应 用 生 态 学 报 2016 年 4 月 第 27 卷 第 4 期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Apr. 2016, 27(4): 1031-1038 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201604.029

亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响

肖好燕[1,2] 刘 宝[3] 余再鹏[1,2] 万晓华[1,2] 桑昌鹏[1,2] 周富伟[1,2] 黄志群[1,2*]

([1]湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; [2]福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; [3]福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘 要 林分类型是影响土壤可溶性有机碳、氮库大小的重要因素,但目前对其研究主要集中在表层土壤(0~10 cm).本研究以亚热带地区天然林、毛竹林、格式栲人工林和杉木人工林为对象,用 3 种不同的浸提方式(冷水、热水和 KCl 溶液)提取表层(0~10 cm)和深层(40~60 cm)土壤中可溶性有机碳(DOC)和有机氮(DON),研究林分类型对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮库的影响.结果表明: 林分类型对表层土壤 DOC 及其占土壤总有机碳(TOC)的比重有显著影响,深层土壤受林分类型的影响不显著;不同林分土壤 DON 含量仅在表层土壤存在显著差异,在深层土壤差异不显著.林分间土壤微生物生物量碳的差异仅在表层土壤达到显著水平.DON 占土壤总氮(TN)的比重在各林分表层和深层土壤间差异均不显著.3 种浸提方法得到的 DOC 和 DON 库大小顺序为热水>KCl>冷水,不同浸提方法得到的 DOC 库及 DON 库的相关性均达到显著水平,表明冷水、热水和 KCl 溶液浸提得到的有机碳、氮库含有相似组分.冷水和热水浸提方法得到的表层土壤 DOC 和 DON 含量及 DOC 占 TOC 比重在天然林和毛竹林均显著大于格式栲和杉木人工林,表明天然林和毛竹林土壤可溶性有机碳、氮含量高于格式栲和杉木人工林,更有利于土壤肥力的恢复.

关键词 森林类型; 可溶性有机质; 微生物生物量碳; 杉木

Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China. XIAO Hao-yan[1,2], LIU Bao[3], YU Zai-peng[1,2], WAN Xiao-hua[1,2], SANG Chang-peng[1,2], ZHOU Fu-wei[1,2], HUAGN Zhi-qun[1,2*] ([1]*Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology*, *Fuzhou* 350007, *China*; [2]*College of Geographical Science*, *Fujian Normal University*, *Fuzhou* 350007, *China*; [3]*College of Forestry*, *Fujian Agriculture and Forestry University*, *Fuzhou* 350002, *China*).

Abstract: Forest types have significant effects on the availability and dynamics of soil dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON). By now the impacts of forest types on soil DOC and DON were mainly focused on surface soil (0-10 cm). Based on the comparisons between natural forest, *Phyllostachys pubescens*, *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata* plantations, we investigated the effects of forest types on soil DOC and DON pools in top (0-10 cm) and deep soils (40-60 cm). Cold water, hot water and KCl solutions were used to extract soil DOC and DON from surface and deep soils. Results showed that the effects of forest types on soil DOC, DOC/TOC, DON and soil microbial biomass carbon were only significant in the surface soil. The concentrations of DOC and DON varied with extract methods and hot water extracted the largest amounts of DOC and DON, and cold water the least. Correlations among hot water, KCl and cold water extracted DOC and DON were significant, suggesting that the organic C and N released by these three solutions might be at least partly from similar pools. The concentrations of DOC and DON and DOC/TOC in surface soil under natural forest and *P. pubescens* were greater than under *C.*

本文由国家自然科学基金项目(41371269)、国家重点基础研究发展计划项目(2014CB954003)和福建省杰出青年科学基金项目(2060203)资助
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41371269), the National Key Basic Research and Development Plan (2014CB954003), and the Science Foundation for Excellent Talents of Fujian Province, China (2060203).
2015-07-01 Received, 2016-01-23 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhiqunhuang@hotmail.com

kawakamii and *C. lanceolata*. It indicated that the concentrations of DOC and DON were greater under the natural forest and *P. pubescens* than under the *C. kawakamii* and *C. Lanceolata*, and more beneficial to improve soil fertility.

Key words: forest type; soil dissolved organic matter; soil microbial biomass carbon; *Cunninghamia lanceolata*.

土壤可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)是指可溶于水或盐溶液(如 $CaCl_2$、KCl、K_2SO_4)的有机质,在生物地球化学循环过程中起着至关重要的作用,是土壤微生物和植物所需要的 C、N 等养分和能量的重要来源[1-3].DOM 作为有机质中的易变组分对土地利用方式的改变、森林经营方式的改变和生境干扰的响应比稳定性有机质更为敏感,可作为反映土壤质量变化的重要指标[4-5].自然环境、生态系统类型、森林经营方式、浸提方式和分析方法的不同均能影响 DOM 库的大小和动态[6].可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和可溶性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)是体现 DOM 数量特征的常用指标.DOC 是维持森林生态系统功能可持续性发展的关键因素[7].DON 是有机氮转化为无机氮的中间过程,影响土壤养分的有效性和流动性[7-8].加深对土壤 DOC 及 DON 数量大小和动态的理解,有助于改善森林管理制度以提高森林生产力和持续性[9-11].森林类型通过改变枯枝落叶层的数量和质量、微生物群落的结构和活性、微生物残体和代谢产物以及根系分泌物和根系周转等因素,不可避免地影响了 DOC 和 DON 的数量大小和空间分布[12].浸提土壤 DOC 和 DON 的方法很多,不同方法得到的土壤 DOC 和 DON 可以不同程度地指示土壤 DOC 和 DON 库的大小和可利用性[13-14].

由于受人类活动的干扰,我国亚热带地区原生的常绿阔叶林所剩无几,取而代之的是大面积的次生林、灌丛和针叶人工林等[15].杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和毛竹(*Phyllostachys edulis*)等树种由于具有经济价值高、生长速度快的优点得到广泛种植.这些人工林或多或少存在生产力低和土壤肥力退化的问题[16-17].为此,我国南方近些年来开始积极营造阔叶林或针阔混交林,以改善和提高土壤肥力,实现森林生态系统的可持续发展[18].许多研究报道了常绿阔叶树种转变为杉木等针叶树种后其土壤有机碳氮含量明显降低[19].目前,关于亚热带地区林分对土壤可溶性有机碳氮的影响集中在土壤表层(0~10 cm)[20-21],而最近发现,树种对土壤有机质的影响可能达到深层(40~100 cm)[22].因此,同时对表层和深层土壤可溶性有机碳氮进行研究,可以更好地理解整个森林土壤剖面的碳、氮周转,为造林树种的优化选择和森林土壤的合理利用提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省南平市福建农林大学教学林场(26°56′ N,118°11′ E),地处武夷山脉东南侧,海拔 182~210 m,土壤类型为酸性岩红壤.该区属于中亚热带湿润季风气候,年均温 20.0 ℃,年降水量 1644 mm.在 2 km 范围内选取天然林、格式栲人工林、杉木人工林和毛竹林 4 种典型的森林类型为研究对象,其中,天然林群落结构复杂,建群种为细柄阿丁枫(*Altingia gacilipes*),林下植被丰富,郁闭度高达 90%,其他林分均为人工纯林,林下植被较少.

1.2 试验设计

在每种林分类型内随机设置 4 个 20 m×20 m 的小区,形成 4 个重复,各重复之间的海拔、坡向、坡度和环境因子等基本一致.

2015 年 1 月,用内径为 3.5 cm 的土钻在每个小区内沿对角线等距离取 12 个点,去除地表的枯枝落叶层后,分别采集 0~10 cm(表层)和 40~60 cm(深层)土壤样品,将同一小区相同土层的土样均匀混合.土壤样品过 2 mm 筛后,作为测定土壤可溶性有机碳氮、微生物生物量碳等指标的待测样.土壤容重采用环刀法测定.4 种森林类型土壤和凋落物的基本理化性质见表 1.

1.3 测定项目与方法

土壤样品的 DOC 和 DON 含量测定参考 Curtin 等[23]的方法,即采用冷水、热水、KCl 溶液分别浸提:1)取 10 g 鲜土加入 40 mL 去离子水,振荡 0.5 h 后 4000 $r \cdot min^{-1}$离心 10 min,过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜,滤液为冷水浸提分析样;2)热水浸提是称取 10 g 鲜土加入 40 mL 去离子水,振荡 0.5 h 后,放入 80 ℃恒温水浴箱中静置 16 h,然后离心,过 0.45 μm 滤膜后得到待测样品;3)用 KCl 溶液浸提是向待测土样中加入 40 mL KCl 溶液(浓度为 2 $mol \cdot L^{-1}$),其他操作步骤与冷水浸提法一致.将得到的3种滤

表 1　4 种森林类型土壤和凋落物的基本理化性质
Table 1　Soil and litter physical and chemical properties under four forests

土层 Soil layer	理化性质 Physical and chemical property	天然林 Natural forest	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation
0~10 cm	pH (H_2O)	3.8±0.3b	4.3±0.1a	4.7±0.3a	4.6±0.2a
	全碳 Total C ($g \cdot kg^{-1}$)	34.4±5.3a	25.1±6.6ab	17.1±3.0b	17.2±2.0b
	全氮 Total N ($g \cdot kg^{-1}$)	2.2±0.4a	1.6±0.4b	1.4±0.2b	1.5±0.1b
	C/N	15.6±0.9a	15.5±2.1a	12.5±0.5b	11.5±0.8b
	容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	0.75±0.22b	1.13±0.08a	1.08±0.17a	1.01±0.01ab
40~60 cm	pH (H_2O)	4.28±0.04c	4.40±0.06b	4.49±0.01ab	4.57±0.07a
	全碳 Total C ($g \cdot kg^{-1}$)	6.4±1.0ab	4.8±0.8b	8.1±1.1a	6.8±1.1a
	全氮 Total N ($g \cdot kg^{-1}$)	0.53±0.06b	0.56±0.03b	0.64±0.04ab	0.67±0.09a
	C/N	12.2±1.5a	8.6±1.2b	12.6±1.0a	10.0±0.3b
	容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	1.21±0.07a	1.28±0.07a	1.12±0.11b	1.10±0.04b
凋落物	年凋落物量 Litter biomass ($t \cdot hm^{-2}$)	2.55±0.2a	2.17±0.5a	0.86±0.1b	1.65±0.4a
Litter	碳含量 C content ($mg \cdot g^{-1}$)	478.4±3.0a	481.9±9.2a	461.2±6.3a	407.8±2.5ab
	氮含量 N content ($mg \cdot g^{-1}$)	17.5±0.5a	11.4±0.6b	11.2±0.4b	20.4±0.2a
	C/N	27.7±0.8b	42.3±1.3ab	55.4.4±9.8a	20.0±2.3b

同行不同字母表示不同林分间差异显著($P<0.05$) Different letters in the same row meant significant difference among different forest types at 0.05 level.

液采用连续流动分析仪(Skalar San^{++},荷兰)测定无机氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)和可溶性全氮浓度,用总有机碳分析仪(SHIMADZU TOC-VCPH/CPN analyzer,日本岛津)测定有机碳浓度.

土壤可溶性有机氮为土壤可溶性全氮含量与无机氮(NH_4^+-N 和 NO_3^--N)含量之差.土壤微生物生物量碳(MBC)含量采用氯仿-熏蒸法浸提[24]测定,计算公式如下:

$$MBC = E_c / 0.45$$

式中:E_c为熏蒸和未熏蒸样品中有机碳含量的差值($mg \cdot kg^{-1}$);0.45 为微生物生物量碳的转换系数.

1.4　数据处理

利用 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析,采用方差分析和 LSD 法进行多重比较和差异显著性检验($\alpha=0.05$).利用 Pearson 法检验变量之间的相关性.表中数据为平均值±标准差.

2　结果与分析

2.1　不同林分土壤可溶性有机碳含量的变化

由表 2 可知,林分类型对 0~10 cm 土层土壤 DOC 含量及 DOC/TOC 具有显著影响,其中,冷水和热水浸提下天然林和毛竹林 0~10 cm 土层土壤 DOC 含量及 DOC/TOC 显著大于格氏栲和杉木人工林,KCl 溶液浸提下天然林和毛竹林 0~10 cm 土层土壤 DOC 含量及 DOC/TOC 具有大于格氏栲人工林和杉木人工林的趋势.林分类型对 40~60 cm 土层土壤 DOC 含量及 DOC/TOC 影响不显著.3 种方法浸提得到的土壤 DOC 含量及 DOC/TOC 大小排序为热水>KCl>冷水.

2.2　不同林分土壤可溶性有机氮含量的变化

由表 3 可知,林分类型对 0~10 cm 土层土壤 DON 含量具有显著影响,3 种不同方法浸提得到的土壤 DON 大小排序均为天然林>毛竹>格氏栲人工林≥杉木人工林.林分类型对 40~60 cm 土层土壤 DON 影响不显著.各林分土壤 DON/TN 在表、深层土壤间差异均不显著.冷水、热水和 KCl 溶液浸提得到的土壤 DON 含量大小顺序为热水>KCl>冷水.

2.3　不同林分土壤可溶性有机碳/氮值的变化

由表 4 可知,林分类型对 0~10 cm 土层土壤 DOC/DON 值具有显著影响,其中,冷水和热水浸提下天然林和毛竹林 0~10 cm 土层土壤 DOC/DON 值显著大于格氏栲人工林和杉木人工林.林分类型对 40~60 cm 土层土壤 DOC/DON 值影响不显著.

2.4　不同林分土壤微生物生物量的变化

由表 5 可知,不同林分间土壤微生物生物量碳的差异仅在 0~10 cm 土层达到显著水平,其大小排序为天然林>毛竹>格氏栲人工林≥杉木人工林.各林分 0~10 cm 土层土壤微生物生物量碳占总有机碳的比重为 0.8%~1.3%,40~60 cm 土层土壤为 1.5%~2.7%.

2.5　土壤可溶性有机碳氮与土壤理化性质的相关性

林分类型间土壤 pH 值具有显著差异,其中天然林显著低于其他林分(表 1).由表 6 可以看出,土壤pH值与土壤全碳、全氮、DOC、DON及MBC均呈

表 2 不同森林类型表层和深层土壤可溶性有机碳含量及其占土壤全碳的比例

Table 2 Soil dissolved organic C (DOC) concentration and percentage to soil total C (TOC) in top soil and subsoil under different forests

土层 Soil layer (cm)	林型 Forest type	DOC_{CW} (mg · kg^{-1})	DOC_{HW} (mg · kg^{-1})	DOC_{KCl} (mg · kg^{-1})	DOC_{CW}/TOC (%)	DOC_{HW}/TOC (%)	DOC_{KCl}/TOC (%)
0~10	天然林 Natural forest	46.0±13.4a	1005.1±280.2a	108.1±17.1a	0.13±0.05a	2.89±0.47a	0.52±0.08a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	12.0±8.6b	417.0±80.0b	98.5±13.2a	0.06±0.04b	1.71±0.42b	0.41±0.10a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	8.8±2.3b	241.2±58.3b	75.5±17.1a	0.05±0.03b	1.40±0.19b	0.44±0.03a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	31.7±7.1a	624.7±167.1ab	99.0±24.2a	0.19±0.03a	3.03±0.70a	0.58±0.11a
40~60	天然林 Natural forest	8.7±2.5a	91.8±61.7a	56.3±11.7a	0.14±0.05a	1.43±1.02a	0.87±0.08a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	5.6±2.4a	74.2±8.3a	55.0±6.2a	0.11±0.05a	1.54±0.22a	0.75±0.07a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	3.2±1.0a	84.7±53.9a	63.8±10.0a	0.04±0.02a	1.04±0.65a	0.79±0.06a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	8.7±7.1a	98.1±23.0a	53.5±24.0a	0.14±0.13a	1.50±0.50a	0.82±0.12a

CW: 冷水 Cold water; HW: 热水 Hot water; KCl: KCl 溶液 KCl solution. 同列不同字母表示同一土层不同林分间差异显著(P<0.05) Different letters in the same column meant significant difference on the same soil layer between different forest types at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 不同林分表层和深层土壤可溶性有机氮含量及其占可溶性全氮的比例

Table 3 Soil dissolved organic N (DON) concentration and percentage to soil total soluble N (TN) in top soil and subsoil under different forests

土层 Soil layer (cm)	林型 Forest type	DON_{CW} (mg · kg^{-1})	DON_{HW} (mg · kg^{-1})	DON_{KCl} (mg · kg^{-1})	DON_{CW}/TN (%)	DON_{HW}/TN (%)	DON_{KCl}/TN (%)
0~10	天然林 Natural forest	4.6±0.3a	43.2±5.2a	15.9±1.6a	0.21±0.03a	1.98±0.31a	0.82±0.07a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	2.9±0.9b	28.8±1.7b	12.3±0.8b	0.22±0.06a	1.85±0.51a	0.79±0.23a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	2.7±0.4b	22.0±3.2b	10.4±1.5b	0.21±0.01a	1.61±0.03a	0.77±0.02a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	3.6±1.0ab	34.5±6.8ab	14.2±2.1ab	0.24±0.04a	2.31±0.35a	0.95±0.11a
40~60	天然林 Natural forest	2.0±1.1a	9.5±2.0a	6.1±1.0a	0.38±0.21a	1.82±0.43a	1.15±0.12a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	1.6±0.2a	8.6±0.6a	7.5±0.6a	0.26±0.04a	0.83±0.14a	0.98±0.13a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	1.5±0.4a	8.2±3.6a	9.8±0.3a	0.24±0.07a	1.27±0.55a	1.54±0.08a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	2.1±1.1a	10.0±3.5a	9.2±2.0a	0.33±0.20a	1.52±0.66a	1.39±0.43a

表 4 不同林分表层和深层土壤有机碳/氮值

Table 4 Ratios of soil organic C to N in top soil and subsoil under different forests

土层 Soil layer (cm)	林型 Forest type	DOC_{CW}/DON_{CW}	DOC_{HW}/DON_{HW}	DOC_{KCl}/DON_{KCl}
0~10	天然林 Natural forest	10.0±3.0a	23.0±3.9a	9.2±2.2a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	6.9±3.6ab	14.4±2.1b	8.0±0.7a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	3.2±0.5b	10.9±1.4b	7.2±0.8a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	8.8±0.4a	18.0±2.0a	6.9±0.6a
40~60	天然林 Natural forest	4.9±1.8a	11.9±1.2a	9.3±0.6a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	3.5±2.4a	8.6±0.8a	7.3±1.0a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	2.1±0.6a	9.8±2.2a	6.5±0.9a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	3.8±1.6a	10.3±2.1a	5.6±1.4a

表 5　不同林分表层和深层土壤微生物生物量碳及其占总有机碳的比值

Table 5　Soil microbial biomass C (MBC) and percentage to total organic C under different forests

土层 Soil layer (cm)	林型 Forest type	土壤微生物生物量碳 MBC ($mg \cdot kg^{-1}$)	MBC/TOC
0~10	天然林 Natural forest	308.1±71.7a	0.9±0.3a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	180.5±71.7b	0.8±0.4a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	138.8±40.6b	0.8±0.3a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	219.7±75.ab	1.3±0.5a
40~60	天然林 Natural forest	122.2±64.7a	1.8±0.7a
	格氏栲林 *Castanopsis kawakamii* plantation	111.6±19.5a	1.5±0.7a
	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	121.1±35.9a	1.8±0.6a
	毛竹林 *Phyllostachys edulis* plantation	138.0±17.1a	2.7±0.5a

显著负相关.不同方法浸提得到的 DOC 与 DON 相关性达到显著水平,且与土壤总碳、总氮及微生物生物量碳呈显著正相关.

3　讨　论

3.1　林分类型对土壤可溶性有机碳的影响

本研究中,冷水和热水浸提得到的表层土壤 DOC 含量在天然林和毛竹林显著高于格氏栲人工林和杉木人工林,KCl 溶液浸提下具有更高的 DOC 含量.此研究结果与 Chen 等[25]对比天然林和人工林表层土壤 DOC 及徐秋芳等[26]用冷水(25 ℃)和热水(100 ℃)浸提毛竹林、杉木和阔叶人工林土壤得到的 DOC 结果相似.森林土壤 DOC 主要来源于凋落物和细根残体的分解、根系和微生物分泌物及土壤腐殖质[8,27],林分类型也通过这些过程影响土壤 DOC 库的大小.本研究中,天然林和毛竹林年凋落物数量和凋落物质量(碳氮比)显著高于格氏栲和杉木人工林,一方面,凋落物为微生物提供大量的养分,提高土壤微生物生物量和活性,增加天然林和毛竹林表层土壤 DOC 含量;另一方面,高质量凋落物的分解速率更高,将会有更多的有机碳氮淋溶到天然林和毛竹林土壤中,提高土壤 DOC 含量.pH 值是影响土壤 DOM 的重要因素,土壤酸性与土壤 DOC 呈显著正相关[1,28].林分间由于枯枝落叶及细根分泌物含有的酸性物不同,其土壤 pH 值存在差异[29].本研究中,土壤 DOC、DON 含量均与土壤 pH 值呈显著负相关,说明更低的土壤 pH 将提高土壤 DOM 含量.原因是 DOM 主要由高分子和多重性的电解质组成,其溶解程度由电荷密度决定,土壤溶液的 pH 值是电荷密度的决定因素,此外,土壤酸性的提高会加快多价阳离子(Ca^{2+}、Al^{3+}、Mg^{2+})的淋溶,有利于提高土壤有机质的溶解性,所以更低的土壤 pH 值将提高土壤 DOM 含量[30-31].因此,天然林表层土壤 pH 值显著低于其他林分是导致其土壤 DOC 含量显著高于其他林分的原因之一.人类活动是影响土壤 DOC 的又一原因,每年对毛竹林进行人工施肥使其表层土壤 DOC 含量显著高于格氏栲人工林和杉木人工林,此外,毛竹林强大的地下鞭根系统使其自肥能力强于杉木和格式栲人工林,这也是 DOC 含量更高的重要原因[26].土壤 DOC/TOC 比土壤 DOC 含量更能反映林分类型对土壤碳行为的影响结果,其比例越大,表明土壤碳活性越强,其稳定性越差[32].本研究中,天然林和毛竹林表层土壤的 DOC/TOC 高于格氏栲人工林和杉木人工林.此外,天然林和毛竹林 MBC/TOC 也具有更高的趋势.综上可知,天然林和毛竹林表层土壤有机碳含量和活性高于格氏栲人工林和杉木人工林,更有利于土壤肥力的恢复.毛竹林土壤受到人为施肥的影响较大,

表 6　土壤可溶性有机碳氮间及其与土壤理化性质的相关系数

Table 6　Correlation coefficients between DOC and DON and soil physical and chemical properties

	DOC_{CW}	DOC_{HW}	DOC_{KCl}	DON_{CW}	DON_{HW}	DON_{KCl}	TC	TN	MBC
DOC_{HW}	0.866**								
DOC_{KCl}	0.740**	0.753**							
DON_{CW}	0.850**	0.803**	0.718**						
DON_{HW}	0.844**	0.939**	0.862**	0.805**					
DON_{KCl}	0.587**	0.646**	0.864**	0.640**	0.789**				
TC	0.709**	0.913**	0.756**	0.683**	0.896**	0.641**			
TN	0.704**	0.912**	0.738**	0.707**	0.923**	0.700**	0.978**		
MBC	0.805**	0.860**	0.741**	0.625**	0.742**	0.625**	0.627**	0.621**	
pH	−0.491**	−0.552**	−0.410*	−0.377*	−0.401*	−0.132	−0.555**	−0.445*	−0.410*

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

其对土壤肥力的恢复有待进一步验证.

3 种方法浸提得到的深层土壤 DOC 含量较表层均下降,但林分类型对深层土壤 DOC 含量及其占 TOC 分配比例的影响均不显著.有研究指出,与表层土壤相比,深层土壤 DOC 浓度稳定性强,受外界环境的影响较小[33].造成 DOC 土层分布异质性的原因与土壤特性、根系的分布规律、微生物和土壤动物的活动特征等有关.0~5 cm 土层土壤有机质含量占整个土层有机质总量的 50%[34],大量的枯枝落叶和根系均集中在表层,导致表层土壤 DOC 的富集,但是矿质土壤对 DOC 的强烈吸附作用和土层的滞留隔离性导致其表层 DOC 很难下渗到深层[35].此外,深层土壤的微生物生物量和活性显著低于表层土壤[36],土壤中蚯蚓、白蚁、节肢动物等动物数量随土层深度的增加明显下降,深层土壤受到土壤动物的生物扰动也极少[22].树种对土壤 DOC 的影响主要依赖以上途径,因此深层土壤 DOC 库较表层下降,树种对深层土壤 DOC 影响不显著.

3.2 林分类型对土壤可溶性有机氮的影响

本研究中,冷水、热水和 KCl 溶液浸提得到的表层土壤 DON 库大小排序均为天然林>毛竹>格氏栲人工林≥杉木人工林,差异达到显著水平.许多研究发现,土壤 DON 主要来源于土壤有机质、根系分泌物和周转、微生物代谢产物和分泌物及外源性氮输入等[7-8],而树种主要通过这些过程影响土壤 DON 及其动态.Chen 等[10]发现,不同浸提方法得到的森林土壤 DON 库为 1~448 $mg \cdot kg^{-1}$,均值为 35 $mg \cdot kg^{-1}$,平均占土壤全氮的 2.3%,本研究结果在此范围内.与同纬度相关研究相比[37-38],本研究中冷水和 KCl 溶液浸提得到的表层土壤 DON 含量更低,但更接近 Zhong 等[20]和 Kranabetter 等[39]报道的温带地区森林土壤的值.温度是影响土壤 DOM 的重要因素[40-41],本试验在冬季进行,这可能是本研究结果低于亚热带地区而更接近温带地区的重要原因.此外,本样地土壤总氮含量低于澳大利亚亚热带地区天然林土壤(2.1~7.5 $mg \cdot kg^{-1}$)[9]和中国亚热带地区杉木人工林土壤(3.0~3.7 $mg \cdot kg^{-1}$)[37]总氮含量,土壤总氮在一定程度上影响 DON 库大小,这也是本研究结果较低的原因.

冷水主要浸提储存于土壤溶液和土壤大孔隙中极不稳定可被微生物直接吸收利用的有机氮[42];热水主要浸提土壤微生物生物量、根系分泌物和溶解产物中的大部分易变性有机氮[23];盐溶液(2 $mol \cdot L^{-1}$)主要浸提粘土矿物中和有机质中可被吸附和可交换的有机氮[9,13-14].不同的方法浸提得到的土壤 DON 可以不同程度地指示土壤有机氮库的大小和可利用性.本研究发现,3 种方法浸提得到的 DON 含量及其占土壤总氮的分配比例均为热水>KCl>冷水,与 Burton 等[9]用冷水、热水、KCl 溶液等方法浸提澳大利亚地区天然林及人工林有机氮库大小排序一致.相关分析表明,3 种方法浸提得到的土壤 DON 含量相关性达到显著水平,表明冷水、热水和 KCl 溶液浸提出的有机氮库含有共同成分.虽然林分间表层土壤 DON 存在显著差异,但其占土壤总氮的分配比例在各林分间差异不显著.

3 种方法浸提得到的深层土壤 DON 含量较表层均下降,但林分类型对深层土壤 DON 含量的影响不显著.这与其他相关研究的结果一致[9,37].Wang 等[5]对亚热带区域树种转变研究发现,树种对土壤 DON 的影响局限在 0~10 cm 土层中;Burton 等[9]研究发现,澳大利亚地区土地利用变化对土壤 DON 的影响局限在 0~10 cm 土层.前人研究表明,林分对土壤 DON 的影响局限在表层土壤,原因是大多数功能根系集中在土壤表层[10],该层较高的根系活性和细根周转等有利于提高微生物的生物量和活性,从而导致表层土壤可溶性有机质的富集;此外,表层土壤富集大量的枯枝落叶,养分充足,通气和水热条件也较好,有利于提高微生物生物量和活性,但深层土壤生境条件变差,抑制微生物活性.因此,林分对深层土壤 DON 影响不显著.

参考文献

[1] Lu SB, Chen CR, Zhou XQ, *et al*. Responses of soil dissolved organic matter to long-term plantations of three coniferous tree species. *Geoderma*, 2012, **170**: 136-143

[2] Neff JC, Chapin Ⅲ FS, Vitousek PM. Breaks in the cycle: Dissolved organic nitrogen in terrestrial ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, **1**: 205-211

[3] Scaglia B, Adani F. Biodegradability of soil water soluble organic carbon extracted from seven different soils. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**: 641-646

[4] Huang ZQ, Xu ZH, Chen CR. Effect of mulching on labile soil organic matter pools, microbial community functional diversity and nitrogen transformations in two hardwood plantations of subtropical Australia. *Applied Soil Ecology*, 2008, **40**: 229-239

[5] Wang QK, Wang SL. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions. *Applied Soil Ecology*, 2011, **47**: 210-216

[6] Song LC, Hao JM, Cui XY. Soluble organic nitrogen in forest soils of northeast China. *Journal of Forestry Re-*

search, 2008, **19**: 53-57

[7] Chen CR, Xu ZH. Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, **8**: 363-378

[8] Kalbitz K, Solinger S, Park JH, *et al*. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, **165**: 277-304

[9] Burton J, Chen CR, Xu ZH, *et al*. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 2723-2734

[10] Chen CR, Xu ZH, Zhang SL, *et al*. Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical Australia. *Plant and Soil*, 2005, **277**: 285-297

[11] 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**: 1071-1081

[12] Ashagrie Y, Zech W, Guggenberger G. Transformation of a *Podocarpus falcatus* dominated natural forest into a monoculture *Eucalyptus globulus* plantation at Munesa, Ethiopia: Soil organic C, N and S dynamics in primary particle and aggregate-size fractions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **106**: 89-98

[13] Jones DL, Willett VB. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 991-999

[14] Murphy DV, Macdonald AJ, Stockdale EA, *et al*. Soluble organic nitrogen in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **30**: 374-387

[15] Xiang WH, Liu SH, Lei XD, *et al*. Secondary forest floristic composition, structure, and spatial pattern in subtropical China. *Journal of Research*, 2013, **18**: 111-120

[16] Zhou T (周　霆), Sheng W-T (盛炜彤). On the plantation sustainability in China. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2008, **21**(3): 49-53 (in Chinese)

[17] Yu Z-G (余正国), Zhong Q-H (钟琼和), Li M (李孟). Eucalyptus plantation soil fertility decline reason investigation and protection measures. *Tropical Forestry* (热带林业), 2009, **37**(3): 15-17 (in Chinese)

[18] Yu X-T (余新妥). Thinking of the problems of tree species structure adjustment in Fujian Province. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (福建林业科技), 2002, **29**(2): 1-4 (in Chinese)

[19] Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙), Gao H (高　洪), *et al*. Influence of land use on soil organic matter. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24**(4): 360-363 (in Chinese)

[20] Zhong ZK, Makeschin F. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**: 333-338

[21] Luan JW, Xiang CH, Liu SR, *et al*. Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen Mountain, Sichuan, China. *Geoderma*, 2010, **156**: 228-236

[22] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 2011, **338**: 143-158

[23] Curtin D, Wright CE, Beare MH, *et al*. Hot water-extractable nitrogen as an indicator of soil nitrogen availability. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**: 1512-1521

[24] Joergensen RG. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EC} value. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**: 25-31

[25] 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

[26] Xu Q-F (徐秋芳), Jiang P-K (姜培坤). Study on active organic carbon of soils under different types of vegetation. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2005, **18**(6): 84-87 (in Chinese)

[27] Neff JC, Asner GP. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model. *Ecosystems*, 2001, **4**: 29-48

[28] Filep T, Rékási M. Factors controlling dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and DOC/DON ratio in arable soils based on a dataset from Hungary. *Geoderma*, 2011, **162**: 312-318

[29] Jongkind AG, Velthorst E, Buurman P. Soil chemical properties under kauri (*Agathis australis*) in the Waitakere Ranges, New Zealand. *Geoderma*, 2007, **141**: 320-331

[30] Tipping E, Hurley MA. A model of solid-solution interactions in acid organic soils, based on the complexation properties of humic substances. *Journal of Soil Science*, 1988, **39**: 505-519

[31] Zech W, Guggenberger G, Schulten HR. Budgets and chemistry of dissolved organic carbon in forest soils: Effects of anthropogenic soil acidification. *Science of the Total Environment*, 1994, **152**: 49-62

[32] Jiang P-K (姜培坤). Soil active carbon pool under different types of vegetation. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2005, **41**(1): 10-13 (in Chinese)

[33] Chapman PJ, Reynolds B, Wheater HS. The seasonal variation in soil water acid neutralizing capacity in peaty podzols in Mid-Wales. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, **85**: 1089-1094

[34] Batjes NH. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 151-163

[35] Kaiser K, Zech W. Competitive sorption of dissolved organic matter fractions to soils and related mineral phases. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 64-69

[36] Taylor JP, Wilson B, Mills MS, *et al*. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**: 387-401

[37] Wan X-H (万晓华), Huang Z-Q (黄志群), He Z-M

(何宗明), *et al*. Tree species effects on soil dissolved organic matter pools in a reforested Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) woodland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(1): 12-18 (in Chinese)

[38] Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙), Feng Z-W (冯宗炜). Comparison of active soil organic carbon pool between Chinese fir plantations and evergreen broad-leaved forests. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2006, **28**(5): 1-6 (in Chinese)

[39] Kranabetter JM, Dawson CR, Dunn DE. Indices of dissolved organic nitrogen, ammonium and nitrate across productivity gradients of boreal forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 3147-3158

[40] Tipping E, Woof C, Rigg E, *et al*. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment. *Environment International*, 1999, **25**: 83-95

[41] Kawahigashi M, Sumida H, Yamamoto K. Seasonal changes in organic compounds in soil solutions obtained from volcanic ash soils under different land uses. *Geoderma*, 2003, **113**: 381-396

[42] Curtin D, Wen G. Organic matter fractions contributing to soil nitrogen mineralization potential. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**: 410-415

作者简介 肖好燕,女,1991 年生,硕士研究生. 主要从事森林土壤碳循环研究. E-mail: 642127962@ qq.com

责任编辑 孙 菊

肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响. 应用生态学报, 2016, **27**(4): 1031-1038

Xiao H-Y, Liu B, Yu Z-P, *et al*. Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(4): 1031-1038 (in Chinese)