

辽东山区三种典型林型土壤有机碳及其组分含量

殷有^{1,2*} 刘源跃¹ 井艳丽¹ 魏亚伟^{1,2} 安云全³ 阎品初¹ 周永斌^{1,2}

(¹沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866; ²辽河平原森林生态站, 辽宁昌图 112518; ³辽宁省实验林场, 辽宁抚顺 113311)

摘要 分析森林土壤有机碳及其组分含量特征是研究森林生态系统碳循环的基础。本研究以辽东山区典型的天然次生林(阔叶混交林)、落叶松人工纯林和落叶松-水曲柳人工混交林为对象,通过对其不同土层深度(0~10、10~20和20~30 cm)土壤进行样品采集和分析,研究不同林型土壤有机碳(TOC)及其活性有机碳组分的变化特征。结果表明:3种林型土壤有机碳和活性有机碳均随土层深度的增加逐渐降低;3种林型土壤有机碳和活性有机碳含量均是天然次生林>落叶松-水曲柳人工混交林>落叶松人工纯林;其中,表层(0~10 cm)土壤有机碳含量分别为61.52、49.22和41.16 g·kg⁻¹,活性有机碳以颗粒有机碳(POC)含量最多,分别为20.18、15.84和12.92 g·kg⁻¹,轻组有机碳(LFOC)和微生物生物量碳(MBC)次之,分别为13.51、10.04、8.24 g·kg⁻¹和9.06、6.13、5.11 g·kg⁻¹,易氧化有机碳(EOC)含量最少,仅为3.54、2.78、2.26 g·kg⁻¹;统计分析表明,土壤有机碳与LFOC、POC、EOC和MBC均存在极显著正相关关系($P<0.01$)。

关键词 人工林;天然次生林;土壤有机碳;活性有机碳

Contents of soil organic carbon and components in three types of forests in the mountain area of Eastern Liaoning. YIN You^{1,2*}, LIU Yuan-yue¹, JING Yan-li¹, WEI Ya-wei^{1,2}, AN Yun-quan³, YAN Pin-chu¹, ZHOU Yong-bin^{1,2} (¹College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; ²Research Station of Liaohe-River Plain Forest Ecosystem, Chinese Forest Ecosystem Research Network, Changtu 112518, Liaoning, China; ³Experimental Forest Farm in Liaoning Province, Fushun 113311, Liaoning, China).

Abstract: Soil organic carbon and its components play an important role in carbon cycling of forest ecosystems. In this study, we selected three typical forest types of Eastern Liaoning, including natural secondary forest (broad-leaved mixed forest, SF), pure larch plantation forest (LF), and larch and Manchurian ash mixed plantation forest (MF), and collected soil samples of different depths (0–10, 10–20 and 20–30 cm) to analyze the variation of soil organic carbon (TOC) and its active carbon components. The contents of TOC and its active organic carbon in the three forest types all decreased with the increases of soil depth. Among the three forest types, the contents of TOC and its active organic carbon decreased in the sequence of the natural secondary forest > mixed plantation forest > pure plantation forest. The TOC contents in the surface (0–10 cm) were 61.52, 49.22 and 41.16 g·kg⁻¹, respectively. For active organic carbon, the contents of particulate organic carbon (POC) were the highest being 20.18, 15.84 and 12.92 g·kg⁻¹, followed by light fraction organic carbon (LFOC) and microbial biomass carbon (MBC), with the contents being 13.51, 10.04, 8.24 g·kg⁻¹ and 9.06, 6.13, 5.11 g·kg⁻¹ respectively. The contents of easily oxidized organic carbon (EOC) were the lowest, being 3.54, 2.78, 2.26 g·kg⁻¹ in the natural secondary forest, mixed plantation forest, and pure plantation forest, respectively. There were significantly positive relationships between TOC and LFOC, POC, EOC and MBC across the three types of forests ($P<0.01$).

Key words: plantation forest; secondary natural forest; soil organic carbon; active organic carbon.

土壤是陆地生态系统的核心,森林土壤有机碳是陆地碳库的重要组成部分,其含量随土地利用变化、森林经营管理、自然与人为干扰等影响而呈现较强动态变化。导致这一现象的原因之一是由于构成土壤有机碳的不同组分在不同环境条件下有不同的分解响应(Richter *et al.*, 1999; Batlle-Bayer *et al.*, 2010; 胡慧蓉等, 2010)。土壤活性有机碳是指在土壤中具有溶解性、易氧化、易矿化、易分解、不稳定、形态和空间位置对植物和微生物活性影响较高的碳素(沈宏等, 1999)。活性有机碳组分如轻组有机碳、颗粒有机碳、氧化有机碳、水溶性有机碳和微生物量碳等在土壤中移动较快,对环境的响应比总有机碳更为敏感和迅速,能较好地反映出土壤有机碳库的微小变化,对植物养分供给、平衡土壤碳库和保持土壤肥力特性有重要的作用(Blair *et al.*, 1995; 罗友进等, 2010; 张迪等, 2008)。此外,这些复杂的有机碳组分和不同的空间分布特征与碳循环、土壤养分及土壤性质均有密切关系,土壤各组分碳的含量和空间分布也早已成为土壤肥力和现代碳循环研究的重要内容(王春燕等, 2017)。

近年来国内外学者对各种生态系统的土壤有机碳组分含量的研究较多,且多集中在土地利用变化或长期施肥对农田土壤有机碳及其组分的影响方面(李昌新等, 2009; 邵继承等, 2011; 陈志杰等, 2016)。在森林经营过程中,森林土壤质量改良与恢复是人工林建设和经营管理过程中的重要目标之一,而探究经营方式和不同森林类型对土壤有机碳组分的影响逐渐成为研究热点,如,王义祥等(2014)发现,经营年限使福建地区柑橘果园土壤有机碳及其组分、以及活性有机碳占有有机碳的比率均产生变化,随着种植年限的增加,土壤活性有机碳组分占总有机碳的比例下降,超过一定种植年限后,土壤有机碳质量存在退化趋势;李小平等(2012)研究发现,川南地区天然林人工更新成水杉林和柳杉林后土壤活性有机碳组分明显降低;姜霞等(2013)对黔中地区阔叶林、马尾松林、杉木林土壤轻组有机碳含量进行研究,结果表明,表层土壤轻组有机碳含量及其分配比例均为阔叶林显著高于马尾松林和杉木林;辜翔等(2016)以丘陵区杉木人工林、马尾松-石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林等为研究对象,发现土壤有机碳及其活性组分含量随季节和林型发生变化,相同森林类型不同土壤有机碳组分含量的季节变化规律不同。然而,关于辽东地区不同林型尤

其是人工林和天然林土壤有机碳及其组分含量差异的研究则较少(曾凡鹏等, 2016; 张慧东等, 2017)。

辽宁省东部山区,坡度较大,降水集中,森林类型复杂多样,森林资源丰富,森林面积约占全省的60%以上,森林蓄积量占全省的70%以上,在全省森林资源中占有重要地位。长白落叶松为辽东山区的主要造林树种,20世纪50年代以来大量次生林转化为人工林后,由于造林树种单一和林分结构等原因,落叶松人工林存在地力衰退、森林碳储量下降,生态环境恶化等问题而广受研究者的关注(刘世荣等, 1993; 闫德仁, 1997; 杨茂生等, 2002)。本文以辽东山区典型森林类型(天然次生林、长白落叶松人工纯林、长白落叶松-水曲柳人工混交林)为对象,对其土壤基本理化性质、有机碳及其活性有机碳组分(轻组有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳)进行研究,探讨不同林分类型间土壤有机碳及其组分的差异,为该地区森林的合理经营和森林土壤固碳能力的提高提供科学参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验研究区位于辽宁省实验林场(124°59' E—125°18' E, 41°51' N—42°00' N),地处长白山脉龙岗支脉的北坡,属辽宁省东部中低山地。研究区气候为暖温带大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季炎热多雨,年降水量为714.2~1025.3 mm,且雨量多集中在7—8月。本地区年均温为4.5℃,≥10℃积温2498.4~2877.3℃,无霜期约125 d。土壤类型为山地暗棕壤,成土母质为花岗岩和花岗片麻岩。该地区以红松为主的针阔混交林植物群落已遭破坏,现主要为更新后的天然次生林和人工林。乔木树种主要有长白落叶松(*Larix olgensis*)、日本落叶松(*Larix kaempferi*)、红松(*Pinus koraiensis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、色木槭(*Acer mono*)和白桦(*Betula platyphylla*)等。

1.2 样地设置与样品采集

2016年8月在该地区分别选取天然次生林、落叶松人工纯林以及落叶松-水曲柳人工混交林设置面积均为20 m×30 m样地,样地基本概况见表1。每个样地均设3次重复,并保证重复样地不在同一

表1 样地基本概况

Table 1 Basic information of the sampling plots

林型	胸径 (cm)	树高 (m)	林分密度 (株·hm ⁻²)	郁闭度	海拔 (m)	坡位	坡度 (°)	土层厚度 (cm)	枯落物厚度 (cm)	树种组成
落叶松人工纯林	15.9±4.2	15.2±2.3	1275±12	0.7	610~690	中	25~28	45±3	2.4±0.5	10 落
落叶松-水曲柳人工混交林	14.0±4.4	12.3±4.4	1123±56	0.8	600~680	中	25~27	45±3	3.5±0.8	5 落 4 水 1 栎
天然次生林	17.5±10.8	14.8±4.5	863±91	0.8	620~700	中	26~28	52±4	5.0±1.1	3 栎 3 花 3 水 1 槭

落、水、栎、花、槭分别代表长白落叶松、水曲柳、蒙古栎、花曲柳、色木槭。

个小班,且立地条件相似。在每个样地内选取8个采样点,首先去除土壤表面凋落物和腐殖质层,分别按0~10、10~20、20~30 cm 分层取样,将同一土层8个样点取得的土样混合,去除可见植物细根及凋落物。利用四分法分离土样,部分新鲜土样带回室内保存于4℃冰箱,用于测定土壤微生物量碳;部分土样于阴凉处自然风干并过8 mm 孔径土壤筛后保存,用于理化性质和其他指标的测定。同时利用环刀在每层取样用于土壤容重和含水量的测定。

1.3 分析方法

土壤总有机碳、全氮测定采用元素分析仪(CHN Elemental Analyzer 德国 Elementar 公司生产,型号:Elementar vario MACRO cube)测定。土壤轻组有机碳分离方法参考 Janzen 等(1991),采用碘化钠浸提法、元素分析仪测定。土壤颗粒有机碳采用 Cambardella 和 Elliott(1992)的方法,0.5 mol·L⁻¹六偏磷酸钠浸提法、元素分析仪测定。土壤易氧化有机碳(EOC)采用 333 mmol·L⁻¹的 KMnO₄ 氧化,比色法测定(沈宏等,1999)。土壤微生物生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定(Singh *et al.*,1980)。土壤含水量测定采用 105℃ 烘干法;容重采用环刀法;土壤 pH 采用玻璃电极法(FE20,上海梅特勒-托利多仪器有限公司生产,水土比为 2.5:1)测定;全磷的测定采用浓硫酸—高氯酸消

煮—钼锑抗比色法(鲁如坤,2000)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析。分别运用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)对土壤有机碳及组分含量进行数据分析。用 Pearson 系数相关分析法分析土壤有机碳、有机碳组分与土壤基本理化性质之间的相关性。在 Excel、Origin 9.0 软件中完成数据整理、制图等。

2 结果与分析

2.1 三种林型土壤理化性质的特征

由表2可知,3种林型土壤容重(VW)均随土层深度的增加逐渐变大,而3种林型间,人工纯林较高,尤其表层(0~10 cm)土壤容重显著高于其他两种林型($P<0.05$)。土壤含水量(SWC)以天然次生林最高,人工林混交林又高于人工纯林。此外,土壤全氮(TN)和全磷(TP)变化规律相似,均随土层厚度增加逐渐降低,不同林型间,则均是天然次生林>落叶松-水曲柳人工混交林>落叶松人工纯林,其中上层(0~20 cm)土壤 TN 含量在3种林型间均达显著差异水平($P<0.05$)。土壤 pH 值以人工纯林最小,天然次生林最大,但3种林型土壤均呈酸性。

2.2 三种林型土壤有机碳及活性有机碳的含量特征

由图1可以看出,土壤活性有机碳均随土层厚

表2 三种林型土壤的基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil

林分类型	土层深度 (cm)	容重 (g·cm ⁻³)	含水量 (%)	全氮 (g·kg ⁻¹)	全磷 (g·kg ⁻¹)	pH
落叶松人工纯林	0~10	1.08±0.12 Ba	27.30±0.56 Ac	4.15±0.32 Ac	0.50±0.02 Aa	5.73±0.35 Aa
	10~20	1.36±0.11 Aa	21.10±1.66 Bc	2.44±0.37 Bc	0.47±0.03 ABa	5.98±0.27 Aa
	20~30	1.42±0.09 Aa	19.80±0.50 Cb	1.90±0.23 Bb	0.43±0.04 Ba	6.11±0.18 Aa
落叶松-水曲柳 人工混交林	0~10	0.90±0.02 Cbc	29.43±1.08 Ab	4.72±0.19 Ab	0.56±0.10 Aa	6.00±0.09 Aa
	10~20	1.18±0.13 Bab	24.10±1.10 Bb	3.04±0.19 Bb	0.51±0.07 Aa	6.12±0.05 Aa
天然次生林	20~30	1.40±0.01 Aa	22.23±1.22 Bab	2.51±0.37 Bab	0.48±0.07 Aa	6.13±0.06 Aa
	0~10	0.80±0.04 Cb	31.67±0.78 Aa	5.59±0.19 Aa	0.63±0.09 Aa	6.06±0.07 Aa
	10~20	1.04±0.10 Bb	27.13±1.08 Ba	3.75±0.20 Ba	0.59±0.15 Aa	6.20±0.12 Aa
	20~30	1.34±0.04 Aa	23.57±2.27 Ca	2.98±0.53 Ca	0.50±0.12 Aa	6.25±0.10 Aa

表中数据均为平均值±标准差;同列小写字母不同表示同一土层不同林型间差异显著,同列大写字母不同表示同一林型不同土层间差异显著($P<0.05$)。

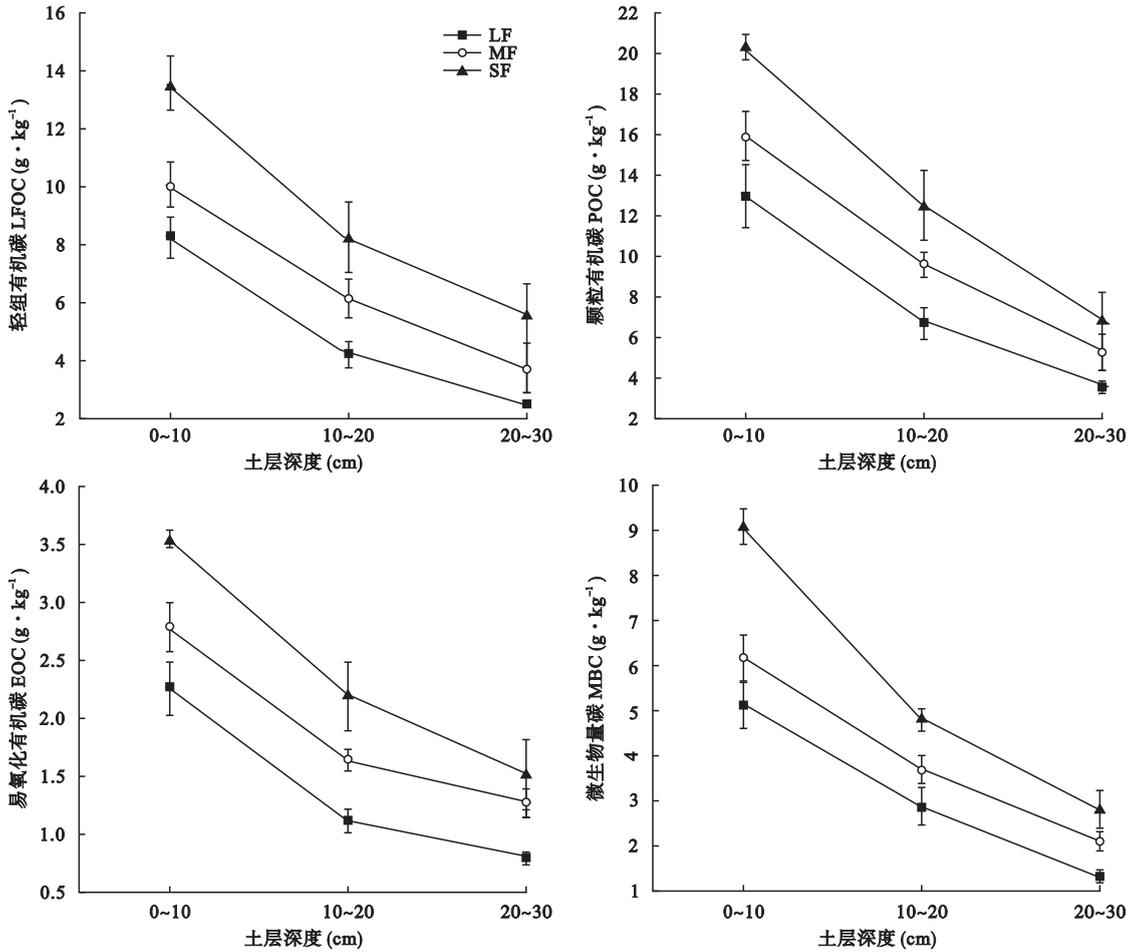


图1 三种典型林型土壤活性有机碳含量变化特征

Fig.1 Variations of soil active organic carbon contents in three typical forest types

LF、MF、SF 分别代表落叶松人工纯林、落叶松-水曲柳人工混交林、天然次生林。

度的增加逐渐减少,而且均是天然次生林>落叶松-水曲柳人工混交林>落叶松人工纯林;4种活性有机碳组分之间,土壤轻组有机碳(LFOC)和颗粒有机碳(POC)含量相对较高,易氧化有机碳(EOC)和微生物量碳(MBC)含量相对较低。3种林型4种活性有机碳组分表层(0~10 cm)土壤含量分别为8.24~13.51 g·kg⁻¹、12.92~20.18 g·kg⁻¹、2.26~3.54 g·kg⁻¹和5.11~9.06 g·kg⁻¹,且均显著高于下层(10~30 cm)土壤。

由表3可以看出,3种林型土壤TOC的变化范围较大,16.80~61.52 g·kg⁻¹,且均随土层厚度的增加显著减少($P<0.05$);3种林型之间,土壤TOC含量表现为天然次生林>落叶松-水曲柳人工混交林>落叶松人工纯林,分别为27.91~61.52、23.89~49.22、16.80~41.16 g·kg⁻¹。

土壤活性有机碳各组分占总有机碳的比例随林型和土层深度的变化而变化(表3)。如同一林型不

同土层间,各活性有机碳组分占总有机碳的比例均为0~10 cm和10~20 cm高于20~30 cm,颗粒有机碳占总有机碳的比例最高,为20.99%~32.81%,易氧化有机碳占总有机碳的比例最小,仅为4.79%~5.75%;而相同土层不同林型间土壤各活性有机碳占总有机碳的比例差异却较小,未达到显著性水平($P>0.05$)。

2.3 土壤有机碳及活性有机碳与土壤理化性质间的相关关系

土壤有机碳、各组分及其与理化性质的相关关系如表4所示,本研究区土壤VW与TOC、LFOC、POC、EOC和MBC有极显著负相关性($P<0.01$),pH值与TOC及其组分之间相关不显著,其余指标之间均表现为极显著正相关关系($P<0.01$)。土壤TOC及其组分之间均呈现极显著相关性($P<0.01$),其中土壤TOC与LFOC、POC、EOC、MBC之间相关系数分别为0.990、0.987、0.996和0.974;土壤LFOC与

表 3 三种典型林型土壤有机碳含量及各活性有机碳组分的分配比例

Table 3 Distribution of soil organic carbon and distribution ratio of active organic carbon components in three typical forest types

林分类型	土层深度 (cm)	TOC 含量 (g · kg ⁻¹)	有机碳组分占有机碳的比例 (%)			
			LFOC/TOC	POC/TOC	EOC/TOC	MBC/TOC
落叶松人工纯林	0~10	41.16±3.77 Ac	20.03	31.34	5.48	12.40
	10~20	22.07±2.51 Bc	19.17	30.26	5.10	12.88
	20~30	16.80±0.92 Cb	15.00	20.99	4.79	7.82
落叶松-水曲柳 人工混交林	0~10	49.22±1.93 Ab	20.37	32.19	5.65	12.48
	10~20	30.24±3.07 Bb	20.25	31.74	5.43	12.14
天然次生林	20~30	23.89±3.84 Cbc	15.60	21.95	5.35	8.82
	0~10	61.52±2.07 Aa	21.97	32.81	5.75	14.75
	10~20	39.36±5.69 Ba	20.97	31.61	5.57	12.27
	20~30	27.91±5.23 Ca	20.01	23.99	5.41	10.07

表中数据均为平均值±标准差。同列小写字母不同表示相同土层不同林型间差异显著,同列大写字母不同表示相同林型不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 土壤有机碳及活性有机碳与土壤理化性质的相互关系

Table 4 Relationship between soil organic carbon and active organic carbon contents and soil physical and chemical properties

指标	TOC	LFOC	MBC	EOC	VW	SWC	TN	TP	pH
POC	0.987**	0.986**	0.977**	0.988**	-0.959**	0.955**	0.981**	0.640**	-0.287
TOC		0.990**	0.974**	0.996**	-0.947**	0.958**	0.993**	0.660**	-0.259
LFOC			0.976**	0.987**	-0.945**	0.947**	0.980**	0.667**	-0.227
MBC				0.971**	-0.930**	0.923**	0.965**	0.581**	-0.256
EOC					-0.941**	0.967**	0.990**	0.654**	-0.238
VW						-0.930**	-0.936**	-0.567**	0.352
SWC							0.962**	0.682**	-0.246
TN								0.643**	-0.292
TP									-0.046

表中 VW、SWC、TN、TP、TOC、LFOC、POC、EOC、MBC 分别代表容重、含水量、全氮、全磷、有机碳、轻组有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

POC、EOC、MBC 之间相关系数分别为 0.986、0.987 与 0.976; 土壤 POC 与 EOC 和 MBC 之间相关系数分别为 0.988 和 0.977; 土壤 EOC 与 MBC 二者相关系数为 0.971。

3 讨论

本研究表明,天然林转变为人工林后土壤有机碳呈降低的趋势且土壤有机碳含量随土层厚度的增加而降低,与王彦梅等(2010)、刘延惠等(2012)的研究结果类似;这可能与天然林人工更新成纯林和混交林后,林下枯落物、土壤有机物归还减少等有关,人工林枯落物组成较为单一,微生物活性较小、分解能力较低、土壤外源有机物输入减少,使土壤有机碳相比于天然林明显降低(李小平,2012)。人为活动也会对土壤有机碳含量产生影响(Grandy *et al.*, 2007),主要由于人工林土壤受到人为干扰较大,不如天然次生林利于积累有机碳(渠开跃等, 2009)。此外,本研究中,土壤表层对人工造林的响

应最为敏感,土壤有机碳含量受林型变化的影响程度随土层加深而衰减,这与刘延惠等(2012)对六盘山华北落叶松人工林土壤有机碳的研究结果一致。

近年来较多学者对土壤有机碳及其组分的变化进行了研究,如王春燕等(2016)分别对中国东部热带、亚热带和温带森林土壤有机碳组分的纬度格局进行研究,秦纪洪等(2012)对我国西南亚高山森林表层(0~20 cm)土壤轻组有机碳进行研究,盛浩等(2015)对中亚热带天然林及其转化为杉木人工林的过程中不同有机碳组分的变化进行研究。上述研究结果均表明,人工林相比于天然林不同有机碳组分含量均较低,且不同组分占总有机碳的比例差异也较大,与本研究结果不一致,这可能是由于研究区土壤母质、树种、林龄、林分密度、研究方法等不同所引起的。本研究得出土壤有机碳各组分均与总有机碳呈极显著正相关 ($P < 0.01$),这与贾国梅等(2015)、辜翔等(2016)、石亚攀等(2013)研究结果基本一致。不同林型间土壤有机碳组分占有有机碳的

比例以天然次生林>落叶松-水曲柳人工混交林>落叶松人工纯林为主,且随土层厚度的增加,有机碳各组分占其比例呈下降的趋势,但差异未达到显著性水平($P>0.05$)。

研究表明,土壤活性有机碳各组分能反映土壤有机碳的早期变化,可作为表示土壤有机碳和土壤肥力变化的敏感指标(房飞等,2013)。本研究中,土壤有机碳各组分—LFOC、POC、EOC和MBC均以天然次生林最高,落叶松-水曲柳人工混交林大于落叶松人工纯林,且随土壤厚度的增加逐渐减少,这与以往研究结果相似(王清奎等,2006;陈高起等,2015;张仕吉等,2016)。土壤LFOC和POC与不同土层植被根系分布、生物活动、动植物残屑含量及人为干扰等因素有关(姜霞等,2013;李洁等,2013;陈高起等,2015),天然次生林人工更新后土壤含水量降低,对土壤微生物的活动产生了抑制作用,且林下土壤凋落物数量减少,这均导致土壤LFOC和POC含量的降低。3种林型土壤EOC含量产生差异的原因与天然次生林内树种丰富,阔叶树种比例较大,细根生物量大、凋落物多,且易分解,外源碳输入量较高,促进了土壤EOC的积累有关。此外,土壤湿度对EOC含量具有较大影响,较高的土壤湿度可能更利于易氧化有机碳的积累(徐侠等,2008;林晓东等,2012),这也是本研究中天然林和混交林EOC含量高于人工纯林的原因之一。土壤微生物量碳主要来源于土壤中活的细菌、真菌、藻类和土壤微动物体内所含的碳,在森林土壤中,凋落物数量组成、土壤理化性质的差异是导致不同林型土壤微生物生物量差异的主要因素(刘爽等,2010),较多的凋落物为土壤微生物提供了大量的碳源物质,促进了微生物的繁殖(王春阳等,2010)。土壤表层具有较多的枯枝落叶和腐殖质以及较好的水热条件和通气状况,随着土层加深,土壤通透性变差,养分减少,从而限制了土壤微生物的活动,导致土壤微生物碳含量降低。

参考文献

陈高起,傅瓦利,沈 艳,等. 2015. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响. 水土保持学报, **29**(3): 123-129.

陈志杰,韩士杰,张军辉. 2016. 土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响. 生态学杂志, **35**(9): 2379-2385.

房 飞,唐海萍,李滨勇. 2013. 不同土地利用方式对土壤

有机碳及其组分影响研究. 生态环境学报, **22**(11): 1774-1779.

辜 翔,张仕吉,项文化,等. 2016. 中亚热带4种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征. 植物生态学报, **40**(10): 1064-1076.

胡慧蓉,马焕成,罗承德,等. 2010. 森林土壤有机碳分组及其测定方法. 土壤通报, **41**(4): 1018-1024.

贾国梅,牛俊涛,席 颖. 2015. 三峡库区消落带湿地土壤有机碳及其组分特征. 土壤, **47**(5): 926-931.

姜 霞,王 进,李丛瑞,等. 2013. 黔中地区3种林分土壤轻组有机碳含量研究. 江苏农业科学, **41**(2): 359-361.

李昌新,黄 山,彭现宪,等. 2009. 南方红壤稻田与旱地土壤有机碳及其组分的特征差异. 农业环境科学学报, **28**(3): 606-611.

李 洁,盛 浩,周 萍,等. 2013. 亚热带丘陵几种林地土壤剖面有机碳和轻组有机碳的分布. 土壤通报, **44**(4): 851-857.

李小平. 2012. 川南三种林地土壤有机碳及其组分研究(硕士学位论文). 雅安:四川农业大学.

林晓东,漆智平,唐树梅,等. 2012. 海南人工林地、人工草地土壤易氧化有机碳和轻组碳含量初探. 热带作物学报, **33**(1): 171-177.

刘世荣,李春阳. 1993. 落叶松人工林养分循环过程与潜在地力衰退趋势的研究. 东北林业大学学报, **21**(2): 19-24.

刘 爽,王传宽. 2010. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局. 生态学报, **30**(12): 3135-3143.

刘延惠,王彦辉,于澎涛,等. 2012. 六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量. 林业科学, **48**(12): 1-9.

鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社.

罗友进,赵 光,高 明,等. 2010. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响. 水土保持学报, **24**(6): 117-122.

秦纪洪,武艳嫫,孙 辉,等. 2012. 低温季节西南高山森林土壤轻组有机碳动态. 土壤, **44**(3): 413-420.

渠开跃,冯慧敏,代力民,等. 2009. 辽东山区不同林型土壤有机碳剖面分布特征及碳储量研究. 土壤通报, **40**(6): 1316-1320.

渠开跃,代力民,冯慧敏,等. 2009. 辽东山区不同林型土壤有机质和NPK分布特征. 土壤通报, **40**(3): 558-562.

沈 宏,曹志洪,胡正义. 1999. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学杂志, **18**(3): 33-39.

石亚攀,陈立新,段文标,等. 2013. 红松针阔混交林林隙土壤总有机碳和易氧化有机碳的时空异质性研究. 水土保持学报, **27**(6): 186-192.

盛 浩,李 洁,周 萍,等. 2015. 土地利用变化对花岗岩红壤表土活性有机碳组分的影响. 生态环境学报, **24**(7): 1098-1102.

邵继承,靳振江,崔立强,等. 2011. 不同土地利用下湖北江汉平原湿地起源土壤有机碳组分的变化. 水土保持学报, **25**(6): 124-128.

王春燕,何念鹏,吕瑜良. 2016. 中国东部森林土壤有机碳

- 组分的纬度格局及其影响因子. 生态学报, **36**(11): 3176-3188.
- 王春燕, 李建华, 刘汉文, 等. 2017. 不同林龄橡胶林土壤各组分碳的垂直分布及其相关关系. 林业资源管理, (3): 109-113+127.
- 王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等. 2010. 黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响. 生态学报, **30**(24): 7092-7100.
- 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 2006. 杉木纯林与常绿阔叶林土壤活性有机碳库的比较. 北京林业大学学报, **28**(5): 1-6.
- 王彦梅, 王朋, 于立忠. 2010. 辽东山区天然次生林转化为人工林对土壤有机碳的影响. 东北林业大学学报, **38**(12): 54-57.
- 王义祥, 叶菁, 王成己, 等. 2014. 不同经营年限对柑橘果园土壤有机碳及其组分的影响. 生态环境学报, **23**(10): 1574-1580.
- 徐侠, 王丰, 栾以玲, 等. 2008. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志, **27**(7): 1115-1121.
- 闫德仁. 1997. 人工林土壤腐殖质特性和土壤酶活性的研究. 林业科技, **22**(5): 12-14.
- 杨茂生, 谢会成. 2002. 引种的华北落叶松人工林对土壤影响的研究. 西北林学院学报, **17**(3): 35-37+77.
- 曾凡鹏, 迟光宇, 陈欣, 等. 2016. 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学杂志, **35**(7): 1819-1825.
- 张迪, 韩晓增, 李海波, 等. 2008. 不同植被覆盖与施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响. 生态与农村环境学报, **24**(4): 1-5.
- 张慧东, 尤文忠, 魏文俊, 等. 2017. 辽东山区原始红松林土壤理化性质及其与土壤有机碳的相关性分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **45**(1): 76-82.
- 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 2016. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响. 生态环境学报, **25**(6): 911-919.
- Battle-Bayer L, Batjes NH, Bindraban PS. 2010. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **137**: 47-58.
- Blair GJ, Lefroy RDB, Lise L. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, **46**: 1459-1466.
- Cambardella CA, Elliott ET. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science of America Journal*, **56**: 777-783.
- Grandy AS, Robertson GP. 2007. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems*, **10**: 59-74.
- Janzen HH, Campbell CA, Brandt SA, et al. 1991. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science of America Journal*, **56**: 1799-1806.
- Richter DD, Markexitz D, Trubbbore SE, et al. 1999. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a reestablishing forest. *Nature*, **400**: 56-58.
- Singh RA. 1980. *Soil Physical Analysis*. New Delhi-Ludhiana: Kalyani Publishers.

作者简介 殷有,男,1971年生,副教授,研究方向为森林经营与管理。E-mail: yzyb@163.com

责任编辑 李凤芹
