

天然灌木林改造成板栗林对土壤碳库和氮库的影响*

商素云^{1,2} 李永夫^{1,2**} 姜培坤^{1,2} 周国模^{1,2} 刘娟^{1,2} 吴家森^{1,2} 林琳^{1,2}

(¹浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江临安 311300; ²浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300)

摘要 在浙江省安吉县采集了相邻的天然灌木林和板栗林土壤, 分析土壤水溶性碳(WSOC)、微生物生物量碳(MBC)、易氧化碳(ROC)、水溶性有机氮(WSON)和微生物生物量氮(MBN), 并利用核磁共振方法分析土壤总有机碳的波谱特征, 研究天然灌木林改造成板栗林对土壤碳库和氮库的影响。结果表明: 天然灌木林改造成板栗林后, 土壤中的碱解氮、有效磷和速效钾显著增加, 而WSOC、MBC、ROC、WSON和MBN显著下降。天然灌木林和板栗林土壤有机碳以烷基碳和烷氧碳为主。天然灌木林改造成板栗林后, 土壤有机碳中的烷氧碳和羰基碳比例显著下降, 而烷基碳和芳香碳比例以及A/O-A值和芳香度均显著增加。天然灌木林改造成板栗林并长期集约经营后, 土壤活性碳库和氮库含量均显著下降, 而土壤碳库的稳定性显著增加。

关键词 灌木林 板栗林 碳库 氮库 核磁共振

文章编号 1001-9332(2012)03-0659-07 **中图分类号** S714 **文献标识码** A

Effects of the conversion from native shrub forest to Chinese chestnut plantation on soil carbon and nitrogen pools. SHANG Su-yun^{1,2}, LI Yong-fu^{1,2}, JIANG Pei-kun^{1,2}, ZHOU Guo-mo^{1,2}, LIU Juan^{1,2}, WU Jia-sen^{1,2}, LIN Lin^{1,2} (¹*Nurturing Station for State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China*; ²*Zhejiang Province Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, 23(3): 659-665.

Abstract: To investigate the effects of the conversion from native shrub forest (NF) to Chinese chestnut plantation (CP) on the soil carbon (C) and nitrogen (N) pools, soil samples were collected from the adjacent NF and CP in Anji County of Zhejiang Province, with their water-soluble organic C (WSOC), microbial biomass C (MBC), readily oxidizable C (ROC), water-soluble organic N (WSON), and microbial biomass N (MBN) determined. The spectral characteristics of soil organic C were also determined by using nuclear magnetic resonance (NMR) technique. After the conversion from NF to CP, the soil alkalyzable N, available phosphorus, and available potassium contents increased significantly, while the soil WSOC, MBC, ROC, WSON, and MBN were in adverse. The soil organic C in both NF and CP was dominated by alkyl C and O-alkyl C, but the proportions of O-alkyl C and carbonyl C in soil organic C decreased while the proportions of alkyl C and aromatic C as well as the alkyl C / O-alkyl C ratio and the aromaticity of soil organic C all increased significantly after the conversion from NF to CP, indicating that this conversion increased the stability of soil organic C pool significantly. In conclusion, the conversion from NF to CP and the intensive management of CP decreased the contents of soil labile C and soil N but increased the stability of soil C pool significantly.

Key words: shrub forest; Chinese chestnut forest; carbon pool; nitrogen pool; NMR.

* 国家自然科学基金项目(31170567)、浙江省科技厅重点项目(2011C12019)、浙江农林大学人才启动基金项目(2351000731)和浙江农林大学青年教师创新团队项目(2009RC04)资助。

** 通讯作者. E-mail: yongfuli@zafu.edu.cn

2011-08-16 收稿, 2011-12-28 接受。

土壤是陆地生态系统最大的碳库^[1]. 由于土壤碳的库容巨大, 其较小的变幅就会导致大气 CO_2 浓度较大的波动, 因此在全球碳循环中起着极其重要的作用. 土地利用方式的变化是影响土壤碳过程的重要因素之一^[2-3]. 研究表明, 土地利用变化显著影响土壤碳贮量^[3-5]. 土壤碳库中包含着各种不同形态的碳. 由于它们在化学组成、降解难易程度以及转化速率等方面的差异, 对人类干扰活动的响应往往存在较大的差异^[6-8]. 因此, 深入研究土地利用变化对不同形态碳的影响比单纯研究其对土壤碳贮量的变化具有更重要的理论意义和实践价值.

土壤水溶性有机碳 (WSOC) 和水溶性有机氮 (WSON) 是指能溶解于水, 并能通过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤孔的一系列含碳、氮的有机化合物. 尽管它们在土壤碳库和氮库中占很小一部分, 但由于它们极易被土壤微生物分解, 可以在土壤中迅速转化成其他碳氮组分^[9], 因此被认为是陆地生态系统中最活跃的碳氮组分. 近几年来, 越来越多的学者利用 WSOC 和 WSON 的变化来表征土壤碳库和氮库的变化^[7,10]. 由于土壤微生物直接或间接的参与了养分循环、有机质分解等诸多生态过程, 是土壤中物质转化和养分循环的驱动力, 微生物生物量碳 (MBC) 和微生物生物量氮 (MBN) 的变化也被认为是表征土壤活性碳库和氮库变化的指标之一^[7,10]. 此外, 土壤有机碳库的质量也受到了学者们的关注^[11-12]. 近年来, 随着核磁共振技术被广泛应用于土壤有机碳库质量的研究中, 该方法在研究土壤碳库的化学组成结构方面具有非常大的优势^[13].

板栗 (*Castanea mollissima*) 是我国主要的经济树种之一, 在我国 26 个省区均有分布. 目前我国板栗种植面积达 $125 \text{ 万 } \text{hm}^2$, 占世界板栗种植面积的 38%^[14]. 由于种植板栗可以带来较高的经济收益, 一些地区的营林者将一部分天然灌木林和常绿阔叶林改造成板栗林地. 同时, 为了追求高产、高效, 板栗林的栽培集约化程度也越来越高. 其集约经营措施主要包括: 施肥、过度翻耕、去除林下杂草和凋落物等, 导致板栗林土壤水土流失增加^[15], 土壤微生物量严重下降等. 土壤碳库和氮库是土壤肥力的重要影响因素. 天然灌木林转化成板栗林后, 板栗林栽培以及长期的集约经营措施对土壤碳库和氮库的影响如何? 本研究采集了相邻的天然灌木林和板栗林土壤, 测定了土壤的不同形态碳含量 (WSOC、MBC、ROC) 和态氮含量 (WSON、MBN), 并利用核磁共振技术分析了土壤的有机碳化学结构特征, 为深

入研究土地利用变化对陆地生态系统碳过程的影响机制提供基础资料.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点设在浙江省安吉市, 地理坐标为 $30^\circ 55' \text{ N}$, $119^\circ 54' \text{ E}$. 该地区属于北亚热带季风气候, 多年平均气温为 15.3°C , 年均降水量 1286 mm , 无霜期 230 d . 试验栽培区属低山丘陵地貌, 土壤为发育于粉砂岩的红壤. 研究区原为天然灌木林, 近年来, 当地居民为了提高经济收益, 将一部分天然灌木林改造成板栗林, 并对板栗林采取了施肥、翻耕和去除林下植被等一系列的集约经营管理措施. 目前集约经营的板栗林下无灌木和杂草, 每年施肥 1 次 (一般在 5 月上旬), 肥料一般采用复合肥 ($\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 15 : 15 : 15$), 肥料施用量为 $450 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $150 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $200 \text{ kg K} \cdot \text{hm}^{-2}$. 每次将肥料撒施入板栗林地表, 随后进行深翻入土, 翻耕深度为 $30 \sim 35 \text{ cm}$.

1.2 试验设计及取样

2010 年 6 月, 在研究区内选择立地条件基本一致、相邻的天然灌木林和集约经营板栗林. 其中板栗林是 1990 年从天然灌木林改造而来, 集约经营历史为 20 年. 在上述两块林地中, 分别选择面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样地 4 个. 按照五点取样法用直径为 4.5 cm 的取土钻采取各样地 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 的表层土壤. 将同一样地内 5 个点取到的土壤进行混合, 作为该样地的土壤样品. 样品采集后带回实验室, 过 2 mm 筛后分成 2 份土样. 一份新鲜土样保存在冰箱 (4°C) 中, 另一份土样风干处理后保存备测.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤基本理化性状的测定 土壤总氮采用半微量凯氏定氮法测定, 总有机碳 (TOC) 含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用 Bray 法, 即盐酸 ($0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)-氟化铵 ($0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 溶液浸提, 钼锑抗比色法测定; 速效钾采用醋酸铵 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 浸提, 火焰光度计测定; 土壤 pH 值采用水土比 $2.5 : 1$ 浸提, 然后用 Sartorius 标准型 pH 计 (PB-10) 测定. 具体的测定方法参见文献^[16].

1.3.2 水溶性有机碳、氮的测定 土壤 WSOC 和 WSON 的测定主要参考 Jones 和 Willett^[17] 的方法进行. 称鲜土 20 g (同时测定土壤质量含水量), 按照水土比 $2 : 1$ 进行浸提, 在 25°C 下振荡 0.5 h (100

rpm), 离心 10 min(8000 × *g*), 然后通过 0.45 μm 滤膜过滤到塑料瓶中, 待测. 取 1 份滤液(A) 直接用有机碳分析仪(TOC-V_{CPI}, 岛津公司)测定 WSOC 和土壤水溶性总氮(WSN)含量; 另取 1 份滤液(B) 用离子色谱法(ICS 1500, 美国戴安公司)测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量, 然后滤液 A 中的土壤 WSN 含量减去滤液 B 中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量, 得到土壤水溶性有机氮含量(WSON).

1.3.3 微生物生物量碳、氮的测定 土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸直接提取法^[18]. 对照土壤和熏蒸后土壤用 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 提取(土液比为 1 : 5), 滤液中 WSCO 和 WSN 含量采用有机碳分析仪(TOC-V_{CPI}, 岛津公司)测定. 土壤微生物生物量碳、氮含量以熏蒸和未熏蒸土样 0.5 mol · L⁻¹ K₂SO₄ 提取液中 C、N 含量之差除以系数得到, 即: $B_C = E_C / 0.45$, $B_N = E_N / 0.45$. 其中, E_C 和 E_N 分别为熏蒸土样与未熏蒸土样提取液 C、N 含量之差; 0.45 为浸提系数^[18-19].

1.3.4 易氧化碳的测定 土壤易氧化态碳(ROC)的测定参考 Graeme 等^[20]的方法. 称取 2 g 风干土, 置于 50 mL 塑料离心管里, 加入 25 mL 333 mmol · L⁻¹ KMnO₄ 溶液, 在 25 °C 下震荡 1 h(100 rpm), 离心 5 min(4000 × *g*), 吸取上清液, 稀释 250 倍, 稀释液在 565 nm 波长处进行比色. 同时配制标准系列浓度的 KMnO₄ 溶液, 在 565 nm 处比色, 根据标准曲线求得 KMnO₄ 浓度, 进而计算 KMnO₄ 消耗量. 根据 KMnO₄ 消耗量可计算出 ROC 含量.

1.3.5 土壤的氢氟酸(HF)预处理与核磁共振波谱分析 为了提高固态¹³C 核磁共振仪器的分析效率, 土壤样品在进行核磁共振分析前先用 HF 进行预处理, 以除去样品中的 Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 等磁性物质, 提高仪器分析的信噪比. 土壤样品 HF 预处理的方法参考 Mathers 等^[21]的方法并略作改动. 称量 8 g 风干土于 100 mL 离心管中, 加 50 mL HF 溶液(10% V/V), 在摇床上震荡 1 h(25 °C, 100 rpm), 离心 10 min(3000 × *g*), 弃去上清液, 残余物继续用 HF 溶液进行处理. HF 溶液处理共 8 次, 8 次处理过

程中样品在摇床上振荡的时间为: 第 1 ~ 4 次均 1 h, 第 5 ~ 7 次均 12 h, 第 8 次为 24 h. 土壤样品经 HF 溶液处理后, 用双蒸水洗残余物 4 次, 以去除样品中残留的 HF 溶液. 方法如下: 加 50 mL 双蒸水, 摇床上震荡 10 min(25 °C, 100 rpm), 离心 10 min(3000 × *g*), 弃去上清液. 上述过程重复 4 次. 将经 HF 溶液处理后的残余物在 40 °C 烘箱中烘干, 磨细过 60 目筛, 保存在卡口袋中待测.

将上述经 HF 溶液预处理过的土壤样品用核磁共振波谱仪测定(AVANCE II 300 MH, 布鲁克公司). 测试参数: 光谱频率为 75.5 MHz、旋转频率为 5000 Hz、接触时间为 2 ms、循环延迟时间为 2.5 s. 根据以往土壤有机碳¹³C NMR 的研究结果^[13], 各类含碳基团所对应的¹³C 信号的化学位移如下: 烷基碳(0 ~ 50 ppm)、烷氧碳(50 ~ 110 ppm)、芳香碳(110 ~ 160 ppm)和羰基碳(160 ~ 220 ppm). 对核磁共振谱峰曲线进行区域积分, 可以获得土壤有机碳中各种含碳组分的百分比. 此外, 计算了两个表征土壤有机质稳定性的指标: 1) A/O-A: C_{0~50 ppm}/C_{50~110 ppm}(烷基碳/烷氧碳)^[22]; 2) 芳香度(Aromaticity): C_{110~165 ppm}/C_{0~165 ppm}[烷基碳/(烷基碳+烷氧碳+芳香碳) × 100%]^[23].

1.4 数据处理

所有数据均为 4 次重复的平均值. 数据处理均在 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件上完成. 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和新复极差法(SSR)比较不同数据组间的差异, 显著性水平设定为 α = 0.05.

2 结果与分析

2.1 天然灌木林改造成板栗林后土壤基本理化性质的变化

由表 1 可以看出, 天然灌木林改造成板栗林后对土壤性质产生显著的影响. 板栗林土壤的有机碳含量为天然灌木林土壤的 71.4%; 速效养分(包括碱解氮、有效磷和速效钾)也显著低于天然灌木林土壤, 土壤 pH 值显著下降. 但两种林分土壤的全氮含量差异不显著.

表 1 天然灌木林和板栗林(0 ~ 20 cm)土壤的基本理化性质
Table 1 Soil (0-20 cm) properties of native shrub forest and Chinese chestnut forest

森林类型 Forest type	pH (H ₂ O)	有机碳 Organic carbon (g · kg ⁻¹)	全氮 Total N (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkalyzable N (mg · kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻¹)
NF	5.01a	18.9a	1.32a	73.9b	4.89b	86.3b
CF	4.76b	13.5b	1.38a	93.2a	9.91a	119.7a

NF:天然灌木林 Native shrub forest; CF:板栗林 Chinese chestnut forest. 同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05) Different letters within the same column meant significantly different at 0.05 level. 下同 The same below.

2.2 天然灌木林改造成板栗林后土壤活性碳库和氮库的变化

天然灌木林改造成板栗林后,土壤 WSOC、MBC 和 ROC 含量分别下降了 42.9%、53.9% 和 33.9%; WSOC/TOC 和 MBC/TOC 分别下降了 20.5% 和 33.3%,而土壤 ROC/TOC 没有显著变化;土壤 WSON 和 MBN 含量分别下降 35.7% 和 45.5% (表 2).

2.3 天然灌木林改造成板栗林对土壤有机碳化学结构特征的影响

由图 1 可以看出,天然灌木林和板栗林土壤有机碳的 NMR 谱图均包含 4 个核磁共振区:烷基碳区 (0 ~ 50 ppm)、烷氧碳区 (50 ~ 110 ppm)、芳香碳区 (110 ~ 160 ppm) 和羰基碳区 (160 ~ 220 ppm). 而且芳香碳区 (110 ~ 160 ppm) 的共振信号明显较弱. 天然灌木林和板栗林土壤有机碳中的碳形态以烷基碳

和烷氧碳为主. 天然灌木林改造成板栗林后,土壤有机碳中烷氧碳和羰基碳的比例显著下降,烷基碳和芳香碳比例显著增加;土壤有机碳的 A/O-A 值和芳香度均显著增加 (表 3).

3 讨 论

土地利用方式的变化显著影响着土壤水溶性碳的含量^[6,24]. Chen 等^[6]研究表明,将天然林改造成松树林后,土壤 WSOC 含量下降了 17.7%. 本研究结果中,将天然阔叶林改造成板栗林并集约经营 20 年后,土壤 WSOC 含量显著下降 (表 2). 土壤 WSOC 的变化与土地利用方式和经营管理措施密切相关. 在板栗林的经营管理过程中,去除林下灌木和杂草并进行翻耕等集约经营措施会使板栗林土壤的水土涵养功能较差,更易引起土壤中水溶性有机碳流失. 另外,板栗林集约化经营通常包含施肥措施,板栗树的生长速度相对较快,对林地土壤的养分吸收也相对较快,在一定程度上促进了土壤有机质的分解,从而导致了土壤有机质的耗竭 (表 1),最终引起土壤水溶性有机碳含量的下降. 天然灌木林改造成板栗林后,土壤 ROC 含量也显著下降 (表 2),与土壤有机碳和 WSOC 的变化趋势相同. 由此可以认为,与天然灌木林相比,集约经营板栗林的土壤碳库存在一定程度的耗竭状况. 如何对板栗林土壤进行外源有机碳的摄入将是今后关于板栗林土壤可持续经营的重要研究内容之一.

土壤水溶性有机氮 (WSON) 在森林生态系统氮循环中起着非常重要的作用. 其主要来源于新鲜的凋落物、土壤腐殖质、根系和微生物的代谢产物和分泌物、降雨淋溶产物以及外源性氮输入等^[25]. 不同

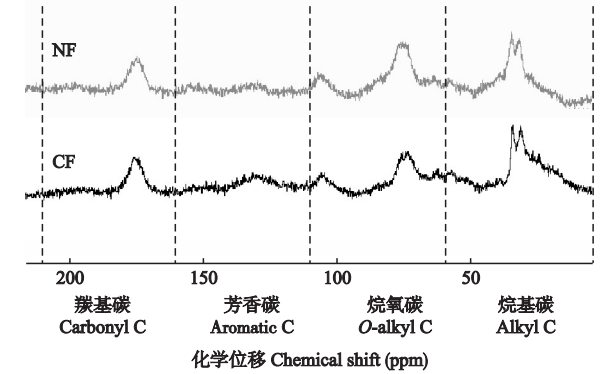


图 1 天然灌木林和板栗林土壤有机碳的固态¹³C 核磁共振波谱图
Fig. 1 Solid-state ¹³C NMR spectra for soil organic carbon of native shrub forest and Chinese chestnut forest.
NF:天然灌木林 Native shrub forest; CF:板栗林 Chinese chestnut forest.

表 2 天然灌木林改造成板栗林对土壤活性碳库和氮库的影响
Table 2 Effect of conversion from native shrub forest to Chinese chestnut forest on the different labile carbon and nitrogen pools in soil

森林类型 Forest type	WSOC (mg · kg ⁻¹)	MBC (mg · kg ⁻¹)	ROC (g · kg ⁻¹)	WSOC/TOC (%)	MBC/TOC (%)	ROC/TOC (%)	WSON (mg · kg ⁻¹)	MBN (mg · kg ⁻¹)
NF	73.5a	395.1a	3.68a	0.4a	1.8a	19.6a	16.5a	78.5a
CF	42.0b	182.3b	2.43b	0.3b	1.2b	18.1b	11.6b	42.8b

表 3 天然灌木林改造成板栗林对土壤不同含碳组分百分比的影响
Table 3 Effect of conversion from native shrub forest to Chinese chestnut forest on the percentage of different carbon fractions in soil

森林类型 Forest type	烷基碳 Alkyl C (%)	烷氧碳 O-alkyl C (%)	芳香碳 Aromatic C (%)	羰基碳 Carbonyl C (%)	A/O-A	芳香度 Aromaticity (%)
NF	28.4b	50.3a	3.1b	18.2a	0.57b	3.8b
CF	38.8a	33.8b	14.4a	13.1b	1.15a	16.6a

森林土壤的 WSON 含量在不同的供试土壤中差异较大。Smolander 等^[26]和王清奎等^[27]研究表明,森林土壤的 WSON 均低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Chen 等^[28]对温带森林土壤的研究结果表明,大部分表层土壤的 WSON 含量介于 $6.5 \sim 16.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。而张彪等^[29]对福建建瓯万林自然保护区内细柄阿丁枫天然林、米槠天然林和杉木人工林土壤的研究表明,3 种林分的土壤 WSON 含量均在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。郝敬梅等^[30]报道,红松林土壤 WSON 含量在 $70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。本研究中,天然灌木林和板栗林的 WSON 含量分别为 16.8 和 $12.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 Chen 等^[28]的研究结果较为一致。而板栗林土壤 WSON 含量与盛卫星等^[31]的研究结果也非常接近。不同森林土壤 WSON 含量的巨大差异可能是森林类型、经营措施、气候、取样日期以及样品分析方法等因素的差异所造成的^[25]。本研究中,天然阔叶林改造成板栗林并经过 20 年集约经营,土壤 WSON 含量显著下降。WSON 下降的原因与 WSOC 变化机理相似,可能是不同林分凋落物的差异和不同的经营管理措施引起的。

微生物生物量碳 (MBC) 和微生物生物量氮 (MBN) 是土壤有机碳库和氮库中非常活跃的组分,近几年来被作为表征研究土壤有机质周转和评价土壤肥力状况的重要指标之一^[32]。目前有关天然林或次生林改造成人工林对土壤 MBC 和 MBN 的影响在国内外已有不少报道^[6, 33]。方丽娜等^[33]的研究结果表明,次生林转化为橡胶林后,土壤 MBC 显著下降。本研究也表明,将天然阔叶林改造成板栗林后,土壤 MBC 和 MBN 含量显著下降(图 1)。究其原因:1) 两种林分凋落物的差异。天然灌木林的凋落物或植株死亡残体的植株含碳量要高于板栗林凋落物的含碳量。因此凋落物或植株残体分解后进入土壤的含碳化合物会更加丰富,给土壤中微生物的生长提供了非常好的生长环境;2) 土壤 pH 的差异。板栗林土壤的 pH 显著低于天然板栗林土壤,而土壤酸化会对土壤微生物的生长产生一定的抑制作用,从而导致土壤 MBC 和 MBN 显著下降^[34-35]。

^{13}C CPMAS 核磁共振波谱分析法是目前研究土壤有机碳化学结构特征常用的方法。该方法除了定性研究土壤有机碳库中主要存在哪些含碳组分之外,还可以对土壤中不同碳组分提供半定量的试验结果^[18]。在以往的有关土壤 ^{13}C CPMAS 核磁共振研究中,大部分供试土壤有机碳都呈现出 4 个明显的共振区:烷基碳区 ($0 \sim 50 \text{ ppm}$)、烷氧碳区 ($50 \sim 110$

ppm)、芳香碳区 ($110 \sim 160 \text{ ppm}$) 和羰基碳区 ($160 \sim 220 \text{ ppm}$)^[13]。本研究结果表明,两种林地土壤有机碳的核磁共振波谱也包含上述 4 个共振区,但芳香碳区 ($110 \sim 160 \text{ ppm}$) 的共振信号明显较弱。关于不同碳组分相对比例以往的报道中存在较大差异。如:Chen 等^[6]报道,在 4 个不同碳组分中烷氧碳所占的比例最高;Mathers 和 Xu^[36]研究表明,土壤有机碳中烷基碳所占的比例最高。从本试验结果来看,天然灌木林土壤的有机碳以烷氧碳为主(占 50.3%),其次为烷基碳(占 28.4%);而板栗林土壤的有机碳以烷基碳和烷氧碳为主,分别占 38.8% 和 33.8% 。不同研究中不同形态碳所占的比例不一样,可能与土壤类型、气候特征、植物种类以及经营方式有关。从本研究结果来看,天然灌木林改造成板栗林后,土壤有机碳中的烷氧碳和羰基碳比例显著下降,而烷基碳和芳香碳比例显著增加。A/O-A 值和芳香度是表征土壤有机质的两个重要指标。板栗林土壤的 A/O-A 值和芳香度均显著高于天然灌木林(图 5),表明板栗林土壤碳库的稳定性要高于天然灌木林土壤。结合天然灌木林改造成板栗林后土壤总有机碳 (TOC)、WSOC 和 MBC 均显著下降的试验结果,推测天然灌木林改造成板栗林并经过长期集约经营后,土壤中的一部分活性有机碳组分转化为难降解的碳库组分或者转化成 CO_2 而损失。

参考文献

- [1] Batjes NH. Total carbon and nitrogen in soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 151-163
- [2] Murty D, Kirschbaum MF, Mcmurtrie RE, et al. Dose conversation of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 105-123
- [3] Battle-Bayer L, Batjes NH, Bindraban PS. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, **137**: 47-58
- [4] Yang Y-S (杨玉盛), Xie J-S (谢锦升), Sheng H (盛浩), et al. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of southern China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2007, **62**(11): 1123-1131 (in Chinese)
- [5] Arevalo CBM, Bhatti JS, Chang SX, et al. Ecosystem carbon stocks and distribution under different land-use in north central Alberta. *Forest Ecology and Management*,

- 2009, **257**: 1776–1785
- [6] Chen CR, Xu ZH, Mathers NJ. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**: 282–291
- [7] Jiang PK, Xu QF, Xu ZH, *et al.* Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a phyllostachys praecox stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, 2006, **236**: 30–36
- [8] Huang ZQ, Xu ZH, Chen CR, *et al.* Changes in soil carbon during the establishment of a hardwood plantation in subtropical Australia. *Forest Ecology and management*, 2008, **254**: 46–55
- [9] Ros GH, Tschudy C, Chardon WJ, *et al.* Speciation of water-extractable organic nutrients in grassland soils. *Soil Science*, 2010, **175**: 15–26
- [10] Jiang YM, Chen CR, Liu YQ, *et al.* Soil soluble organic carbon and nitrogen pools under mono- and mixed species forest ecosystems in subtropical China. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**: 1070–1081
- [11] Ussiri DAN, Johnson CE. Organic matter composition and dynamics in a northern hardwood forest ecosystem 15 years after clear-cutting. *Forest Ecology and management*, 2007, **240**: 131–142
- [12] Peng YY, Thomas S C, Tian DL. Forest management and soil respiration: Implications for carbon sequestration. *Environmental Reviews*, 2008, **16**: 93–111
- [13] Mathers NJ, Mao XA, Xu ZH, *et al.* Recent advances in the application of ^{13}C and ^{15}N NMR spectroscopy to soil organic matter studies. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, **38**: 769–787
- [14] Cheng Z-P (程中平), Wu Q (吴 群), Huang J-B (黄俊斌), *et al.* Primary identification of chestnut blight-resistant chinese chestnut cultivars and superior lines. *South China Fruits* (中国南方果树), 2011, **40** (3): 40–43 (in Chinese)
- [15] Jiang P-K (姜培坤), Yu Y-W (俞益武), Xu Q-F (徐秋芳). Assessment on evolving law of soil physical properties and erosion resistance of land with different commercial forest. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2002, **16**(1): 112–115 (in Chinese)
- [16] Lu R-K (鲁如坤). Analysis Methods for Soil and Agrochemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [17] Jones DL, Willett VB. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **38**: 991–999
- [18] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DC. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, **19**: 703–707
- [19] Brookes PC, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, **17**: 837–842
- [20] Graeme JB, Rod DBL, Leanne L. 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*, 1995, **46**: 1459–1466
- [21] Mathers NJ, Xu ZH, Berners-Price SJ, *et al.* Hydrofluoric acid pre-treatment for improving ^{13}C CPMAS NMR spectral quality of forest soils in southeast Queensland, Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, **40**: 655–674
- [22] Baldock JA, Preston CM. Chemistry of carbon decomposition processes in forest as revealed by solid-state carbon-13 nuclear magnetic resonance// McFee WW, Kelly JM, eds. Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1995
- [23] Dai KOH, Johnson, CE, Driscoll, CT. Organic matter chemistry and dynamic in clear-cut and unmanaged hardwood forest ecosystems. *Biogeochemistry*, 2001, **54**: 51–83
- [24] Wu JS, Jiang PK, Chang SX, *et al.* Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, **90**: 27–36
- [25] Liu Y (刘 艳), Zhou G-Y (周国逸), Liu J-X (刘菊秀). Advances in studies on dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystem. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24**(5): 573–577 (in Chinese)
- [26] Smolander AK, Itunen V, Malkonen E. Dissolved soil organic nitrogen and carbon in a Norway spruce stand and an adjacent clear-cut. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, **33**: 190–196
- [27] Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙), Feng Z-W (冯宗炜). A study on dissolved organic carbon and nitrogen nutrients under Chinese fir plantation: Relationships with soil nutrients. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(6): 1329–1305 (in Chinese)
- [28] Chen CR, Xu ZH. On the nature and ecological functions of soil soluble organic nitrogen (SON) in forest ecosystems. *Journal of Soils and Sediments*, 2006, **6**: 63–66
- [29] Zhang B (张 彪), Gao R (高 人), Yang Y-S (杨

- 玉盛), *et al.* Soil soluble organic nitrogen content in different forest stands in Wanmulin Nature Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1635–1640 (in Chinese)
- [30] Hao J-M (郝敬梅), Cui X-Y (崔晓阳). Comparison of soluble organic nitrogen in soil in broad-leaved Korean pine forests and Korean pine plantation. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2008, **36**(8): 11–13 (in Chinese)
- [31] Sheng W-X (盛卫星), Jiang P-K (姜培坤), Wu J-S (吴家森), *et al.* Effect of fertilization on water-soluble organic N in the soils under chestnut stands. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2008, **44**(10): 164–167 (in Chinese)
- [32] Xue J-F (薛菁芳), Gao Y-M (高艳梅), Wang J-K (汪景宽), *et al.* Microbial biomass carbon and nitrogen as an indicator for evaluation of soil fertility. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2007, **38**(2): 247–250 (in Chinese)
- [33] Fang L-N (方丽娜), Yang X-D (杨效东), Du J (杜杰). Effects of land use pattern on soil microbial biomass carbon in Xishuangbanna. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(4): 837–844 (in Chinese)
- [34] Xue D (薛冬), Yao H-Y (姚槐应), Huang C-Y (黄昌勇). Genetic diversity of microbial communities in tea orchard soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(4): 843–847 (in Chinese)
- [35] Qin H (秦华), Li G-D (李国栋), Ye Z-Q (叶正钱), *et al.* Evolvment of soil bacterial community in intensively managed *Phyllostachys praecox* stand and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2645–2651 (in Chinese)
- [36] Mathers NJ, Xu ZH. Solid-state ^{13}C NMR spectroscopy characterization of soil organic matter under two contrasting residue management regimes in a 2-year-old pine plantation of subtropical Australia. *Geoderma*, 2003, **114**: 19–31

作者简介 商素云,女,1985年生,硕士研究生.主要从事森林生态系统碳循环研究,发表论文2篇. E-mail: shangsuyun@163.com

责任编辑 李凤琴
