

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

刘荣杰¹ 吴亚丛¹ 张 英² 李正才^{1*} 马少杰¹ 王 斌¹ 格日乐图¹

¹中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; ²湖州市环境保护监测中心站, 浙江湖州 313000

摘 要 为了解北亚热带东部地区天然次生林转变成杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林对土壤活性有机碳库的影响, 以浙江省富阳市庙山坞森林生态系统定位研究站杉木人工林和天然次生林为研究对象, 对达到成熟林状态的两种林分类型0–60 cm内各土层土壤活性有机碳含量进行了比较研究。结果表明: 1)天然次生林土壤总有机碳、易氧化有机碳、水溶性有机碳和轻组有机质含量均高于杉木人工林, 与人工杉木林相比, 增幅分别为19.0%–32.6%、0.8%–30.3%、3.8%–54.1%和6.3%–38.6%, 且在0–10和10–20 cm土层差异显著($p < 0.05$) (水溶性有机碳仅在0–10 cm土层差异显著); 2)杉木人工林土壤水溶性有机碳与易氧化碳占总有机碳的比率均高于天然次生林; 3)两个林分土壤水溶性有机碳、易氧化碳和轻组有机质与总有机碳含量均呈现极显著相关, 且天然次生林土壤易氧化碳、轻组有机质与总有机碳的相关系数均大于杉木人工林; 4)土壤有机碳、水溶性有机碳、易氧化碳和轻组有机质与土壤养分(全氮、水解氮、速效磷、速效钾、速效钙和速效镁)的相关性均达到显著($p < 0.05$)或极显著($p < 0.01$)水平。

关键词 杉木林, 活性有机碳, 轻组有机质, 天然次生林

Comparison of soil labile organic carbon in Chinese fir plantations and natural secondary forests in north subtropical areas of China

LIU Rong-Jie¹, WU Ya-Cong¹, ZHANG Ying², LI Zheng-Cai^{1*}, MA Shao-Jie¹, WANG Bin¹, and GERI Le-Tu¹

¹Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang 311400, China; and ²Huzhou Environmental Protection Monitoring Center, Huzhou, Zhejiang 313000, China

Abstract

Aims Our objective was to assess the effects of land use type conversion on the soil labile organic carbon pool in north subtropical areas of China.

Methods We used reference land unit to collect soil samples in natural secondary forests and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations and analyzed labile organic carbon in the depth of 0–60 cm.

Important findings The contents of soil total organic carbon (TOC), easily-oxidized carbon (EOC), water-soluble organic carbon (WSOC) and light fraction organic matter (LFOM) in the soil of natural secondary forests were higher than those in Chinese fir plantations. The variations in amplitude for these four parameters were 19.0%–32.6%, 0.8%–30.3%, 3.8%–54.1% and 6.3%–38.6%, respectively. There were significant differences in the depth of 0–10 cm and 10–20 cm ($p < 0.05$) (WSOC was only significantly different in the depth of 0–10 cm). The ratios of WSOC and EOC to TOC content in Chinese fir plantations were higher than those in natural secondary forests. WSOC, EOC and LFOM were significantly related to TOC in the two forest stands, and the correlation coefficients of EOC and LFOM to TOC in natural secondary forests were higher than those in Chinese fir plantations. TOC, WSOC, EOC and LFOM were all significantly related to soil nutrients (total N, hydrolysis N and available K, Ca and Mg).

Key words *Cunninghamia lanceolata* plantation, labile organic carbon, light fraction organic matter, natural secondary forest

森林土壤有机碳库占全球土壤有机碳库的39%, 其贮量的微小变化都可能引起大气中CO₂浓

度的显著变化。土壤活性有机碳是指在一定条件下, 具有一定溶解性、不稳定、易氧化、易分解、易矿

化, 并且其形态和空间位置对植物和微生物来说, 活性比较高的那一部分土壤碳素(沈宏等, 1999)。虽然土壤活性有机碳占土壤有机碳含量的比例很小, 但它直接参与土壤生物的化学转换过程, 而且能够在土壤全碳变化之前反映人为管理措施和环境所引起的土壤的微小变化(Blair *et al.*, 1995; Whitbread *et al.*, 1998), 同时, 还是土壤养分循环的驱动力, 对土壤养分的有效化也起着十分重要的作用(Coleman *et al.*, 1983; Wander *et al.*, 1994)。因此, 研究土壤活性有机碳对土壤肥力保持、土壤碳库平衡具有重要意义。

一些学者对我国亚热带地区常绿阔叶林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林土壤活性有机碳库进行了研究(王清奎等, 2006; 赵鑫等, 2006; 张剑等, 2009), 并取得了一定的成果, 但关于我国北亚热带东部地区常绿阔叶林受到破坏后形成的天然次生林(以下简称次生林)与人工杉木林(以下简称杉木林)两个林分活性有机碳库的比较研究相对欠缺, 特别是关于作为表征土壤管理措施和环境的敏感指标的轻组有机质的研究相对较少。本文以我国北亚热带东部地区次生林和杉木林为研究对象, 通过对比和分析两种林分类型土壤活性有机碳的含量, 探讨北亚热带东部地区土地利用方式转变对土壤活性有机碳库的影响以及土壤活性有机碳与土壤养分的关系, 为评价该地区土地利用类型转换对土壤有机碳库的影响提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省富阳市庙山坞森林生态系统定位研究站(119°56′–120°02′ E, 30°03′–30°06′ N), 属北亚热带季风气候, 雨量充沛, 气候温和, 年平均气温16.2 °C, 年降水量1 464 mm, 无霜期237天,

土壤为石英、长石砂岩上发育的微酸性红壤。该地区历史上为森林地带, 顶极群落是北亚热带常绿-落叶阔叶林, 由于过去对木材、薪炭需求量的增加以及农业活动的发展, 该地区天然原始林大多已遭到破坏, 森林被砍伐转化为次生林、农业用地和人工林等, 现存次生林主要以壳斗科和樟科植物为主, 人工主要栽培杉木、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等。试验样地杉木林是通过皆伐次生林改造而来, 人工造林时间为1980年冬, 初植密度为2 m × 2 m。次生林封山育林时间为43年, 杉木林林分年龄为32年, 2种林分类型均已达到成熟林状态。样地基本情况见表1。

1.2 土壤采集及分析

2011年7月, 在研究区内确定杉木林样地5个, 每块样地面积为20 m × 20 m, 同时选取与之立地条件基本相似(表1)、有可比性的相邻次生林样地5个(杉木林和次生林样地坡向均为南坡, 坡度均为18°左右, 成土母质为石英、长石砂岩发育的微酸性红壤), 每个样地面积为20 m × 20 m。在每个样地上, 采用“S”形布设方法, 于样地内布设5个点。除去枯枝落叶层后, 用5 cm内径的土钻按0–10、10–20、20–30、30–40、40–50和50–60 cm 6个层次分层采集土壤样品。然后将每个样地内同1层次的土样进行混合, 按四分法取土带回实验室, 去杂、过2 mm筛后再分成两份, 一份自然风干用于总有机碳、易氧化碳和轻组有机质的测定, 另一份鲜样自封袋密封后放入4 °C下保存, 用于水溶性有机碳的测定。

土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾外加热法测定。水溶性有机碳(WSOC)测定参照Liang等(1997)方法, 称鲜土8 g, 水土比为5:1, 25 °C下用蒸馏水浸提30 min, 离心10 min (6 000 r·min⁻¹), 上清液用0.45 μm滤膜抽滤, 滤液用岛津TOC-Vcph有机碳分析仪(Shimadzu, Kyoto, Japan)直接测定。易氧化碳

表1 试验样地基本情况

Table 1 General conditions of experimental plots

土地利用类型 Land use type	主要植物 Main plant	平均树高 Average tree height (m)	平均胸径 Average DBH (cm)	立木密度 Stem density (株·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density	管理方式 Management mode	林龄 Stand age (a)
杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantation	杉木 <i>C. lanceolata</i>	16.0	16.2	1 560	0.9	抚育采伐 Tending felling	32
天然次生林 Natural secondary forest	壳斗科、樟科为主 Fagaceae, Lauraceae-based	15.5	13.4	510	0.8	封山育林 Enclose the hills for natural afforestation	43

DBH, diameter at breast height.

(EOC)采用 K_2MnO_4 氧化法分析(徐明岗等, 2006), 称过0.25 mm筛土壤8 g (含15–30 mg总有机碳), 加 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} K_2MnO_4$ 25 mL, 密封振荡1 h, 离心5 min ($4\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 取上清液用去离子水稀释250倍, 用分光光度计在波长565 nm处比色测定, 在 K_2MnO_4 浓度对吸光度值A的标准曲线上根据空白样与土壤样品的吸光度值之差, 根据 K_2MnO_4 浓度的变化计算土壤易氧化碳的含量。轻组有机质(LFOM)用 $1.7 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 碘化钠重液进行分离(Janzen *et al.*, 1992), 称过2 mm筛的风干土8 g放入50 mL的塑料离心管中, 加入 $1.7 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的碘化钠重液40 mL, 振荡1 h, 离心10 min ($1\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 上清液用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜抽滤, 滤纸上的轻组有机质用 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液和蒸馏水清洗。转移到已称重的玻璃杯中, 重复上述过程3次, 数次得到的轻组有机质合在一起, 在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干, 称重, 称得的重量与空烧杯重量之差, 便是轻组有机质的质量。

土壤养分采用常规方法测定。土壤全氮用凯氏定氮法测定; 土壤水解氮用碱解扩散法测定; 土壤速效磷用 $\text{HCl-NH}_4\text{F}$ 浸提, 酸溶-钼锑抗比色法测定; 土壤速效K、Ca、Mg用乙酸铵浸提, 原子吸收光谱法(M6, Thermo, Pittsburgh, USA)测定。

1.3 统计分析方法

应用Excel和SPSS 16.0软件对实验数据进行分析, 采用 t 检验两样本均数比较的方法分析天然次生林和杉木人工林同一土壤层次土壤活性有机碳的差异显著性, 土壤活性有机碳各组分与土壤有机碳含量及土壤养分的相关性分析采用双尾检验。

2 结果和分析

2.1 不同林分土壤活性有机碳含量的比较

表2表明, 在0–60 cm的土壤各层中, 次生林土壤总有机碳含量均高于杉木林, 变化幅度介于19.0%–32.5%之间, 其中0–10和10–20 cm土层次生林有机碳含量分别比杉木林高出23.4%和33.1%, 且差异达到显著水平($p < 0.05$)。这是因为土壤有机碳含量主要取决于植被的归还量和分解速率, 常绿阔叶林由于凋落物数量和根系分泌物多, 生物归还量大, 且容易分解转换, 常使土壤有机碳含量较高(李昌华, 1981), 这说明次生林积累了更多的有机质。

水溶性有机碳一般只占土壤总有机碳的极少部分, 但它却是土壤微生物可以直接利用的有机碳

源(Boyer & Groffman, 1996)。从表2可以看出, 次生林水溶性有机碳含量均高于杉木林, 变化幅度介于0.8%–30.3%之间, 且在0–10 cm土层差异达到显著水平, 这中和地上森林植被的生物归还能力有较大关系(该生态定位研究站近3年研究数据表明, 次生林年凋落物数量为 $3.20 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$, 杉木林为 $3.05 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$, 差异不显著; 样地调查时, 次生林林地表现存凋落物数量为 $5.59 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 远高于杉木林分地表凋落物数量 $3.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 差异显著)。

土壤易氧化碳是土壤养分的潜在来源, 也是土壤微生物活动的重要能源, 是有机碳中稳定性相对较差的碳。从表2可以看出, 次生林易氧化碳含量在各个土壤层均高于杉木林, 变化幅度介于3.4%–54.1%之间, 并且在0–10 cm土层, 次生林易氧化碳含量比杉木林高17.1%, 差异显著($p < 0.05$)。

土壤轻组有机质主要是由不同分解程度的植物残体和一些微生物结构体组成(谢锦升等, 2008), 它的改变可以用来指示土壤肥力的变化。土壤轻组有机质具有较高潜在的生物活性, 是土壤中不稳定碳库的重要组成(Gregorich *et al.*, 1994), 一般聚集在土壤表层, 随着土层深度的增加含量下降。从表2可以看出, 次生林土壤轻组有机质的含量高于杉木林, 变化幅度介于6.3%–38.6%之间, 并且在0–10和10–20 cm土层中差异达到显著水平, 这主要是由于杉木林凋落物、林下灌木和草本根系及其分泌物比次生林少, 产生的轻组有机质的量相对低。(样地调查时, 次生林林下灌木和草本的生物量为 $7.40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 杉木林仅为 $1.38 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 差异显著。灌木和草本植物细根系数量多, 而且周转快, 特别是草本植物以一年生植物居多, 地上部分和根系周转更快。因此, 次生林林下灌木和草本根系及其分泌物数量高于杉木林, 从而弥补了乔木树种根系分泌物的不足)

2.2 土壤活性有机碳占总有机碳的比率

土壤活性碳占总有机碳的比率比活性碳总量更能反映森林土地利用类型对土壤碳行为的影响。表3显示, 除0–10 cm土层外, 水溶性有机碳占总有机碳的比率杉木林均高于次生林, 这可能是由于杉木林土壤中含有较多的富里酸和酚类物质(刘长怀和罗汝英, 1990), 而这些物质的积累和富集对于微生物的活动不利(Boyer & Groffman, 1996), 这与杉木连栽土土壤盐基饱和度下降、酚度增加的事实相

表2 不同林分土壤活性碳含量的比较(平均值±标准偏差)

Table 2 Comparison of soil liable organic carbon content under different stands (mean ± SD)

土层 Soil layer (cm)	土层总有机碳 TOC (g·kg ⁻¹)		水溶性有机碳 WSOC (mg·kg ⁻¹)		易氧化碳 EOC (g·kg ⁻¹)		轻组有机质 LFOM (g·kg ⁻¹)	
	天然次生林 SF	杉木人工林 CF	天然次生林 SF	杉木人工林 CF	天然次生林 SF	杉木人工林 CF	天然次生林 SF	杉木人工林 CF
0–10	38.65 ± 5.32 ^A	31.32 ± 2.57 ^B	73.99 ± 12.98 ^A	56.77 ± 8.82 ^B	15.58 ± 3.15 ^A	13.30 ± 1.20 ^B	27.84 ± 6.71 ^A	24.13 ± 6.28 ^B
10–20	30.37 ± 4.49 ^A	22.92 ± 1.43 ^B	61.07 ± 12.21	53.25 ± 10.35	12.21 ± 2.84 ^A	7.92 ± 1.26 ^B	20.66 ± 6.68 ^A	14.91 ± 2.43 ^B
20–30	23.12 ± 3.58	18.74 ± 1.82	51.99 ± 10.07	51.59 ± 9.14	7.14 ± 0.49	6.88 ± 0.66	14.82 ± 5.02	11.54 ± 1.87
30–40	18.94 ± 2.51	15.92 ± 1.83	52.70 ± 10.75	51.06 ± 6.00	5.68 ± 0.74	5.06 ± 0.92	11.14 ± 4.06	8.33 ± 1.45
40–50	18.58 ± 1.80	14.58 ± 2.19	53.44 ± 15.41	49.95 ± 6.78	4.33 ± 0.68	4.19 ± 0.84	8.64 ± 1.98	7.94 ± 2.26
50–60	16.67 ± 1.34	12.60 ± 2.41	51.93 ± 8.19	48.57 ± 4.44	3.85 ± 0.76 ^A	3.46 ± 0.47 ^B	7.61 ± 2.15	7.16 ± 2.65

同行中不同大写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

CF, *Cunninghamia lanceolata* plantation; EOC, easily-oxidized carbon; LFOM, light fraction organic matter; SF, natural secondary forest; TOC, soil total organic carbon; WSOC, water-soluble organic carbon. Different capital letters in the same row indicate significant difference ($p < 0.05$).

表3 不同活性碳占土壤总有机碳的比率

Table 3 The percentages of different liable carbon to TOC

土层 Soil layer (cm)	水溶性有机碳占总有机碳的比率 WSOC/TOC (%)		易氧化碳占总有机碳的比率 EOC/TOC (%)	
	天然次生林 SF	杉木人工林 CF	天然次生林 SF	杉木人工林 CF
0–10	0.19	0.18	40.31	42.48
10–20	0.20	0.23	40.19	34.56
20–30	0.23	0.28	30.90	36.72
30–40	0.28	0.32	30.00	31.81
40–50	0.29	0.34	23.32	28.74
50–60	0.31	0.39	23.09	27.45

CF, *Cunninghamia lanceolata* plantation; EOC, easily-oxidized carbon; SF, natural secondary forest; TOC, soil total organic carbon; WSOC, water-soluble organic carbon.

吻合。易氧化碳占总有机碳的比率越高,说明养分循环越快,越不利于土壤有机质的积累(朱志建等, 2006)。表3显示,除10–20 cm土层外,杉木林易氧化碳与总有机碳的比率均高于次生林,说明人为干扰(主要是杉木林的抚育、采伐)使其稳定性下降。

2.3 土壤活性有机碳与总有机碳的相关性

土壤活性碳来源于土壤总有机碳,但容易受生物体分解和利用的影响。对0–60 cm土层各层次土壤总有机碳量与各活性有机碳之间的相关性进行了分析,如图1所示,次生林中土壤易氧化碳和轻组有机质含量与总有机碳含量的相关系数均大于杉木林,水溶性有机碳则相反。两个林分水溶性有机碳、易氧化碳和轻组有机质含量与总有机碳含量相关性达到极显著水平($p < 0.01$),这一方面说明土壤活性有机碳依赖于土壤总有机碳含量,另一方面也说明各土壤活性有机碳虽然表述和测定方法不同,但各自从不同角度表征了土壤中活性较高部分的碳含量(Anderson & Domsch, 1989)。

2.4 土壤有机碳与土壤养分的关系

由表4可以看出,土壤总有机碳、易氧化碳、水溶性有机碳和轻组有机质与土壤养分之间的相关性均达到显著或极显著水平,表明土壤养分的供应状况在很大程度上取决于土壤有机碳的含量,这主要是因为土壤有机质主要来源于植物残体的分解,植物残体内除了C元素外,还包含N、P、K、Ca和Mg等其他养分元素,残体分解输入土壤的有机碳越多,释放的其他养分元素也越多。土壤有机碳与土壤养分相关性分析发现,土壤有机碳与速效磷的相关系数最小,这与速效磷含量在土壤中变化较为复杂有关(徐秋芳, 2003)。

3 结论和讨论

本文以北亚热带东部次生林和杉木林为研究对象,通过比较两个林分活性有机碳库的差异进而分析土地利用类型转换对土壤活性有机碳库的影响。

研究表明,在0–10和10–20 cm土层,次生林土

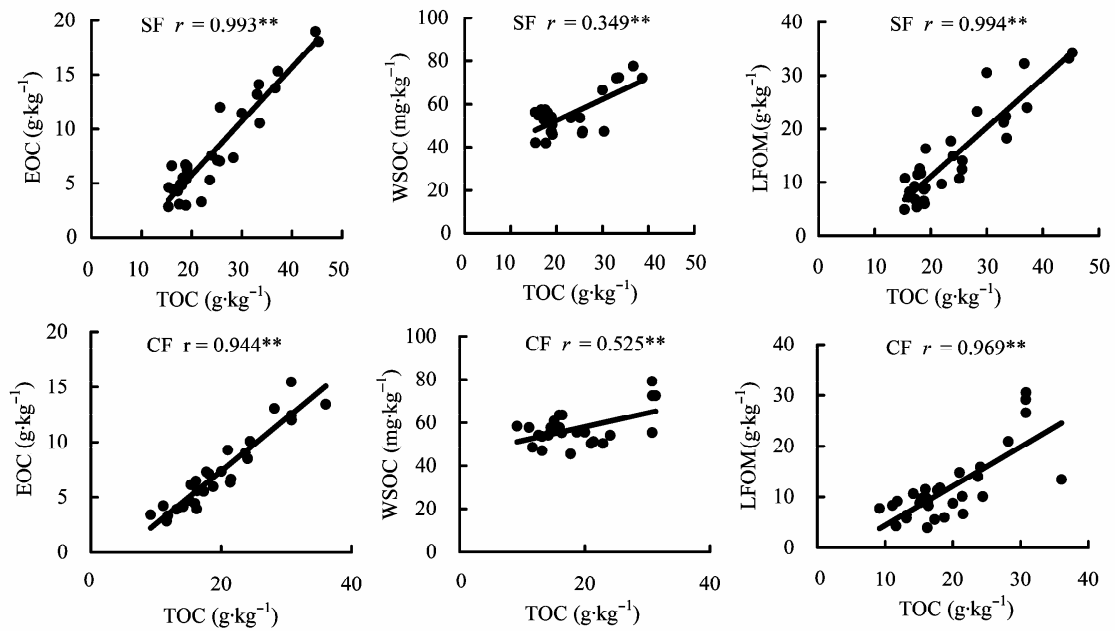


图1 天然次生林及杉木人工林地土壤总有机碳与活性有机碳的相关关系。EOC, 易氧化碳; LFOM, 轻组有机质; TOC, 土壤总有机碳; WSOC, 水溶性有机碳。CF, 杉木林; SF, 次生林。**, $p < 0.01$ 。

Fig. 1 Relationships between liable organic carbon and TOC in natural secondary forests and Chinese fir plantations. EOC, easily-oxidized carbon; LFOM, light fraction organic matter; TOC, soil total organic carbon; WSOC, water-soluble organic carbon. CF, *Cunninghamia lanceolata* plantation; SF, natural secondary forest. **, $p < 0.01$.

表4 土壤有机碳与土壤养分的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil organic carbon and nutrients

土壤养分 Soil nutrient	土壤总有机碳 TOC	易氧化碳 EOC	水溶性有机碳 WSOC	轻组有机质 LFOM
全氮 Total N	0.849**	0.834**	0.510**	0.696**
水解氮 Hydrolysis N	0.854**	0.851**	0.531**	0.680**
速效磷 Available P	0.645**	0.562**	0.380*	0.688**
速效钾 Available K	0.884**	0.835**	0.601**	0.765**
速效钙 Available Ca	0.659**	0.668**	0.582**	0.481**
速效镁 Available Mg	0.793**	0.827**	0.567**	0.669**

EOC, easily-oxidized carbon; LFOM, light fraction organic matter; TOC, soil total organic carbon; WSOC, water-soluble organic carbon. **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.

壤总有机碳、易氧化碳和轻组有机质的含量显著高于杉木林, 这与徐秋芳等(2005)的研究结果一致, 常绿阔叶林由于凋落物数量和林下灌木和草本根系分泌物多, 生物归还量大, 且容易分解转换, 常使土壤有机碳含量较高。另外, 对杉木人工林采取的抚育管理措施(枯木清理、凋落物清理等)也是造成杉木林土壤碳库含量相对较低的原因(闫恩荣等, 2007), 说明次生林积累了更多的有机物质。而两种林分的水溶性有机碳含量差异不显著(0-10 cm土层除外), 这是因为水溶性有机碳含量一方面取决于土壤总有机碳含量, 另一方面与土壤黏粒的吸附作

用有很大关系。与本研究不同的是, Smolander和Kitunen (2002)研究发现, 阔叶林下土壤水溶性有机碳含量明显高于针叶林土壤, David和Driscoll (1984)等的研究结论正好相反, 造成这种差异的原因与不同地区植被类型的复杂性以及地上森林植被的归还能力有很大关系。

杉木林水溶性有机碳占总有机碳的比率高于次生林(0-10 cm土层除外), 这是因为杉木林土壤腐殖质富含啡酸多, 酸性大, 易分散。徐秋芳和姜培坤(2004)研究认为, 杉木林水溶性有机碳占总有机碳的比率较高, 这是因为杉木林土壤中含有较多的

富里酸和酚类物质,而这些物质的富集对于微生物的活动不利,因此,作为微生物活动的重要碳源和水溶性有机质消耗得较少,从而水溶性有机碳占总有机碳的比率较高。易氧化碳作为指示土壤有机质早期变化的指标,是有机碳中稳定性相对较差的碳。姜培坤(2005)研究发现常绿阔叶林易氧化碳占总有机碳的比率高于杉木林,与Xu和Xu (2003)等的研究结论不一致。本研究中,除10–20 cm土层外,杉木林易氧化碳含量与总有机碳的比率均大于次生林中二者的比率,易氧化碳占总有机碳的比率越高,越不利于土壤有机质的积累,这就意味着杉木林土壤有机质积累不佳。

次生林土壤易氧化碳和轻组有机质与总有机碳的相关系数均高于杉木林,无论是次生林还是杉木林,土壤易氧化碳和轻组有机质的含量与土壤总有机碳的含量均呈极显著相关关系。耿玉清等(2009)对北京地区针叶林与阔叶林土壤有机碳库研究认为,易氧化碳、颗粒有机碳含量与总有机碳含量的相关性达到极显著水平,说明土壤总有机碳的变化制约着活性有机碳的变化;本研究发现,两种林分类型森林水溶性有机碳含量与总有机碳含量相关性均达到显著水平,但相关系数小于其他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系数相对较低,一方面是因为水溶性有机碳含量取决于总有机碳的含量,另一方面与土壤黏粒的吸附作用以及水溶性有机碳随渗透水的迁移有很大关系(Burford & Bremner, 1975),还有可能是因为夏季有机质分解强烈,微生物活动旺盛,土壤水溶性有机质处于不断产生和消耗的动态平衡,导致水溶性有机碳与土壤总有机碳相关性较差。

两种林分的总有机碳、易氧化碳、轻组有机质与土壤养分含量的相关性均达到极显著或显著水平,次生林土壤有机碳与土壤全氮、速效钾含量的相关性均高于杉木林,与其他土壤养分的相关性,两种林分之间没有特殊规律。土壤有机碳与土壤养分元素的相关性中,有机碳与速效磷的相关性最小,这是因为速效磷含量在土壤中变化较为复杂。在与其他土壤养分的相关性中,轻组有机质与全氮的相关性最高,与Sierra (1996)的研究结论一致:土壤中氮的矿化量与轻组有机质的分解速率密切相关。

微生物量碳作为土壤活性有机碳的表征指标,也可以反映出土壤能量循环、养分的转移和运输状况,但就微生物本身来说,微生物量碳比微生物量C、P、S等受环境影响更灵敏,因而它也很不稳定,目前还未发现一种简单、快速、准确、适应性广的方法(王晶等, 2003),因此本研究中并未将其作为一个分析因子进行研究。

致谢 中国林业科学研究院亚热带林业研究所基本科研业务费重点资助项目(RISF6152)、浙江省重点科技创新团队资助项目(2010R50030)和浙江省自然科学基金项目(Y12C030045)资助。

参考文献

- Anderson TH, Domsch KH (1989). Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 21, 471–479.
- Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle 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.
- Boyer JN, Groffman PM (1996). Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles. *Soil Biology & Biochemistry*, 28, 783–790.
- Burford JR, Bremner JM (1975). Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 7, 389–394.
- Coleman DC, Reid CPP, Cole CV (1983). Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Advances in Ecological Research*, 13, 1–55.
- David MB, Driscoll CT (1984). Aluminum speciation and equilibria in soil solutions of a haplorthod in the Adirondack Mountains (New York, U.S.A.). *Geoderma*, 33, 297–318.
- Geng YQ (耿玉清), Yu XX (余新晓), Yue YJ (岳永杰), Li JM (李金海), Zhang GZ (张国桢), Liu S (刘松) (2009). Soil active organic carbon pool of coniferous and broadleaved forests in the mountainous area of Beijing. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 31(5), 19–24. (in Chinese with English abstract)
- Gregorich EG, Monreal CM, Carter MR, Angers DA, Ellert BH (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 74, 367–385.
- Janzen HH, Brandt CA, Lafond SA, Townley-Smith GP (1992). Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1799–1806.
- Jiang PK (姜培坤) (2005). Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科

- 学), 41(1), 10–13. (in Chinese with English abstract)
- Li CH (李昌华) (1981). A preliminary study on the nutrient balance of soil under Chinese fir plantation and broad-leaved mixed forest. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 18, 255–261. (in Chinese with English abstract)
- Liang BC, Mackenzie AF, Schnitzer M, Monreal CM, Voroney PR, Beyaert RP (1997). Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, 26, 88–94.
- Liu CH (刘长怀), Luo RY (罗汝英) (1990). Chemical characteristics of humus in forest soils of Nanjing-Zhenjiang hills. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)* (南京林业大学学报(自然科学版)), 14(1), 1–6. (in Chinese with English abstract)
- Shen H (沈宏), Cao ZH (曹志洪), Hu ZY (胡正义) (1999). Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 18, 32–38. (in Chinese with English abstract)
- Sierra J (1996). Nitrogen mineralisation and its error of estimation under field conditions related to the light-fraction soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 34, 755–767.
- Smolander A, Kitunen V (2002). Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 651–660.
- Wander MM, Traina SJ, Stinner BR, Peters SE (1994). Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1130–1139.
- Wang J (王晶), Xie HT (解宏图), Zhu P (朱平), Li XY (李晓云) (2003). Connotation and modern analysis method for active soil organic matter (carbon). *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 22, 109–112. (in Chinese with English abstract)
- Wang QK (王清奎), Wang SL (汪思龙), Feng ZW (冯宗炜) (2006). Comparison of active soil organic carbon pool between Chinese fir plantations and evergreen broad-leaved forest. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 28(5), 1–6. (in Chinese with English abstract)
- Whitbread AM, Lefroy RDB, Blair GJ (1998). A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 36, 669–682.
- Xie JS (谢锦升), Yang YS (杨玉盛), Yang ZJ (杨智杰), Huang SD (黄石德), Chen GS (陈光水) (2008). Seasonal variation of light fraction organic matter in degraded red soil after vegetation restoration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 19, 557–563. (in Chinese with English abstract)
- Xu MG (徐明岗), Yu R (于荣), Wang BR (王伯仁) (2006). Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 43, 723–729. (in Chinese with English abstract)
- Xu QF (徐秋芳) (2003). *Study on Labile Organic Carbon Pool in Forest Soils* (森林土壤活性有机碳库的研究). PhD dissertation, Zhejiang University, Hangzhou. 39–40. (in Chinese)
- Xu QF (徐秋芳), Jiang PK (姜培坤) (2004). Study on active organic carbon of soils under different types of vegetation. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 18(6), 84–87. (in Chinese with English abstract)
- Xu QF (徐秋芳), Jiang PK (姜培坤), Shen Q (沈泉) (2005). Comparison of organic carbon pool of soil in bush and broad-leaved forests. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 27(2), 18–22. (in Chinese with English abstract)
- Xu QF, Xu JM (2003). Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest. *Pedosphere*, 13, 271–278.
- Yan ER (闫恩荣), Wang XF (王希华), Chen XY (陈小勇) (2007). Impacts of evergreen broad-leaved forest, degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 27, 1646–1655. (in Chinese with English abstract)
- Zhang J (张剑), Wang SL (汪思龙), Wang QK (王清奎), Liu YX (刘燕新) (2009). Content and seasonal change in soil labile organic carbon under different forest covers. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 17, 41–47. (in Chinese with English abstract)
- Zhao X (赵鑫), Yu WT (宇万太), Li JD (李建东), Jiang ZS (姜子绍) (2006). Research advances in soil organic carbon and its fractions under different management pattern. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 17, 2203–2209. (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZJ (朱志建), Jiang PK (姜培坤), Xu QF (徐秋芳) (2006). Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation. *Forest Research* (林业科学研究), 19, 523–526. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 周国逸 责任编辑: 李 敏