

不同树龄香榧土壤有机碳特征 及其与土壤养分的关系

张雨洁, 王 斌, 李正才*, 黄盛怡, 原雅楠, 秦一心

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 杭州 311400)

摘 要: 该研究以浙江省诸暨市的香榧国家森林公园 5 个树龄段(0~50、50~100、100~300、300~500 和 500a 以上)的香榧(*Torreya grandis*)为研究对象, 通过野外采集土壤样品, 分析其 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤总有机碳(TOC)、易氧化碳(ROC)、轻组有机质(LFOM)及土壤养分含量, 探讨不同树龄香榧土壤有机碳变化规律, 为香榧林的土壤质量评价与持续利用, 以及香榧古树的保护提供理论依据。结果表明: (1) 不同树龄香榧土壤的总有机碳、易氧化碳和轻组有机质含量均随香榧树龄的增加呈先增大后减小的趋势, 且 300~500a 生的数值最大, 但易氧化碳与轻组有机质含量在各树龄间的差异不明显。 (2) 不同树龄香榧土壤中易氧化碳占总有机碳的比例总体表现为: 50~100a>0~50a>100~300a>300~500a>500a 以上(0~20 cm 土层除外)。 (3) 各树龄段香榧土壤易氧化碳和轻组有机质含量与土壤总有机碳之间的相关性均达到极显著水平; 不同树龄段香榧土壤总有机碳、各活性有机碳组分与全氮(TN)、水解性氮(AN)、有效磷(AP)之间的相关性较好(0~50a 生除外), 与速效钾(AK)、交换性钙(Ca)和交换性镁(Mg)之间的相关性较差(500a 以上除外); 500a 以上香榧土壤总有机碳、各活性有机碳组分与土壤养分的相关性均达到极显著水平。

关键词: 树龄; 香榧; 土壤总有机碳; 土壤活性有机碳

中图分类号: Q948.113; S714.5

文献标志码: A

Relationships between Soil Organic Carbon Characteristics and Soil Nutrients for Different Tree-age *Torreya grandis*

ZHANG Yujie, WANG Bin, LI Zhengcai*, HUANG Shengyi, YUAN Yanan, QIN Yixin

(Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China)

Abstract: In the *Torreya grandis* National Forest Park in Zhuji, Zhejiang, *Torreya grandis* with five age groups (0–50, 50–100, 100–300, 300–500 and over 500 years) were selected for this study. Soil samples were collected in the field to analyze the total soil organic carbon (TOC), readily oxidizable carbon (ROC), light fraction organic matter (LFOM), and soil nutrient contents in 0–20, 20–40, and 40–60 cm soil layers. The changes of soil organic carbon for different tree-age *T. grandis* were studied in this paper, which provided theoretical basis for the evaluation and sustainable use of the soil quality in forest stands, and the conservation of the old *T. grandis*. The results showed that, (1) the TOC, ROC and LFOM increased firstly and then decreased with the increase of the tree age, among which the content was the highest for the 300–500 years group. However, significant differences among tree ages were not found in the ROC and LFOM. (2) The ratio of ROC to TOC for different tree-age *T. grandis* was: 50–100>0

收稿日期: 2018-05-09; 修改稿收到日期: 2018-07-10

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFC0505403)

作者简介: 张雨洁(1993–), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态系统结构与功能研究。E-mail: 290666614@qq.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

—50>100—300>300—500>500 years (except 0—20 cm soil layer). (3) The correlations between ROC, LFOM, and TOC in all age groups are extremely significant. The correlations between TOC, various active organic carbon component, total nitrogen, available nitrogen and available phosphorus were relatively strong at different ages (except for 0—50 years). The correlation between TOC, various active organic carbon component, available kalium, exchangeable calcium, and exchangeable magnesium were relatively weak (except for over 500 years). The correlations of TOC, active organic carbon component, and soil nutrients over 500 years were extremely significant.

Key words: tree-age; *Torreya grandis*; soil total organic carbon; soil labile organic carbon

土壤有机碳作为一种稳定长效的碳源物质,几乎包含了植物生长所需的各种营养元素^[1],直接作用于植物的生长和繁殖,同时它在维持土壤物理结构方面也起到了重要作用,因此土壤有机碳能够直接影响森林生态系统的生产力与稳定性,成为评价土壤肥力的一个重要指标^[2-3]。

土壤有机碳来源于动植物残体的归还以及根系分泌物,其含量受群落的组成和分布、气候、土壤类型、人为干扰等多种因素的影响^[4-5],然而,群落的组成和分布、群落生物量均会随林龄的变化而产生巨大的变化,进而影响到森林生态系统的土壤碳库^[6-8]。土壤活性碳(易氧化碳和轻组有机质)虽然占土壤总有机碳的比例较小^[9-10],但是能够直接或间接地参与土壤养分循环和物质转化,因此可以有效地反映土壤碳库中各组分的转变情况^[11-12]。目前,许多学者对不同树种土壤有机碳含量随林龄变化的情况进行了探究,有研究者认为林地土壤有机碳含量随林分的成熟会相应增加^[13],也有学者表明林地土壤有机碳含量随林龄增加先减小而后增加^[14-15],由于结果存在差异,因此研究不同树种土壤有机碳含量随林龄的变化规律是十分必要的。

香榧(*Torreya grandis*)是中国的特有树种,具有较高的经济价值,可以为榧农带来很高的经济收益,于是林农为了提高香榧产量,加大了对香榧林的经营力度,但是在长期高强度经营提高香榧果实产量的同时,也逐渐出现了一些问题,如不合理经营导致林地保水、保肥能力下降;不合理施肥导致土壤理化性质破坏等^[16]。目前国内关于香榧土壤的研究多集中于香榧的繁殖栽培^[17]、林地养分状况调查^[18-19]、施肥对香榧生长及果实的影响^[20-21]等方面,而关于集约经营模式下不同树龄香榧土壤有机碳变化规律的相关研究尚不多见。因此本文选取集约经营模式下5个不同树龄段的香榧为研究对象,研究其土壤有机碳变化规律,旨在为香榧林的土壤质量评价与持续利用,科学管理提供参考资料,同时也可作为香榧古树的保护与利用提供基础数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省诸暨市赵家镇的香榧国家森林公园(E119°53′~120°32′, N29°21′~29°59′),该地区属于亚热带季风气候,四季分明,雨水丰沛,日照充足,年平均气温 16.3℃,年平均降水量约 1 373.6 mm,年平均日照时数约 1 887.6 h。研究区属于低山丘陵地貌,土壤类型为微酸性红壤。

通过农户访问和实地调查,选择立地条件和经营管理措施基本一致的不同树龄段的香榧树(样地的基本情况见表1)香榧树每年3月地表撒施化肥,9月地表撒施化肥和有机肥,每年单位面积化肥的总施肥量为 0.7 kg·m⁻²,单位面积有机肥的总施肥量为 7.5 kg·m⁻²,垦覆深度为 30 cm,所有香榧树均为单株分布,树下均无植被种植;按照 0~50、50~100、100~300、300~500、500 a 以上的树龄梯度选择样本树,每个树龄段的样本树重复 4~5 株,所有调查样株分布在半径为 500 m 的范围内,以保证样株立地条件大体一致,处于同一气候背景之下,具有可比性。

1.2 样品采集与分析方法

2017年9月野外测定所选香榧树的基径和树高,并记载树木的生长情况。采集土样,在离开样本树 50~100 cm 处随机选取 3~5 个点挖取土壤剖面,按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm,3 个层次采集土壤样品。将土壤放入袋中,去掉其中的可见植物根系、残体和碎石,带回实验室自然风干,之后过 2 mm、0.25 mm 和 0.15 mm 筛用于土壤总有机碳(TOC)、易氧化碳(ROC)、轻组有机质(LFOM)和土壤养分的测定。

土壤总有机碳测定用重铬酸钾外加热法^[22];易氧化碳测定用 333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法^[23];轻组有机质测定用 1.7 g·mL⁻¹碘化钠重液分离法^[24];土壤养分测定用常规方法^[25]:全氮(TN),凯氏定氮法;水解氮(AN),碱解扩散法;速效钾

(AK),乙酸浸提法;有效磷(AP),碳酸氢钠法;交换性钙(Ca)和交换性镁(Mg),原子吸收分光光度法。

1.3 数据统计分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 统计分析软件进行图表绘制和数据处理分析。对不同树龄香榧土壤之间总有机碳、易氧化碳和轻组有机质含量进行单因素方差分析(ANOVA)和显著性分析(LSD 检验),对土壤总有机碳、活性有机碳和土壤养分进行相关性分析(Pearson 检验)。

2 结果与分析

2.1 不同树龄香榧各土层土壤总有机碳含量变化

不同树龄香榧的土壤总有机碳呈明显变化(表 2),介于 3.92~28.61 g·kg⁻¹之间,随着香榧树龄的增加,各土层土壤总有机碳含量先增大后减小,即 300~500 a 的香榧土壤总有机碳含量达到最高,随后呈现出降低趋势。方差分析结果表明,0~50 a 与 50~100 a 生香榧土壤总有机碳之间差异不显著,

100~300 a 生香榧土壤总有机碳含量开始显著提高;500 a 以上的香榧土壤总有机碳含量在 40~60 cm 土层显著降低,在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层虽有降低趋势,但结果不显著。

2.2 不同树龄香榧土壤活性有机碳含量的变化

表 3 显示,不同树龄香榧土壤易氧化碳含量介于 0.58~6.48 g·kg⁻¹之间,各土层土壤易氧化碳含量随树龄的变化趋势相同,即均随树龄的增加呈现先增加后降低的趋势,其中,300~500 a 的香榧土壤易氧化碳含量达到最高。此变化趋势虽与土壤总有机碳变化趋势保持一致,但各树龄段香榧土壤易氧化碳含量在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层差异均不显著,仅 300~500 a 生香榧土壤在 40~60 cm 土层得到显著提高。

表 4 表明,不同树龄阶段香榧的同一土层土壤的轻组有机质含量均随树龄的增加呈现先增加后降低的趋势,在 300~500 a 达到峰值。但是相同土层不同树龄间土壤轻组有机质含量差异不大,分别为

表 1 不同树龄香榧样地基本信息

Table 1 Site conditions of *Torreya grandis* in five age groups

树龄 Tree age/a	平均基径 Base diameter/cm	平均树高 Height/m	坡向 Aspect	坡度 Slop/°	海拔 Altitude/m
0~50	31.4	6.0	东南 SE	8~15	570~700
50~100	39.8	6.0	东北 NE	9~18	560~620
100~300	71.5	9.2	东北 NE	13~21	540~600
300~500	97.4	15.0	东 E	12~20	540~560
>500	153.9	13.3	东北 NE	10~19	540~600

表 2 不同树龄香榧不同土层土壤总有机碳含量

Table 2 TOC of different soil layers for different aged *T. grandis*/(g·kg⁻¹)

土层 Soil layer/cm	树龄 Tree age/a				
	0~50	50~100	100~300	300~500	>500
0~20	17.57±3.51c	20.62±7.45bc	24.03±5.30ab	28.61±3.23a	27.28±3.83a
20~40	7.76±1.76b	8.44±3.60b	13.18±1.49ab	17.46±6.70a	16.73±7.59a
40~60	3.92±1.58c	4.41±3.21c	10.31±2.26b	14.72±6.66a	9.68±3.04b

注:数据为平均值±标准差;同行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 line indicate significant difference among different ages at 0.05 level; the same as below

表 3 不同树龄香榧土壤不同土层易氧化碳含量

Table 3 ROC of different soil layers for different aged *T. grandis*/(g·kg⁻¹)

土层 Soil layer/cm	树龄 Tree age/a				
	0~50	50~100	100~300	300~500	>500
0~20	4.29±1.61a	4.43±2.50a	5.64±2.86a	6.48±3.58a	6.42±1.45a
20~40	1.37±0.52b	1.57±0.83ab	2.32±1.10ab	2.73±0.78a	2.52±1.48ab
40~60	0.58±0.27b	0.62±0.37b	1.68±0.86ab	1.89±1.72a	1.26±0.61ab

表 4 不同树龄香榧不同土层土壤轻组有机质含量

Table 4 LFOM of different soil layers for different aged *T. grandis*/(g · kg⁻¹)

土层 Soil layer/cm	树龄 Tree age/a				
	0~50	50~100	100~300	300~500	>500
0~20	44.98±4.51b	53.40±11.80ab	57.04±26.74ab	64.54±13.44a	60.57±12.11ab
20~40	29.38±11.36a	30.58±10.29a	38.40±17.42a	39.83±16.04a	38.63±7.16a
40~60	28.25±5.42a	28.54±1.65a	30.56±7.54a	31.68±12.63a	29.33±13.85a

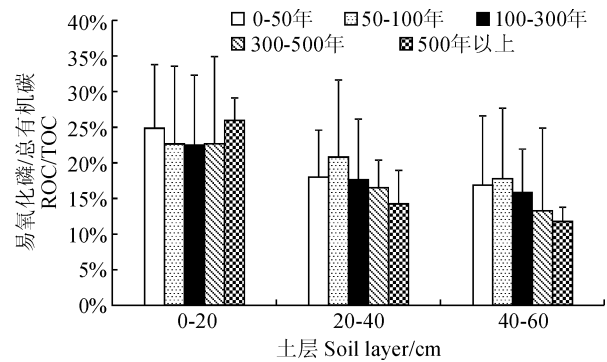


图 1 不同树龄香榧 0~60 cm 土层土壤易氧化碳
占总有机碳的比率

Fig.1 ROC/TOC of different soil layers for different
aged *T. grandis*

44.98~59.58 g · kg⁻¹, 29.38~46.17 g · kg⁻¹, 28.25~30.71 g · kg⁻¹, 仅在 0~20 cm 土层, 300~500 a 生香榧土壤轻组有机质含量提高较为显著, 其余各土层的不同树龄香榧之间的轻组有机质含量差异不显著。

2.3 土壤活性有机碳占土壤总有机碳的比率

香榧土壤易氧化碳占土壤总有机碳比例范围为 11.73%~25.93%, 在 0~20 cm 土层, 不同树龄香榧土壤易氧化碳占总有机碳的比例没有明显的规律; 在 20~40 cm 和 40~60 cm 两个土层变化规律相同, 均是 50~100 a 生香榧土壤易氧化碳占总有机碳的比例最大, 500 a 以上香榧土壤易氧化碳占总有机碳的比例最小; 同一土层不同树龄香榧的土壤易氧化碳含量占总有机碳比例差异不显著。各树龄段香榧土壤易氧化碳占总有机碳比例均随土层的加深而减小, 其中, 500 a 以上的香榧土壤易氧化碳所占比例减小幅度最大(图 1)。

2.4 土壤总有机碳与土壤活性有机碳的相关分析

5 种树龄香榧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 ($P<0.01$), 但是相关性在不同树龄香榧之间的变化规律并不明显(图 2)。

2.5 土壤有机碳与土壤养分的关系

从表 5 可见, 各树龄段香榧土壤总有机碳和活性有机碳与全氮之间的相关性均达到极显著水平

($P<0.01$); 除 0~50 a 外, 与水解性氮之间的相关性达到显著水平 ($P<0.05$) 或极显著水平 ($P<0.01$); 与速效钾之间的相关性只有 500 a 以上的香榧土壤达到极显著水平 ($P<0.01$); 除 100~300 a 的香榧土壤活性有机碳外, 其余各树龄段的土壤总有机碳和活性有机碳与有效磷之间的相关性都达到显著水平 ($P<0.05$) 或极显著水平 ($P<0.01$); 0~50 a、50~100 a 和 500 a 以上的香榧土壤总有机碳和活性有机碳与交换性钙和交换性镁之间达到显著相关 ($P<0.05$) 或极显著相关 ($P<0.01$)。

3 讨 论

3.1 树龄对土壤总有机碳的影响

森林土壤有机碳主要来自于地表植被凋落物和根系的归还^[26], 而凋落物量主要受到林分生物量、林龄和气候变化影响^[27]。此外, 大量研究结果表明林分生物量随林龄、胸径的增加而增加; 董点等^[28]研究发现紫椴(*Tilia amurensis*)各器官平均生物量随着胸径的增加而增加; 高杰等^[29]研究发现油松(*Pinus tabulaeformis*)林随林龄的增加, 乔木层各器官生物量呈上升趋势; 朱江等^[30]表明华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)的器官生物量与植物的胸径、树高、树龄和树冠长度呈指数关系; 陈东升等^[31]调查研究发现日本落叶松(*Larix kaempferi*)人工林随林龄的增加, 林分总生物量、碳储量和养分储量随林龄的增加呈增大趋势。本研究中, 各土层土壤总有机碳含量随着香榧树龄的增加呈现先逐渐增大然后有所减小的趋势。这是因为随着香榧树龄和胸径的增长, 地上生物量逐渐累积增多, 每年的凋落物数量也随之增加, 从而土壤有机碳得到逐步提高。另外, 植物根系的周转和分解也是增加土壤有机碳的重要途径^[32], 而植物的根系生物量与林龄也有着密切的关系; 刘波等^[33]研究发现细根生物量随林龄增长而有所增加; 匡冬姣等^[34]研究结果表明杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林 0~60 cm 土层内细根生物量随林龄增大先增加

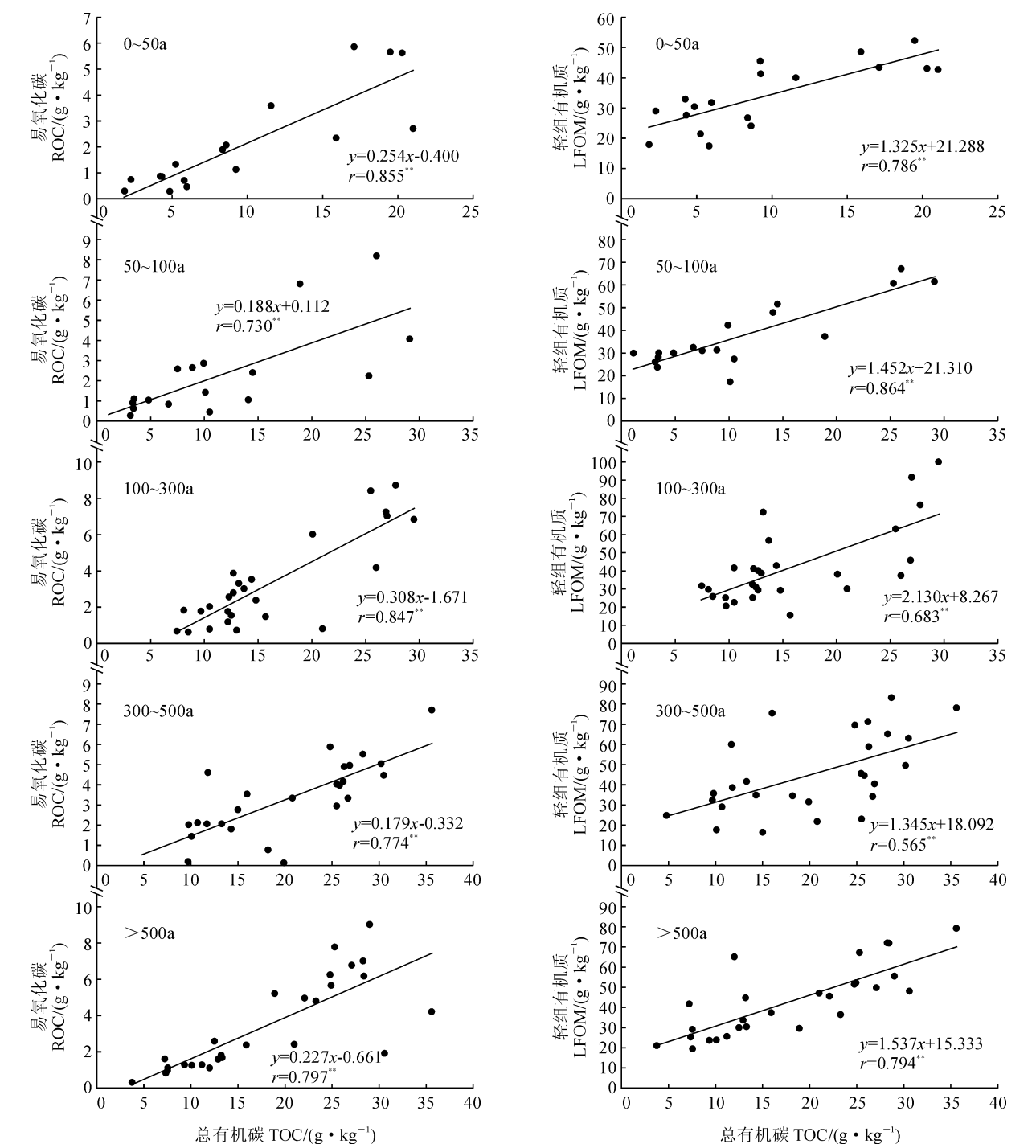


图 2 不同树龄香榧不同土层土壤活性有机碳与总有机碳的相关关系
Fig. 2 Relationships between soil labile organic carbons and TOC of different soil layers for different aged *T. grandis*

后减小;韩畅等^[35]发现杉木、马尾松(*Pinus massoniana*)随林龄的增加,各林龄阶段根系总生物量呈增加趋势。因此,随着香榧树龄的增长,其根系生物量也逐渐增加,从而土壤总有机碳也逐渐上升。但是,本文中当香榧树龄超过 500 a,土壤总有机碳稍有下降,这可能是因为 500 a 以上的香榧生长势下降,枝叶老化,枝干生物量较 300~500 a 的香榧稍

有减少而导致的。本研究结果与谢涛等^[36]对苏北沿海不同林龄杨树(*Populus*)林土壤活性有机碳的研究结果一致。

3.2 树龄对土壤活性有机碳的影响

一般认为,土壤活性有机碳不稳定、易氧化、移动性高,在一定环境条件下,可转变为动植物或微生物生命活动所需的有机碳。土壤易氧化碳是活性有

表 5 不同树龄香榧不同土层土壤有机碳与土壤养分的相关性

Table 5 Correlation between soil organic carbons and soil nutrients of different soil layers for different aged *T. grandis*

树龄 Tree age/a	土壤养分 Soil nutrient	总有机碳 TOC	易氧化碳 ROC	轻组有机质 LFOM
0~50	全氮 TN	0.989**	0.821**	0.812**
	速效氮 AN	0.250	0.220	0.060
	速效钾 AK	0.420	0.120	0.300
	速效磷 AP	0.812**	0.678**	0.588*
	交换性钙 Ca	0.679**	0.640**	0.390
	交换性镁 Mg	0.557*	0.210	0.280
50~100	全氮 TN	0.974**	0.697**	0.880**
	速效氮 AN	0.978**	0.730**	0.916**
	速效钾 AK	0.450	0.170	0.533*
	速效磷 AP	0.752**	0.534*	0.777**
	交换性钙 Ca	0.944**	0.820**	0.876**
	交换性镁 Mg	0.776**	0.567*	0.811**
100~300	全氮 TN	0.985**	0.814**	0.627**
	速效氮 AN	0.391*	0.251	0.146
	速效钾 AK	0.198	0.194	0.152
	速效磷 AP	0.573**	0.212	0.127
	交换性钙 Ca	0.296	0.091	0.177
	交换性镁 Mg	0.214	0.178	0.284
300~500	全氮 TN	0.913**	0.596**	0.619**
	速效氮 AN	0.902**	0.595**	0.675**
	速效钾 AK	0.063	0.426*	0.322
	速效磷 AP	0.587**	0.463*	0.473*
	交换性钙 Ca	0.338	0.261	0.328
	交换性镁 Mg	0.357	0.329	0.302
>500	全氮 TN	0.866**	0.885**	0.785**
	速效氮 AN	0.867**	0.863**	0.767**
	速效钾 AK	0.664**	0.801**	0.555**
	速效磷 AP	0.715**	0.784**	0.680**
	交换性钙 Ca	0.681**	0.749**	0.562**
	交换性镁 Mg	0.617**	0.829**	0.489**

注: ** $P<0.01$; * $P<0.05$
Note: ** $P<0.01$; * $P<0.05$

机碳的重要组成部分,其含量受到地表凋落物分解和土地管理方式的影响^[37-38];轻组有机质同样也是活性有机碳的重要组成部分,表层土壤轻组有机质主要来源于植被凋落物,深层土壤的轻组有机质主要来源于植物地下根系代谢残体、根系分泌物以及死亡微生物等^[39],其含量受到微生物分解、气候变化和土壤物理结构的影响^[40-41]。而凋落物的分解速率又受到气候条件、坡相位置、凋落物量等各种因素的影响^[42-43],林龄作为林分构成的重要指标,对凋落物分解也会产生重要影响^[44]。本研究中,土壤易氧化碳和轻组有机质含量均随香榧树龄的增加呈

现先增加后减小的趋势,但在各树龄无明显差异。由于 5 种树龄香榧所处环境和经营管理方式大致相同,因而树龄成为其活性有机碳分布格局的主要限制因素,随树龄的增加,香榧生物量、地上生物量和地下生物量不断增加,通过凋落物和根系分泌物归还到土壤的数量也逐渐增加;此外,又由于土壤活性有机碳组分在很大程度上取决于土壤总有机碳含量^[45-46],所以本文易氧化碳与轻组有机质的变化趋势与土壤总有机碳保持一致。

易氧化碳占总有机碳的比例越高,说明土壤有机碳的活性越大,养分循环越快,稳定性越差^[47]。

本研究中,不同树龄香榧土壤易氧化碳占总有机碳的比例在 0~20 cm 土层没有明显规律,20~40 cm 和 40~60 cm 土层易氧化碳所占比例表现为:50~100 a>0~50 a>100~300 a>300~500 a>500 a 以上。在 20~40 cm 和 40~60 cm 两个土层,50~100 a 生的香榧土壤易氧化碳占总有机碳比例最高,说明此树龄段香榧处于生长的旺盛时期,养分循环最快,有机碳稳定性较差,之后随着树龄的增加,易氧化碳所占比例逐渐减少,土壤碳库越来越稳定,说明随着香榧的逐渐成熟,土壤对有机碳的持留和贮存能力逐渐增强。

本研究中,5 种树龄香榧土壤易氧化碳和轻组有机质含量与总有机碳含量之间的相关性均达到极显著水平($P<0.01$),这说明土壤各活性有机碳虽然在形态和测定方法上有所差异,但分别从不同角度表征了土壤碳平衡状况,并且它们的变化受到土壤总有机碳含量的制约^[48-49]。

不同树龄香榧土壤有机碳与土壤养分之间的相关性分析表明:各树龄段香榧土壤总有机碳和各活性有机碳与全氮之间的相关性均达到极显著水平($P<0.01$);除 0~50 a 生香榧外,其余各树龄段香榧土壤总有机碳和各活性有机碳与水解性氮达到显著($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$),这主要是因

为氮元素含量与土壤有机碳含量密切相关,因而与土壤总有机碳有着密切相关关系的活性有机碳,也与土壤全氮和水解性氮具有一定的相关性^[50-51]。此外,龚伟等^[52]指出土壤有机碳的活性对土壤肥力具有一定的指示作用,因而各树龄段香榧土壤总有机碳、各活性有机碳与有效磷之间的相关性较好。除 500 a 以上的香榧外,其余各树龄段香榧的土壤总有机碳和各活性有机碳组分与速效钾、交换性钙、交换性镁之间的相关性均较差,可能是因为速效钾受土壤质地、地形的影响较大,并且钾离子移动性较强,在土壤中分布较为均匀^[53],而交换性钙、交换性镁与速效钾之间又存在密切的相关关系^[54]。500 a 以上香榧土壤总有机碳和各活性有机碳组分与土壤养分之间的相关性均达到了极显著水平($P<0.01$),这可能是因为越成熟的香榧抵抗土壤被侵蚀的能力越强,可有效阻止土壤表层养分的流失。

总之,随香榧树龄的增长,0~60 cm 各土层总有机碳、易氧化碳、轻组有机质含量先增加后减小,易氧化碳占总有机碳的比例逐渐降低。因此,在今后香榧的经营管理过程中,应注意加强对幼年及壮年时期香榧土壤的改良,通过合理施肥、翻耕等措施改善林地的水热、养分因子和土壤结构,增强土壤碳库的稳定性。

参考文献:

[1] 林葆,林继雄. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报, 1994, **1**(1): 6-18.
LIN B, LIN J X. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994, **1**(1): 6-18.

[2] 商素云,姜培坤,等. 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性[J]. 生态学报, 2013, **33**(2): 416-424.
SHANG S Y, JIANG P K, *et al.* Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(2): 416-424.

[3] 竹万宽,陈少雄,张利丽,等. 不同林龄尾巨桉林地土壤有机碳储量变化差异[J]. 桉树科技, 2015, (4): 5-9.
ZHU W K, CHEN S X, ZHANG L L, *et al.* Differences in SOC storage of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation across different ages[J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2015, (4): 5-9.

[4] NICHOLS J D. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the southern great plains[J]. *Journal-Soil Science Society of America (USA)*, 1984, **48**(6): 1 382-1 384.

[5] 张全军,于秀波,等. 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征[J]. 生态学报, 2012, **32**(12): 3 656-3 669.

ZHANG Q J, YU X B, *et al.* Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(12): 3 656-3 669.

[6] CGFDE K, AEMVAN M, YJO W, *et al.* Carbon and nitrogen in soil and vegetation at sites differing in successional age[J]. *Plant Ecology*, 2000, **149**(1): 43-50.

[7] FELDPAUSCH T R, RONDON M A, FERNANDES E C M, *et al.* Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central amazonia[J]. *Ecological Applications*, 2004, **14**(sp4): S164-S176.

[8] TANG J W, BOLSTAD P V, MARTIN J G. Soil carbon fluxes and stocks in a Great Lakes forest chronosequence[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(1): 145-155.

[9] HULATT C J, KAARTOKALLIO H, ASMALA E, *et al.* Bioavailability and radiocarbon age of fluvial dissolved organic matter (DOM) from a northern peatland-dominated catchment: effect of land-use change[J]. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(3): 393-404.

[10] BYRD K B, FLINT L E, ALVAREZ P, *et al.* Integrated climate and land use change scenarios for California rangeland ecosystem services: wildlife habitat, soil carbon, and water supply[J]. *Landscape Ecology*, 2015, **30**(4): 729-750.

[11] KARA O, BAYKARA M. Changes in soil microbial biomass

and aggregate stability under different land uses in the north-eastern Turkey[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2014, **186**(6): 3 801-3 808.

[12] LACOSTE M, VIAUD V, MICHOT D, *et al.* Landscape-scale modelling of erosion processes and soil carbon dynamics under land-use and climate change in agroecosystems[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, **66**(4): 780-791.

[13] 肖春波, 王海, 等. 崇明岛不同年龄水杉人工林生态系统碳储量的特点及估测[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2010, **28**(1): 30-34.

XIAO C B, WANG H, *et al.* Carbon storage of *Metasequoia glyptostroboides* plantation ecosystems at different age stages in Chongming Island, East China[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2010, **28**(1): 30-34.

[14] PAUL K I, POLGLASE P J, RICHARDS G P. Sensitivity analysis of predicted change in soil carbon following afforestation[J]. *Ecological Modelling*, 2003, **164**(2): 137-152.

[15] 王丹, 王兵, 戴伟, 等. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素[J]. 林业科学研究, 2009, **22**(5): 667-671.

WANG D, WANG B, DAI W, *et al.* The variation characteristics of soil organic carbon and its influence factor in different developing stages of Chinese fir plantations[J]. *Forest Research*, 2009, **22**(5): 667-671.

[16] 李麟杰. 不同立地与经营措施对香榧林地土壤肥力的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.

[17] 吴连海, 吴黎明, 倪荣新, 等. 香榧栽培经济效益分析[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(2): 299-303.

WU L H, WU L M, NI R X, *et al.* Economic benefits of *Torreya grandis* ‘Merrillii’ plantings[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2013, **30**(2): 299-303.

[18] 戴文圣, 黎章矩, 程晓建, 等. 香榧林地土壤养分状况的调查分析[J]. 浙江农林大学学报, 2006, **23**(2): 140-144.

DAI W S, LI Z J, CHENG X J, *et al.* Soil nutrients in *Torreya grandis* ‘Merrillii’ plantation[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2006, **23**(2): 140-144.

[19] 黄媛媛. 黎川县香榧栽培区土壤养分现状调查及限制因子研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.

[20] 黄其颖, 王飞高, 赵元军, 等. 硼锌铜钼配施对香榧生长和果实产量及品质的影响[J]. 经济林研究, 2015, (3): 33-38.

HUANG Q Y, WANG F G, ZHAO Y J, *et al.* Effects of boron, zinc, copper and molybdenum fertilizers on plant growth, nut yield and nut quality in *Torreya grandis* [J]. *Nonwood Forest Research*, 2015, (3): 33-38.

[21] 赵燕, 刘千玲, 陈田甜, 等. 施肥对香榧枝梢生长和结实量的影响[J]. 东北林业大学学报, 2015, (3): 26-29.

ZHAO Y, LIU Q L, CHEN T T, *et al.* Effects of fertilization on shoot growth and fruit yield of *Torreya grandis* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, (3): 26-29.

[22] LY/T 1237-1999. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 1999.

[23] 沈宏, 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.

SHEN H, XU Z H. Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37**(2): 166-173.

[24] JANZEN H H, CAMPBELL C 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.

[25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 147-197.

[26] 王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(4): 1 075-1 081.

WANG Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(4): 1 075-1 081.

[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): 5 122-5 129.

NINE X B, XIANG W H, WANG G J, *et al.* Litterfall production and dynamic for twenty years of a successive replanting *Cunninghamia lanceolata* plantation at Huitong, Hu’nan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(9): 5 122-5 129.

[28] 董点, 林天喜, 唐景毅, 等. 紫椴生物量分配格局及异速生长方程[J]. 北京林业大学学报, 2014, **36**(4): 54-63.

DONG D, LIN T X, TANG J Y, *et al.* Biomass allocation patterns and allometric models of *Tilia amurensis* [J]. *Journal of Beijing Forestry*, 2014, **36**(4): 54-63.

[29] 高杰, 郭子健, 刘艳红. 北京松山不同龄级天然油松林生物量分配格局及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(6): 1 475-1 480.

GAO J, GUO Z J, LIU Y H. Biomass allocation pattern and its influencing factors across natural Chinese pine forests of different ages in Songshan, Beijing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(6): 1 475-1 480.

[30] 朱江, 韩海荣, 康峰峰, 等. 山西太岳山华北落叶松生物量分配格局与异速生长模型[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(11): 2 918-2 925.

ZHU J, HAN H R, KANG F F, *et al.* Biomass allocation patterns and allometric models of *Larix principis-rupprechtii* in Mt. Taiyue, Shanxi [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(11): 2 918-2 925.

[31] 陈东升, 孙晓梅, 张守攻. 不同年龄日本落叶松人工林生物量、碳储量及养分特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(12): 3 759-3 768.

CHEN D S, SUN X M, ZHANG S G. Biomass, carbon storage and nutrient characteristics in *Larix kaempferi* plantations at different stand ages [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(12): 3 759-3 768.

[32] 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.

[33] 刘波, 余艳峰, 张赞齐, 等. 亚热带常绿阔叶林不同林龄细根生物量及其养分[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, **32**(5): 81-84.

LIU B, YU Y F, ZHANG Y Q, *et al.* Fine-root biomass and related nutrients in different aged stands of subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, **32**(5): 81-84.

[34] 匡冬姣, 雷丕锋. 不同林龄杉木人工林细根生物量及分布特

- 征[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, **35**(6): 70-74.
- KUANG D J, LEI P F. Fine root biomass and vertical distribution of Chinese fir plantations (*Cunninghamia lanceolata*) at different stand ages[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, **35**(6): 70-74.
- [35] 韩 畅, 宋 敏, 杜 虎, 等. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(7): 2 282-2 289.
- HAN C, SONG M, DU H, *et al.* Biomass and carbon storage in roots of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantations at different stand ages in Guangxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(7): 2 282-2 289.
- [36] 谢 涛, 王明慧, 郑阿宝, 等. 苏北沿海不同林龄杨树林土壤活性有机碳特征[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(1): 51-58.
- XIE T, WANG M H, ZHENG A B, *et al.* Characteristics of soil labile organic carbon in poplar plantations of different ages in coastal area of North Jiangsu[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(1): 51-58.
- [37] 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.
- [38] YANG X, REN W, SUN B, *et al.* Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. *Geoderma*, 2012, s177-178 (s177-178): 49-56.
- [39] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant & Soil*, 2002, **241**(2): 155-176.
- [40] ROSCOE R, BUURMAN P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, **70**(2): 107-119.
- [41] COOKSON W R, ABAYE D A, MARSCHNER P, *et al.* The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, **37**(9): 1 726-1 737.
- [42] 黄建辉, 陈灵芝, 韩兴园. 辽东柞枝条分解过程中几种主要营养元素的变化[J]. 植物生态学报, 1998, **22**(5): 398-402.
- HUANG J H, CHEN L Z, HAN X G. Changes of nutrient concentration during the decomposition process of oak twigs[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(5): 398-402.
- [43] PANDEY R R, SHARMA G, TRIPATHI S K, *et al.* Litterfall, litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical natural oak forest and managed plantation in north-eastern India[J]. *Forest Ecology & Management*, 2007, **240**(1): 96-104.
- [44] 侯玲玲, 孙 涛, 毛子军, 等. 小兴安岭不同林龄天然次生白桦林凋落物分解及养分变化[J]. 植物研究, 2012, **32**(4): 492-496.
- HOU L L, SUN T, MAO Z J, *et al.* Litter decomposition and nutrient dynamic of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages in Xiaoxing'an Mountains[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, **32**(4): 492-496.
- [45] ANDERSON T H, DOMSCH K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1989, **21**(4): 471-479.
- [46] 李 岩, 方 晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区 4 种森林土壤水溶性有机碳含量及其与土壤养分的关系[J]. 土壤通报, 2014, **45**(6): 1 483-1 490.
- LI Y, FANG X, XIANG W H, *et al.* Contents of soil dissolved organic carbon and its relationships with soil nutrients in four subtropical forests in central southern China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, **45**(6): 1 483-1 490.
- [47] XIA X, YAN Z, HONGHUA R, *et al.* Temperature sensitivity increases with soil organic carbon recalcitrance along an elevational gradient in the Wuyi Mountains, China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, **42**(10): 1 811-1 815.
- [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 & Biochemistry*, 2000, **32**(2): 211-219.
- [49] 程彩芳, 李正才, 周君刚, 等. 不同林龄木荷-青冈栎混交林幼林土壤活性有机碳库研究[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(9): 1 882-1 890.
- CHENG C F, LI Z C, ZHOU J G, *et al.* Analyse of soil labile organic carbon pools in mixed *Schima superba*-*Cyclobalanopsis glauca* young plantations at different stand ages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(9): 1 882-1 890.
- [50] 周 焱. 武夷山不同海拔土壤有机碳库及其矿化特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [51] 赵睿宇, 李正才, 王 斌, 等. 毛竹林地表稻草覆盖后翻耕对土壤有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(8): 2 118-2 126.
- ZHAO R Y, LI Z C, WANG B, *et al.* Effects of straw mulching and scarification on soil labile organic carbon pool in a *Phyllostachys edulis* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(8): 2 118-2 126.
- [52] 龚 伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化[J]. 生态学报, 2008, **28**(6): 2 536-2 545.
- GONG W, HU T X, WANG J Y, *et al.* Soil carbon pool and fertility under natural evergreen broad-leaved forest and its artificial regeneration forests in Southern Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(6): 2 536-2 545.
- [53] 李 龙, 姚云峰, 秦富仓. 黄花甸子流域土壤全氮、速效磷、速效钾的空间变异[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(2): 373-379.
- LI L, YAO Y F, QIN F C. Spatial variability of soil total nitrogen, available phosphorus and available potassium in Huanghuadianzi watershed[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(2): 373-379.
- [54] 傅海平, 常硕其, 刘红艳, 等. 茶园土壤交换性钙镁含量、分布特征及与速效钾的关系[J]. 中国茶叶, 2013, **35**(3): 14-16.
- FU H P, CHANG S Q, LIU H Y, *et al.* Contents and distribution characteristics of soil exchangeable calcium and its relationships with available kalium in tea garden[J]. *China Tea*, 2013, **35**(3): 14-16.

(编辑: 潘新社)