由于土壤有机质是水溶性有机碳的重要来源,两者常处于动态平衡中,一定条件下可以互相转化^[37-38]。此外,木荷-青冈栎混交林分的复层林结构,有效地缓解了南方多雨季节中土壤水溶性有机碳随地表径流的流失。Kalbitz 等^[39]认为地被物、粘土矿物、地表径流、微生物及土壤养分质量等都影响土壤水溶性有机碳的含量。因此,土壤水溶性有机碳是受多方面因素综合作用的结果。

土壤易氧化碳为土壤微生物活动供给重要能源,同时也是土壤养分的潜在来源,是稳定性相对较差的有机碳。两种人工林土壤易氧化碳含量均高于退化灌木林,且木荷-青冈栎混交林与退化灌木林差异显著,这是由于土壤易氧化碳含量在很大程度上决定于土壤总有机碳量^[40],造林后植被的恢复增加了凋落物和根系周转碎屑输入土壤的有机碳量,并且凋落物的分解也补充了易氧化碳的消耗^[41]。木荷-青冈栎混交林土壤易氧化碳含量高于杜英纯林,且在 0~10 cm 土层差异显著,这与两种人工林植物群落组成不同有关。不同森林植被下的凋落物和根系分泌物在数量及化学性质上有差异,其土壤生物的种类和活性也不同,这些都影响易氧化碳含量的变化。

土壤轻组有机质主要来源于地上凋落物和地下根系^[42],轻组有机质含量与土壤有机碳储存及其短期动态有关^[43],它的改变可以用来指示土壤肥力的变化。本研究中,人工林 0~50 cm 各土层土壤轻组有机质含量均显著高于退化灌木林,这是由于随着人工植被的恢复,林分生物量迅速增加,大量的凋落物积累丰富了轻组有机质的来源。造林树种不同的两种人工林土壤轻组有机质变化有差异,木荷-青冈栎混交林 0~20 cm 土层轻组有机质含量高于杜英纯林,而 20~50 cm 土层则低于杜英纯林,这可能是由于木荷-青冈栎混交林乔木层郁闭度低而林下植被覆盖多,灌草代谢周转快且草本根系较浅,为上层土壤提供了较多的新鲜有机碳(林下灌木碳储量为木荷-青冈栎混交林($0.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 杜英纯林($0.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),草本碳储量为木荷-青冈栎混交林($0.12 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 杜英纯林($0.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$));另一方面,在南方多降水的条件下,杜英纯林稀疏的林下灌草不能有效阻挡表层土壤轻组有

机质随地表水的流失。此外,不同树种输入的有机物化学性质也可能影响有机物的分解速率。Six等^[44]研究发现表层土壤轻组有机质主要依赖于植被凋落物和死根系的有机碳输入,表层以下土壤轻组有机质受凋落物影响减弱,细根分泌物、代谢残体以及死亡的微生物是轻组有机质的主要来源。杜英纯林下层土壤较高的轻组有机质含量可能主要来源于杜英较大的根系生物量。

林分类型转换对土壤总有机碳和各活性有机碳含量的影响程度主要表现在后者与前者的比率上。水溶性碳与总有机碳的比值反映了土壤碳的流失水平,与其矿化量呈正相关^[45]。本研究中,两种人工林土壤水溶性有机碳占总有机碳的比率均显著低于退化灌木林,说明林分改造有助于缓解土壤有机碳的流失。3种林分土壤水溶性有机碳与总有机碳的比率均随土层深度增加而呈上升趋势,这与土壤水溶性碳随渗透水迁移有关^[46]。易氧化碳作为指示土壤有机质早期变化的指标,是稳定性相对较差的碳。土壤易氧化碳占总有机碳的比率反映了土壤有机碳的稳定性^[47],本研究中木荷-青冈栎混交林的比值大,说明该林分土壤碳素的活度较强,碳库稳定性差;杜英纯林比值偏低,说明杜英纯林土壤有机质积累较好。

本研究中,3种林分土壤各活性有机碳含量与总有机碳含量的相关性均达到极显著水平,表明土壤活性有机碳含量在很大程度上依赖于有机碳总量,各活性碳虽然在形态和表述方式上有所不同,但都表征土壤中活性比较高的那部分有机碳^[48],对林分植被类型变化较为敏感,是评价北亚热带地区土壤质量和肥力的良好指标。相比于其它活性有机碳指标与总有机碳含量的相关系数,水溶性有机碳含量与总有机碳含量的相关性较低,一方面是因为水溶性有机碳含量取决于总有机碳含量,另一方面与水溶性有机碳随下渗水的迁移以及心土层黏粒的吸附作用有很大关系^[35]。此外,还可能是由于夏季土壤中的微生物活性强,对水溶性有机质消耗较多,水溶性有机碳总处于不断产生和消耗的动态平衡中,导致其与总有机碳的相关性较差^[24]。

土壤有机碳与土壤养分的相关性分析表明土壤养分的供给很大程度上取决于有机碳含量,且不同植被类型对林分土壤养分含量的影响有一定差异。木荷-青冈栎混交林各活性有机碳与土壤养分的相关性高于其它两种林分,这可能是因为木荷-青冈

栎混交林乔木层和林下植被盖度均较高,抗侵蚀能力强,从而减少了土壤表层养分的流失。3种林分均表现为土壤水溶性有机碳与土壤养分的相关性最低,与吴亚丛等^[17]的研究结果相一致。其中,退化灌木林土壤水溶性有机碳与水解氮、速效钾的相关性未达到显著水平,杜英纯林土壤水溶性有机碳与速效钾相关性也不显著,这与土壤水溶性有机碳的影响因素较复杂有关。

参考文献:

- [1] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Biogeochemistry: Soil warming and organic carbon content [J]. *Nature*, 2000, 408 (6814): 789-790.
- [2] 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.
- [3] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [4] 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]. *Crop and Pasture Science*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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): 1130-1139.
- [8] Zhang G L. Changes of soil labile organic carbon in different land uses in Sanjiang Plain, Heilongjiang Province [J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20(2): 139-143.
- [9] Kocyigit R, Demirci S. Long-term changes of aggregate-associated and labile soil organic carbon and nitrogen after conversion from forest to grassland and cropland in northern Turkey [J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(5): 475-482.
- [10] Zhang T, Li Y F, Chang S X, et al. Converting paddy fields to Lei bamboo (*Phyllostachys praecox*) stands affected soil nutrient concentrations, labile organic carbon pools, and organic carbon chemical compositions [J]. *Plant and soil*, 2013, 367(1-2): 249-261.
- [11] 王国兵,赵小龙,王明慧,等. 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 921-926.
- [12] 杜满义,范少辉,刘广路,等. 土地利用方式转变对赣中地区

- 土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2897-2904.
- [13] Jiang P K, Xu Q F. Abundance and dynamics of soil labile carbon pools under different types of forest vegetation [J]. Pedosphere, 2006, 16(4): 505-511.
- [14] 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 and Soil, 2009, 323(1-2): 153-162.
- [15] 刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 等. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较[J]. 植物生态学报, 2012, 36(005): 431-437.
- [16] Xiong Y M, Xia H P, Li Z, *et al.* Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China[J]. Plant and Soil, 2008, 304(1-2): 179-188.
- [17] 吴亚丛, 李正才, 程彩芳, 等. 林下植被抚育对樟树人工林土壤活性有机碳库的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3341-3346.
- [18] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 等. 植被恢复对退化红壤轻组有机质的影响[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 170-175.
- [19] 姜发艳, 孙辉, 林波, 等. 川西亚高山云杉人工林恢复过程中表层土壤碳动态变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2581-2587.
- [20] LY/T 1237-1999. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S].
- [21] Liang B C, MacKenzie 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.
- [22] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(2): 166-173.
- [23] 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): 1799-1806.
- [24] 徐秋芳, 姜培坤. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究[J]. 水土保持学报, 2005, 18(6): 84-87.
- [25] 谢锦升, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 退化红壤植被恢复后土壤轻组有机质的季节动态[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 557-563.
- [26] 吕家珑, 张一平, 王旭东, 等. 农田生态对土壤肥力的保护效应[J]. 生态学报, 2001, 21(4): 613-616.
- [27] 宁晓波, 项文化, 王光军, 等. 湖南会同连作杉木林凋落物量 20 年动态特征[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5122-5129.
- [28] 杨智杰, 陈光水, 谢锦升, 等. 杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2235-2240.
- [29] Montagnini F, Ramstad K, Sancho F. Litterfall, litter decomposition and the use of mulch of four indigenous tree species in the Atlantic lowlands of Costa Rica[J]. Agroforestry Systems, 1993, 23(1): 39-61.
- [30] Cuevas E, Brown S, Lugo A E. Above-and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest[J]. Plant and Soil, 1991, 135(2): 257-268.
- [31] Carvalho K D, Nepstad D C. Deep soil heterogeneity and fine root distribution in forests and pastures of eastern Amazonia[J]. Plant and Soil, 1996, 182(2): 279-285.
- [32] 黄清麟, 郑群瑞, 阮学瑞. 福建青冈萌芽林分结构及生产力的研究[J]. 福建林学院学报, 1995, 15(2): 107-111.
- [33] 苏治平. 山杜英人工林生长状况分析[J]. 福建林学院学报, 2000, 20(1): 38-41.
- [34] 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: 783-790.
- [35] 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.
- [36] Kuiters A T, Mulder W. Water-soluble organic matter in forest soils [J]. Plant and Soil, 1993, 152(2): 225-235.
- [37] 陶澍, 曹军. 山地土壤表层水溶性有机物淋溶动力学模拟研究[J]. 中国环境科学, 1996, 16(6): 410-414.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Laik R, Kumar K, Das D K, *et al.* Labile soil organic matter pools in a calciorient after 18 years of afforestation by different plantations[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 42(2): 71-78.
- [42] Boone R D. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(11): 1459-1468.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-552.
- [46] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究 [J]. 林业科学, 2005, 41(1): 10-13.
- [47] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 42(6): 124-128.
- [48] 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.