

DOI:10.5846/stxb201402200300

中亚热带森林转换对土壤可溶性有机质数量与光谱学特征的影响

刘 翥^{1,2}, 杨玉盛^{1,2}, 朱锦懋^{1,2}, 谢锦升^{1,2}, 司友涛^{1,2,*}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要: 选取中亚热带福建三明格氏栲天然林及其转换而成的木荷、锥栗及福建柏等 3 种人工林表层土壤 (0—10 cm) 可溶性有机质 (DOM, Dissolved Organic Matter) 为对象, 对其数量和光谱学特征进行了研究, 以探讨森林转换对土壤 DOM 的影响。结果表明, 天然林转换成上述 3 种人工林后, 0—5 cm 土壤可溶性有机碳 (DOC, Dissolved Organic Carbon) 浓度显著降低 ($P < 0.05$), 降低程度分别为 66.1%, 69.9% 及 29.4%, 可溶性有机氮 (DON, Dissolved Organic Nitrogen) 浓度也有所下降; 除福建柏外, 其余两种人工林 5—10 cm 土壤 DOC 及 DON 浓度均低于天然林。各林分 0—5 cm 土壤 DOC 及 DON 浓度均高于 5—10 cm 土层。两个土层中, 天然林土壤 DOM 的芳香化及腐殖化程度均显著高于人工林 ($P < 0.05$), 但荧光效率值低于人工林; 荧光光谱图显示, 天然林土壤 DOM 在芳香性脂肪族及木质素类复杂结构荧光基团处的吸收大于人工林; 各林分土壤 DOM 傅里叶红外光谱出现吸收谱带的位置相似, 其中吸收强度最大的为形成氢键的—OH 的伸缩振动, 此外还有芳香性 C=C 伸缩振动、有机羧酸盐 COO⁻ 反对称伸缩振动、碳水化合物中烷氧基 C—O 的振动等, 人工林土壤 DOM 中碳水化合物的比例增加是其结构简单的主要原因。土壤 DOM 中结构复杂、分子量大的组分不易向下迁移; 天然林与人工林间土壤 DOM 数量及光谱学特征的差异主要与凋落物输入及营林措施的干扰有关; 本研究涉及的 3 种人工林中, 福建柏更有利于土壤养分的累积。

关键词: 天然林; 人工林; 可溶性有机碳; 可溶性有机氮; 紫外光谱; 荧光光谱; 红外光谱

Effects of forest conversion on quantities and spectroscopic characteristics of soil dissolved organic matter in subtropical China

LIU Zhu^{1,2}, YANG Yusheng^{1,2}, ZHU Jinmao^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2}, SI Youtao^{1,2,*}

1 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) is a crucial component of soil organic matter and is attracting more attention. It plays an important role in global C/N cycling, and mediates many soil processes. As a small but most active organic matter pool, structural and chemical characteristics of DOM is recently considered to be sensitive indicators of soil fertility. In many areas of southern China in 1960's, many natural broad-leafed forests were transformed into more productive plantations, the soil fertility recovery of which is now of great concern in the context of global climate change. However, little is known about how these conversions will affect the quantity and quality of soil DOM.

Different from conventional methods, spectroscopic methods can provide a lot of useful information on structural

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31100467); 国家自然科学基金项目(31070548); 福建省自然科学基金项目(2011J05105); 福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金项目(fjsdky2012008); 福建省公益类项目(K3-299)

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yt.si@fjnu.edu.cn

characteristics of DOM. Therefore, in this study we investigated the quantity and quality of soil DOM from a natural forest of *Castanopsis kawakamii* (NF) and three adjacent plantations of *Schima superba* (SCS), *Castanea henryi* (CAH) and *Fokienia hodginsii* (FOH) in Sanming Fujian province in subtropical China in terms of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) concentration, special ultraviolet-visible absorption (SUVA), humification index by emission fluorescence spectrum (HIX_{em}), humification index by synchronous fluorescence spectrum (HIX_{syn}), fluorescence efficiency (F_{eff}) and fourier transform infrared (FTIR). The results showed that, in 0—5 cm layer, the concentration of soil DOC decreased significantly ($P < 0.05$) after the NF transformed into SCS, CAH and FOH, and the proportion were 66.1%, 69.9%, 29.4% respectively, the concentration of soil DON also decreased; in 5—10 cm layer, concentration of soil DOC and DON in plantations except FOH were lower than those of NF. Concentration of soil DOC and DON in 0—5 cm layer were higher than those of 5—10 cm in all cases. The aromaticity and the humification indices (HIX_{em} , HIX_{syn}) of soil DOM from NF were significantly ($P < 0.05$) higher than those of plantations, and they all decreased with depth. F_{eff} of soil DOM increased after forest conversion. The fluorescence spectrum showed that, the relative absorption intensities of aromatic-aliphatic and lignin-derived fluorophores in soil DOM from NF were stronger than that of plantations. FTIR spectra of soil DOM from all forests featured —OH, aromatic C=C, —COO⁻, C—O of carbohydrates, but with varying relative intensities. A higher abundance of carbohydrate rendered soil DOM from plantations less complex. In comparison with plantations, soil DOM from natural forest was nutrient richer and contained more complex and highly condensed compounds, therefore it was better for the accumulation of organic matter, because molecules bearing more complex structure were more likely to be absorbed onto soil surface instead of being leached out of ecosystems. Overall, the differences of soil DOM between natural forests and plantations might be attributed to the changed litterfall input, forest managements and human activities, and FOH is the best for soil fertility recovery.

Key Words: natural forest; plantation; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen; ultraviolet spectrum; fluorescence spectrum; Fourier-transform infrared spectrum

我国亚热带被称为“北回归线荒漠带上的绿洲”，与同纬度的中亚、西亚及北非等地的荒漠、稀树草原景观不同，本区域四季分明、水热同季、生态系统生产力高，地带性植被为常绿阔叶林；然而长期以来，随着南方山地开发和商品林基地建设，大面积的天然常绿阔叶林被转换成各种人工林。森林转换初期林地土壤受到极大的干扰，后期地表凋落物的数量、化学组成，以及其分解过程均与天然林有较大不同，这必将给表层土壤（0—10 cm）有机质库带来显著影响^[1-3]。DOM（可溶性有机质，Dissolved Organic Matter）是土壤有机质库中最为活跃的部分，它既体现了地表凋落物的性质又能反映有机质在土壤中的腐殖化、吸附等一系列物理化学过程，因而能最敏感的反映土壤有机质的变化。它不仅关乎养分的有效性，是植物和微生物的重要养分来源；同时又因高度的流动性关系到土壤的 C 吸存，是底层土壤有机质最主要的来源之一，影响着生态系统的生产力及可持续性^[4-5]。

全球气候变化背景下，土壤中 DOM 的数量和结构特征与森林转换导致的土壤有机质的储量和稳定性的变化密切相关。DOM 操作上的定义是指能通过 0.45 μm 滤膜的不同大小和结构的有机分子混合物，包括可溶性有机碳（Dissolved Organic Carbon, DOC）及可溶性有机氮（Dissolved Organic Nitrogen, DON）等^[6]，成分的复杂性给 DOM 的性质分析带来一定的挑战。

DOM 的数量特征常用 DOC、DON 等组分的浓度来表示。而 DOM 结构复杂,传统的分析方法常具有一定的局限性。如亲疏水性分组法得到的两类物质之间并没有严格明确的界限,每类物质均包含复杂的混合物。新近兴起的红外光谱法操作简便快速,结果准确可靠,能够反映 DOM 中化合物的官能团组成及比例信息^[7];紫外可见光谱分析方法简单且对样品无损坏,能够对 DOM 进行半定量的检测^[8];荧光光谱分析是一种高效且信息丰富的分析手段^[9]。因此,光谱学研究方法的引入将使我们森林转换后土壤 DOM 的变化有更加全面的了解。

福建省三明市莘口格氏栲 (*Castanopsis kawakamii*) 保护区内的格氏栲天然林是目前保存较为完整的中国亚热带天然常绿阔叶林,其树龄约为 160 年,面积 700 hm²。20 世纪 60 年代,部分格氏栲天然林被皆伐、炼山、整地后营造成结构单一的人工纯林,这些人工林与现存格氏栲天然林毗邻、本底条件(母岩、土壤层次、土层厚度)相似,从而为探讨森林转换对土壤 DOM 数量与光谱学特征的影响提供了良好的试验地条件^[10]。本研究选取格氏栲天然林及其转换而成的木荷 (*Schima superba*)、锥栗 (*Castanea henryi*) 及福建柏 (*Fokienia hodginsii*) 等 3 种人工林为研究对象,探讨天然林转换成不同树种的人工林后,土壤 DOM 的数量和光谱学特征所发生的变化,以期揭示森林转换对土壤可溶性有机质的影响机理及我国人工林的经营和树种选择提供依据。

1 试验地概况

试验地位于福建省三明市莘口教学林场 (26°11'N, 117°26'E), 东南面和西北面分别与戴云山脉和武夷山脉相连;属中亚热带季风气候,年均气温 19.4 °C,年均降水量 1605.9 mm,年均蒸发量 1585 mm,相对湿度 81%,全年无霜期为 300 d;土壤为砂质页岩发育的红壤,土层厚度超过 1 m。

格氏栲天然林林龄约 160 年,群落结构组成复杂,其中格氏栲占优势。灌木层主要有狗骨柴 (*Tricalysia dubia*) 和毛冬青 (*Ilex pubescens*) 等,草本层以狗脊 (*Woodwardia japonica*) 和芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 为主^[11]。

3 种人工林林龄接近 50 年,初植密度均为 2500 株/hm² 左右,幼苗栽种 10 年后,进行卫生伐,20 年后进行间伐,期间有除草、松土等措施;锥栗林每年劈草 3 次,在达到成熟期后,落果几乎全被人工采收。3 种人工林林冠皆为单层。林下植被主要有毛冬青 (*Ilex pubescens*)、芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*)、矩叶鼠刺 (*Itea oblonga*) 及狗骨柴 (*Tricalysia dubia*) 等^[12],各林分基本特征和土壤性质见表 1。

2 研究方法

2.1 样品采集

2013 年 7 月进行采样。使用网格法取土,在每个林分内布设 3 块 30 m×30 m 的样地,将每块样地平均划分成 100 个网格,从这 100 个网格中随机抽取 30 个,使用土钻按 0—5 cm 及 5—10 cm 分层取样。样品带回室内,去除石砾、碎屑以及植物根系,每块样地内相同层次土样混合均匀,取一部分用于测定含水率,其余过 2 mm 土壤筛,用于提取 DOM。取部分过筛的土壤风干并研磨过 0.149 mm 筛用于测定土壤有机碳

及全氮。

表 1 各林分特征和土壤性质

Table 1 Forest characteristics and soil properties of the study sites

因子 Parameters	林分类型 Forest type ⁽¹⁾			
	NF	SCS	CAH	FOH
林分特征 Stand characteristics				
林龄 Stand age /a	>160	46	46	47
海拔 Altitude /m	343	216	216	223
坡度 Gradient	30°	21°	30°	21°
平均树高 Mean tree height /m ⁽²⁾	35.1	22.3	13.9	19.5
平均胸径 Mean DBH /cm ⁽²⁾	57.7	17.0	23.5	25.6
立木密度 Stand density/(stem·hm ⁻²) ⁽²⁾	178	356	267	317
土壤性质 Soil properties (top 10 cm)				
密度 Soil density/(g·cm ⁻³)	1.11	1.28	1.32	0.94
有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	22.0	13.9	14.2	33.9
全 N Total N/(g·kg ⁻¹)	1.6	1.2	1.3	2.1
碳氮比 Ratio of C/N	13.8	11.4	10.6	15.9
pH (H ₂ O)	4.65	4.70	4.52	5.17

(1) NF, 格氏栲天然林 natural forest of *Castanopsis kawakamii*; SCS, 木荷人工林 *Schima superba* plantation; CAH, 锥栗人工林 *Castanea henryi* plantation; FOH 福建柏人工林 *Fokienia hodginsii* plantation; (2) 只涉及优势种 Dominant tree species considered only

2.2 土壤性质的测定

土壤有机碳及全氮使用 Elementar Vario MAX 碳氮分析仪测定, pH 值使用 CHN868 型 pH 计 (Thermo Orion) 测定, 土壤密度采用环刀法测定。

2.3 DOM 的提取

样品 DOM 采用水浸提法^[13], 取 15 g 鲜土于离心管中, 加入去离子水 (水土比 2:1, V/W), 震荡 30 min 后离心 10 min (4000 r/min), 用 0.45 μm 滤膜过滤, 滤液中有机物即为 DOM。

2.4 DOC、DON 浓度的测定

采用岛津 TOC-VcPh 有机碳分析仪测定样品 DOC 浓度, 使用连续流动分析仪 (Skalar San⁺⁺, Netherlands) 测定 DON 浓度。

2.5 光谱分析

使用 UV-2450 (岛津) 紫外可见分光光度计测定紫外可见吸光值, 通过检测待测液在波长 254 nm 处的吸收值 (Special Ultraviolet-Visible Absorption, SUVA) 来分析其芳香化程度。SUVA 也称为“芳香性指数 (Aromaticity Index, AI)”, 计算方法为: $(UV_{254}/DOC) \cdot 100$ ^[14-15]。

荧光光谱使用日立 F7000 仪器进行测定, 激发和发射光栅狭缝宽度都为 10 nm, 扫描速度 1200 nm/min, 激发波长 254 nm, 荧光发射光谱 (Emission Fluorescence) 波长范围 300—480 nm, 荧光同步光谱 (Synchronous Fluorescence) 波长范围 250—500 nm。荧光发射光谱中 ($\sum 435—480$ nm) 区域与 ($\sum 300—345$ nm) 区域

的峰面积比值被称为荧光发射光谱腐殖化指数 (Humification Index, emission mode, HIX_{em}), 荧光同步光谱波长 460 nm 与 345 nm 处荧光强度的比值为荧光同步光谱腐殖化指数 (Humification Index, synchronous mode, HIX_{syn})^[9, 16]; 荧光效率 (Fluorescence Efficiency, F_{eff}) 计算方法为样品荧光发射光谱的最大荧光强度 (Maximum Fluorescence Intensity, F_{max}) 除以其 SUVA 值^[17]。为提高灵敏度, 荧光光谱测定前使用 2 M 盐酸将所有待测液的 pH 值调成 2^[14]。

将 1 mg 冷冻干燥的样品与 400 mg 干燥的 KBr (光谱纯) 磨细混匀, 在 10 t/cm² 压强下压成薄片并维持 1 min, 用 FTIR 光谱仪 (Nicolet Magna FTIR 550) 测定并记录其红外光谱, 波谱扫描范围为 4000—400 cm⁻¹。

2.6 数据处理与分析

数据分析在 SPSS 17.0 中进行, 采用方差分析和 LSD 比较不同林分、不同土层土壤 DOM 数量和性质的差异性, 显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。相关图表制作在 Excel 中完成。

3 结果与分析

3.1 各林分土壤 DOC 及 DON 浓度

在 0—5 cm 土层, 格氏栲天然林 DOC 浓度 (41.68 mg/kg) 分别是木荷人工林 (14.16 mg/kg)、锥栗人工林 (12.56 mg/kg) 及福建柏人工林 (29.44 mg/kg) 的 2.9、3.3 和 1.4 倍, 差异达到显著水平 ($P<0.05$), 3 种人工林中, 福建柏土壤 DOC 浓度显著高于其余两种人工林 ($P<0.05$); 5—10 cm 土层中, 各林分土壤 DOC 浓度差异较小, 其中福建柏人工林浓度最高 (13.69 mg/kg)。各林分 0—5 cm 土壤 DOC 浓度均高于 5—10 cm 土层, 其中格氏栲天然林及福建柏人工林上下两土层差异显著 ($P<0.05$) (图 1A)。

0—5 cm 土层内, 格氏栲天然林土壤 DON 浓度最高, 为 5.38 mg/kg, 但仅显著高于锥栗人工林 (1.49 mg/kg) ($P<0.05$); 在 5—10 cm 土层内, DON 浓度最高的是福建柏人工林, 为 4.17 mg/kg, 显著高于其余林分 ($P<0.05$)。各林分 0—5 cm 土壤 DON 浓度均高于 5—10 cm 土层 (图 1B)。

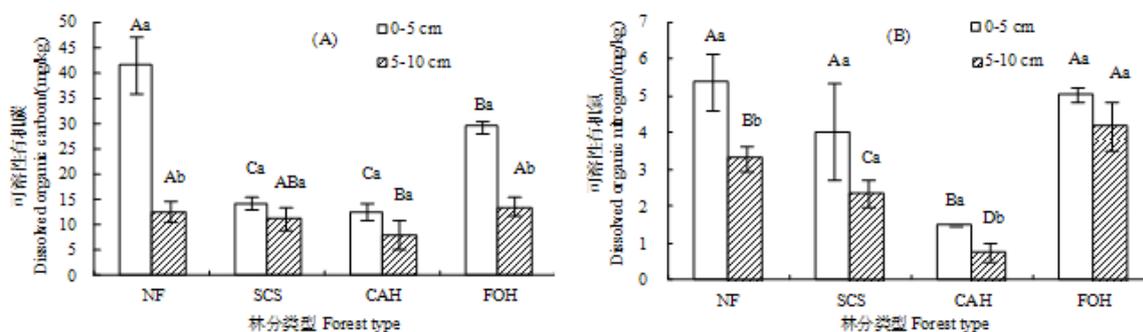


图 1 各林分土壤 DOC 及 DON 浓度

Fig.1 Concentration of soil DOC and DON in different forests

NF, 格氏栲天然林 natural forest of *Castanopsis kawakamii*; SCS, 木荷人工林 *Schima superba* plantation; CAH, 锥栗人工林 *Castanea henryi* plantation; FOH 福建柏人工林 *Fokienia hodginsii* plantation. 不同大写字母表示同一土层内不同林分间差异显著, 不同小写字母表示同一林分不同土层间差异显著 ($P<0.05$)。图中数据为平均值±标准差 ($n=3$)。

3.2 各林分土壤 DOM 紫外光谱特征

从图 4A 中可以看出,天然林转换成人工林后,土壤 DOM 的 SUVA 值显著降低 ($P < 0.05$),在 0—5 cm 土层,降低幅度为 45%—74.3%,5—10 cm 土层内则降低了 54.3%—82.9%。所有林分 0—5 cm 土壤 DOM 的 SUVA 值均显著高于 5—10 cm 土层 ($P < 0.05$),在 3 种人工林中,福建柏人工林土壤 DOM 的 SUVA 值最高。

3.3 各林分土壤 DOM 荧光光谱特征

图 2 为各林分土壤 DOM 荧光发射光谱图。两个土层中,天然林土壤 DOM 波峰所对应的波长均较大。3 种人工林同一土层土壤 DOM 所得到的峰型相似,0—5 cm 土壤 DOM 的波峰所对应的波长主要集中在 425—429 nm,而 5—10 cm 土层则集中在波长较短的 354—366 nm。

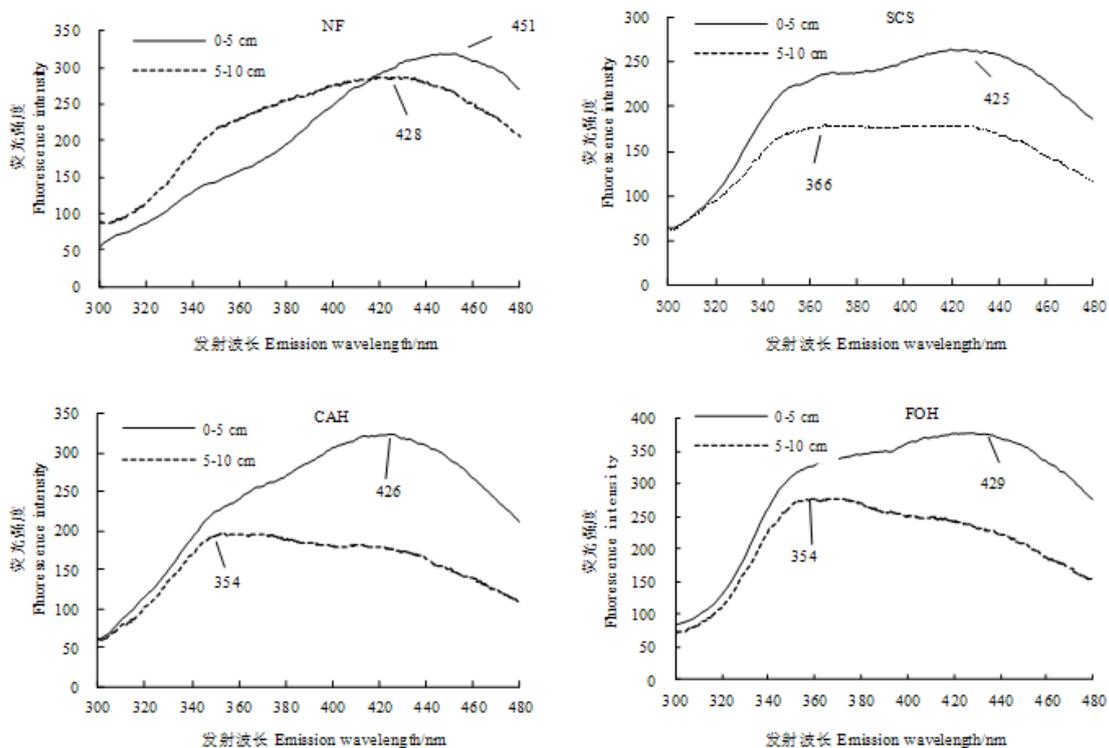


图 2 不同林分土壤 DOM 荧光发射光谱图

Fig.2 Fluorescence emission spectra of soil DOM in different forests

NF, 格氏栲天然林 natural forest of *Castanopsis kawakamii*; SCS, 木荷人工林 *Schima superba* plantation; CAH, 锥栗人工林 *Castanea henryi* plantation; FOH 福建柏人工林 *Fokienia hodginsii* plantation. 由于同一林分中 3 块样地的土壤 DOM 所得谱图类似,为简便起见,只选择其中 1 个列出。

图 3 为各林分土壤 DOM 荧光同步光谱图。从图中可以看出,各林分土壤 DOM 样品的特征峰主要有以下 3 个: 1. λ_{ex} 285—290 nm, 代表类蛋白质基团,如芳香氨基酸等; 2. λ_{ex} 349—381 nm, 代表芳香性脂肪族基团; 3. λ_{ex} 450—453 nm, 代表木质素类基团。各林分出现特征峰的位置大致相同,但相对峰面积不同,天然林在波长 380 nm 及 453 nm 附近的相对峰面积较大,而 3 种人工林在短波长位置的相对吸收峰面积较大。

在两个土层中,格氏栲天然林土壤 DOM 的 HIX_{em} 值均显著高于 3 种人工林 ($P < 0.05$)。0—5 cm 土层

中,天然林土壤 DOM 的 HIX_{em} 值分别是木荷、锥栗及福建柏的 1.7、1.6 及 1.6 倍,在 5—10 cm 土层,前者的 HIX_{em} 值为后三者的 1.4 倍;3 种人工林土壤 DOM 的 HIX_{em} 值差异不显著 ($P>0.05$) (图 4B)。从图

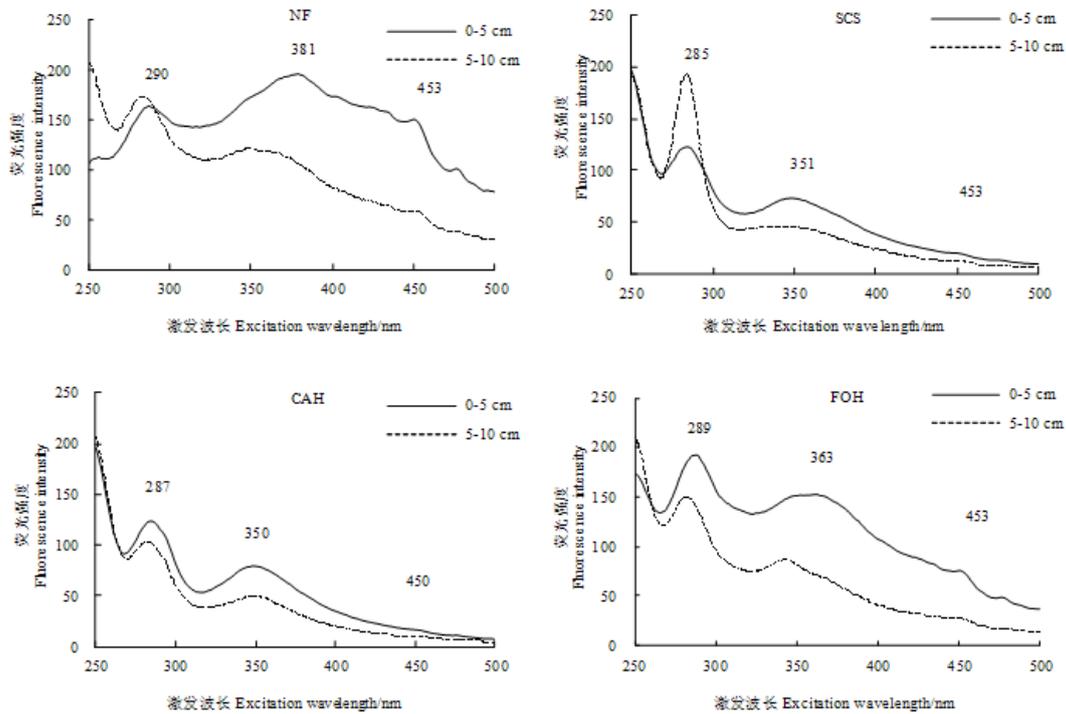


图 3 不同林分土壤 DOM 荧光同步光谱图

Fig.3 Synchronous fluorescence spectra of soil DOM in different forests

NF, 格氏栲天然林 natural forest of *Castanopsis kawakamii*; SCS, 木荷人工林 *Schima superba* plantation; CAH, 锥栗人工林 *Castanea henryi* plantation; FOH 福建柏人工林 *Fokienia hodginsii* plantation. 由于同一林分中 3 块样地的土壤 DOM 所得谱图类似,为简便起见,只选择其中 1 个列出。

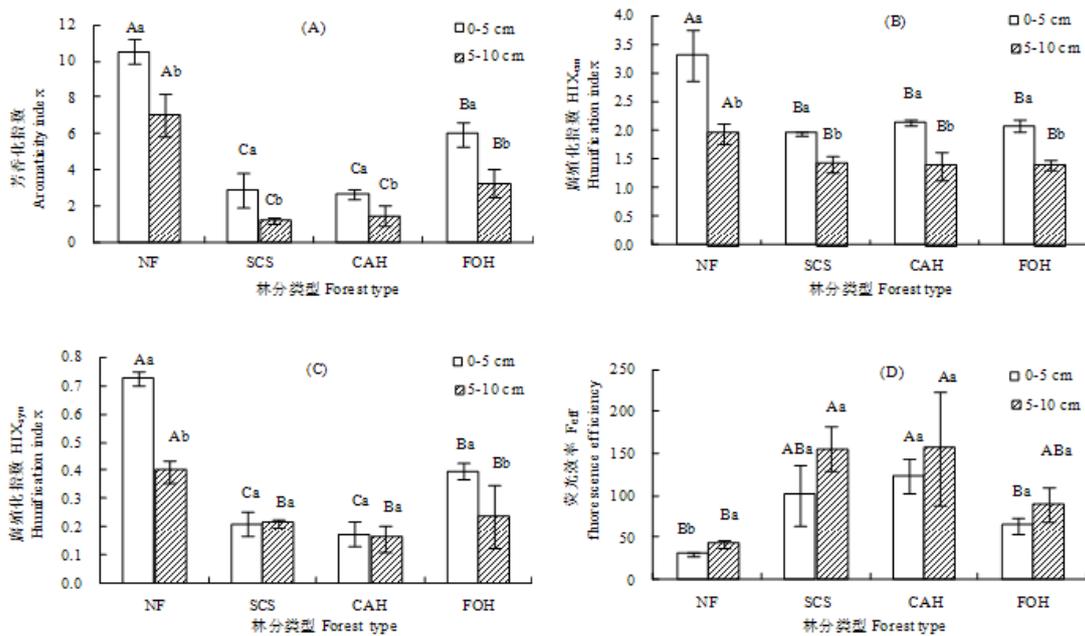


图 4 各林分土壤 DOM 的光谱学特征

Fig.4 Spectroscopic characteristics of soil DOM in different forests

NF, 格氏栲天然林 natural forest of *Castanopsis kawakamii*; SCS, 木荷人工林 *Schima superba* plantation; CAH, 锥栗人工林 *Castanea henryi* plantation; FOH 福建柏人工林 *Fokienia hodginsii* plantation. 不同大写字母表示同一土层内不同林分间差异显著,不同小写字母表示同一林分不同土层间差异显著 ($P<0.05$)。图中数据为平均值±标准差 ($n=3$)。

4C 中可以看出,天然林土壤 DOM 的 HIX_{syn} 值高于 3 种人工林,差异达显著水平 ($P<0.05$),3 种人工林中,福建柏人工林土壤 DOM 的 HIX_{syn} 值最高。随着土层的加深,各林分土壤 DOM 的 HIX_{em} 及 HIX_{syn} 值均下降。

由图 4D 可知,各林分土壤 DOM 的 F_{eff} 值变化趋势与 SUVA 及 HIX 不同,森林转换后,土壤 DOM 的 F_{eff} 值显著升高 ($P<0.05$),在 0—5 cm 土层,升高幅度为 111%—305%,5—10 cm 土层升高幅度则为 115%—273%。3 种人工林中,福建柏土壤 DOM 的 F_{eff} 值低于木荷及锥栗。各林分 0—5 cm 土层土壤 DOM 的 F_{eff} 值均小于 5—10 cm 土层。

3.4 各林分土壤 DOM 傅里叶红外光谱分析

由图 5 可知,格氏栲天然林 0—5 cm 土壤 DOM 中所含有的官能团主要为: 3400 cm^{-1} 附近的羟基, 2927 cm^{-1} 及 2856 cm^{-1} 处的亚甲基, 1632 cm^{-1} 处的双键, 1388 cm^{-1} 处的甲基及 1109 、 1020 cm^{-1} 处的碳水化合物; 5—10 cm 土壤 DOM 中所含有的官能团主要为: 3406 cm^{-1} 处的羟基, 2978 、 1387 cm^{-1} 处的甲基, 2926 cm^{-1} 处的亚甲基, 1624 和 1435 cm^{-1} 处的羧酸盐及 1192 、 1140 、 1105 及 1041 cm^{-1} 处的碳水化合物。

天然林转换为木荷人工林后,0—5 cm 土层中 1383 cm^{-1} 处甲基的吸收比例上升, 1142 、 1120 cm^{-1} 处碳水化合物的比例也上升,且向高波数方向移动,这表明了酚类物质的增加; 5—10 cm 土壤的红外吸收和 0—5 cm 土层很相似,只是 2854 cm^{-1} 处的吸收略下降,多了 1196 cm^{-1} 的弱吸收; 与天然林 5—10 cm 土层相比,木荷人工林 2978 cm^{-1} 处甲基的吸收比例减小,但 1385 cm^{-1} 的比例明显增加。

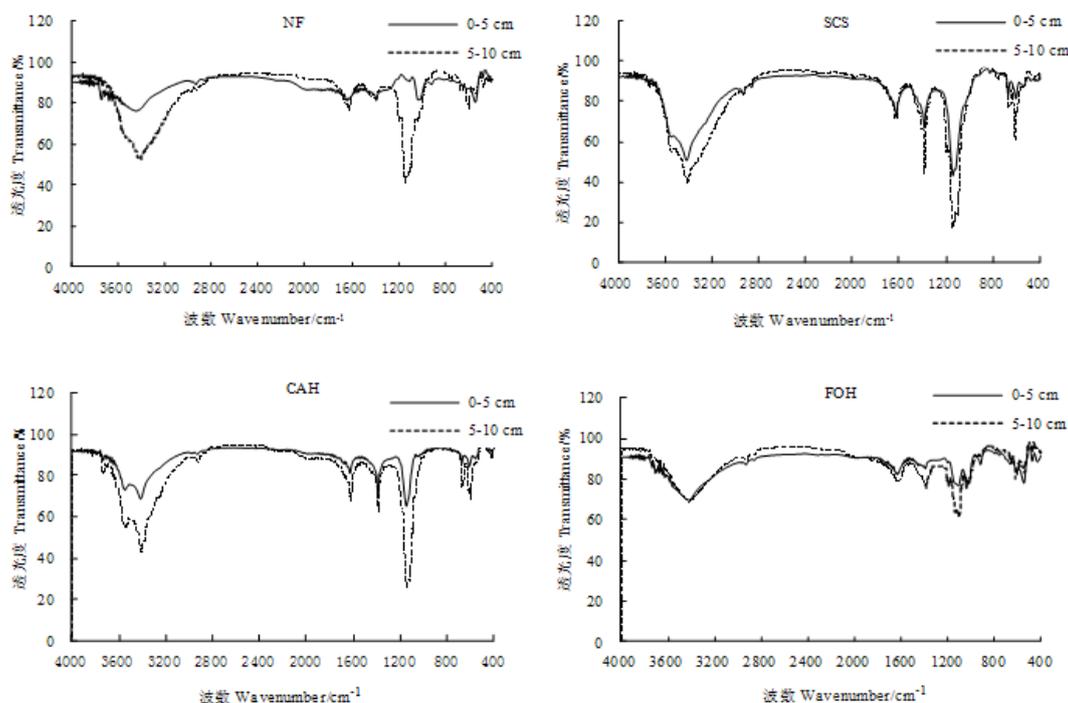


图 5 不同林分土壤 DOM 红外光谱图

Fig.5 FTIR spectra of DOM in different forests

NF, 格氏栲天然林 natural forest of *Castanopsis kawakamii*; SCS, 木荷人工林 *Schima superba* plantation; CAH, 锥栗人工林 *Castanea henryi* plantation; FOH 福建柏人工林 *Fokienia hodginsii* plantation. 由于同一林分中 3 块样地的土壤 DOM 所得谱图类似,为简便起见,只选择其中 1 个列出。

天然林转换为锥栗人工林后, 0—5 cm 土层中 3545 及 1387 cm^{-1} 处的吸收明显增强, 而 1626 cm^{-1} 处吸收减弱, 碳水化合物的吸收峰向高波数 1140 cm^{-1} 移动且比例增加; 5—10 cm 和 0—5 cm 土壤 DOM 所得谱图相似, 但 3545 cm^{-1} 处的吸收更明显。

3 种人工林中, 福建柏土壤 DOM 所得谱图与天然林最为相似, 但仍存在一些区别。如 0—5 cm 土层中 1105 cm^{-1} 处的吸收明显增加; 5—10 cm 土层中, 亚甲基减少, 甲基增加且其弯曲振动吸收变强; 1200—1100 cm^{-1} 的吸收变得复杂且比例继续增加。

4 讨论

4.1 森林转换对土壤可溶性有机碳及可溶性有机氮浓度的影响

本研究结果表明, 格氏栲天然林转换成木荷、锥栗及福建柏人工林后, 0—5 cm 土壤可溶性有机碳浓度显著降低 ($P < 0.05$) (图 1A), 这与周程爱^[18]及 Chen^[19]等人的研究结果一致。造成森林转换后土壤可溶性有机质减少的原因可概括为以下几个方面: 1. 人工林造林初期营林措施 (皆伐、炼山、整地) 的干扰。皆伐火烧使采伐剩余物及枯枝落叶层 C 库损失殆尽; 同时, 部分表层土壤有机碳也在火烧的过程中因挥发而损失; 而整地使土壤透气性增加、微生物活动加强, 从而加速了土壤有机质的分解^[3, 20]。2. 凋落物归还量的差异。人工林在幼林时期, 地上凋落物的归还量极少, 且研究表明, 在人工林达到成熟后, 其凋落物归还量仍显著低于天然林^[3, 20]。3. 人工林管理方式的影响。人工林在管理过程中所采取的间伐、劈草等措施, 进一步减少了土壤有机碳库的输入^[3, 20]。在这些因素的共同作用下, 森林转换后, 土壤可溶性有机碳浓度呈现出下降的趋势。各林分 5—10 cm 土层 DOC 浓度差异较小, 说明初期营林措施对这一土层土壤的影响相对较小; 同时福建柏 5—10 cm 土层 DOC 浓度略高于天然林, 结合福建柏土壤有机碳浓度较高的事实 (表 1), 说明福建柏人工林土壤有机碳恢复较快, 其原因可能与福建柏凋落物中有机质的结构有关 (见下文分析)。3 种人工林中, 福建柏土壤可溶性有机质浓度最高, 而锥栗最低 (图 1A)。研究表明, 福建柏人工林年凋落物量为 7318.3 kg/hm^2 , 而锥栗林仅为 2414.6 kg/hm^2 , 远低于前者^[12, 21]; 此外, 锥栗作为一种果树, 受人为干扰较严重, 其落果的采收进一步降低了凋落物的归还量, 从而导致了土壤可溶性有机碳来源的减少, 由此可见, 不同树种人工林间土壤可溶性有机质浓度的差异主要受凋落物归还量的影响, 这与 Li^[22]及 Wu^[13]等人的研究结果一致。

可溶性有机氮在森林生态系统土壤氮循环过程中发挥着重要作用^[23], 其数量及结构组成受一系列生物及非生物因素的影响, 如树种、土壤有机质的输入及森林管理措施等^[23-25], 而森林转换也主要通过影响这些因素来改变土壤可溶性有机氮库。本研究结果显示, 格氏栲天然林转换成 3 种人工林后, 土壤可溶性有机氮浓度总体呈下降趋势 (图 1B)。Burton 等^[23]的研究也表明, 澳大利亚东南部的天然林转换成南洋杉 (*Araucaria cunninghamii*) (53 年生) 后, 0—10 cm 土层的可溶性有机氮浓度显著降低。而 Fujii 等^[26]却指出, 天然林转变成耕地后, 受有机肥料添加的影响, 土壤可溶性有机氮的浓度升高。这表明, 土壤可溶性有机氮库受自然条件及人类活动的共同影响。天然林受人类干扰较少, 物种丰富, 地上凋落物归还量大

[2, 11], 因此, 森林转换后, 土壤可溶性有机氮的浓度降低。3 种人工林中, 福建柏土壤可溶性有机氮浓度最高, 这与其凋落物量大且 N 含量高有关^[12]。

4.2 森林转换对土壤可溶性有机质光谱学特征的影响

天然林转换成人工林后, 土壤有机质的恢复需要一个较长的过程, 结构复杂的大分子有机质的积累就更慢。与天然林相比, 人工林凋落物数量少, 养分含量低且分解速度慢^[2], 因此, 人工林凋落物在分解过程中释放分解产物的速度较慢, 而分解产物中木质素等结构复杂物质的积累将增加土壤有机质的芳香化程度。本研究结果表明, 人工林土壤 DOM 的 SUVA 值显著低于天然林 ($P < 0.05$) (图 4A), 说明天然林土壤 DOM 中含有更多芳香化合物, 如木质素类难分解物质^[27]; 荧光发射光谱中波峰向短波方向移动意味着人工林土壤 DOM 分子中共轭体系减少, 分子结构变得简单, 而芳环是最常见的共轭体系, 因此和 SUVA 的结果吻合; 与此对应的是, 荧光同步光谱所得到的几个特征峰中, 来自木质素类基团的吸收是天然林和福建柏人工林土壤 DOM 的最大吸收。

荧光发射光谱和荧光同步光谱给出的腐殖化指数 (HIX_{em} 、 HIX_{syn}) 可以用来表征 DOM 的腐殖化程度^[28]; 本研究中, 天然林转换成人工林后, 土壤 DOM 腐殖化指数显著降低 ($P < 0.05$) (图 4B、图 4C), 说明天然林土壤 DOM 中含有更多结构复杂且不易分解及迁移的成分。荧光效率被认为与荧光基团的量子效率呈比例关系, 天然林转换成人工林后土壤 DOM 的荧光效率值升高(图 4D), 这表明虽然人工林土壤 DOM 浓度相对较低, 但其中的荧光物质主要是含有 π 电子的物质。红外光谱显示, 人工林土壤 DOM 含有的结构简单的物质主要是小分子烷烃或碳水化合物。

天然林转换成人工林的过程中, 土壤有机质经历了一个先流失后积累的过程。造林初期土壤受扰动较大, 土壤有机质结构遭到破坏, 因此一些成分复杂、分子量大的组分发生了分解和转化, 其中 0—5 cm 土壤受到的干扰大于 5—10 cm 土壤。后期恢复过程中, 凋落物中的有机质直接归还到 0—5 cm 土壤中, 因此这一土层的 DOM 更能反映凋落物的性质, 结构复杂且差异性较大; 5—10 cm 土层 DOM 主要来自于上层土壤 DOM 的迁移, 因此其含有更多流动性高的小分子物质。从天然林到人工林, 0—5 cm 土壤 DOM 荧光发射光谱中的波峰由 451 nm 移动到 425—429 nm, 变化幅度较小; 对于 5—10 cm 土层, 这个数值从 428 nm 移动到 354—366 nm, 变化幅度较大; 这与 5—10 cm 土壤 DOM 的 SUVA 变化幅度较大吻合。各林分 0—5 cm 土层 DOM 的芳香化及腐殖化程度均高于 5—10 cm 土层, 这与 Bu^[29]等及 Bi^[30]等人的研究结果一致, 这表明上层土壤 DOM 中含有更多分子量、结构复杂的物质, 这类物质不易向下迁移, 因为土壤类似于一个层析系统, 流动性高的物质更易向下迁移^[31]。红外光谱显示, 5—10 cm 土壤 DOM 较 0—5 cm 含有更多羟基、羧酸类以及碳水化合物中的烷氧基等结构简单易迁移的物质, 这与 SUVA、HIX 及 F_{eff} 的规律吻合。不同树种人工林间土壤 DOM 光谱学特征的差异可能来源于凋落物性质的不同^[32], 福建柏土壤 DOM 结构最为复杂且浓度最高, 在 5—10 cm 土层中其浓度甚至高于天然林, 根据红外光谱分析结果我们可以推测, 其原因可能来自于福建柏凋落物 DOM 结构与土壤 DOM 结构的相似性, 这种相似性有利于土

壤 DOM 的积累。3 种人工林同一土层土壤 DOM 的红外吸收差异主要在碳水化合物区和甲基弯曲振动区。

5 结论

天然林转换成人工林后, 土壤有机质的恢复需要一个漫长的过程。对于大部分人工林, 50 年的时间不足以使土壤有机质恢复到天然林的水平, 其中腐殖化程度高的大分子物质的积累较慢是一个主要原因。但是, 如果人工林凋落物中的 DOM 的结构和土壤 DOM 的结构相似, 土壤有机质就有可能在较短的时间内恢复甚至超过天然林的水平。因此, 未来森林转换应注意转换前后两种林分凋落物所释放的有机质的结构的差异, 相似程度高的树种不仅可以为人类提供木材, 还可以使土壤较快的恢复肥力。

参考文献:

- [1] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 何宗明, 陈光水. 格氏栲天然林与人工林粗木质残体碳库及养分库. 林业科学, 2005, 41(3): 7-11.
- [2] 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬, 林瑞余, 陈光水, 何宗明, 谢锦升. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解(英文). 生态学报, 2003, 23(7): 1278-1289.
- [3] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 李灵, 谢锦升, 林鹏. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配. 生态学报, 2004, 24(1): 1-7.
- [4] 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(3-4): 312-318.
- [5] Lu S B, Chen C R, Zhou X Q, Xu Z H, Bacon G, Rui Y C, Guo X M. Responses of soil dissolved organic matter to long-term plantations of three coniferous tree species. *Geoderma*, 2012, 170: 136-143.
- [6] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [7] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应. 生态学报, 2002, 22(2): 259-269.
- [8] 钱伟, 杨玉盛, 曾宏达, 汪伟, 黄辉, 李熙波. 内河 DOM 降解的三维荧光、紫外光谱研究—以白马河为例. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(3): 42-48.
- [9] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, Steinweg B, Saccomandi F. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere*, 1999, 38(1): 45-50.
- [10] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 谢锦升, 高人, 李震, 金钊. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. 生态学报, 2005, 25(7): 1684-1690.
- [11] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 黄荣珍, 陈银秀, 何宗明. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. 生态学报, 2003, 23(9): 1719-1730.
- [12] 杨玉盛, 陈银秀, 何宗明, 郭剑芬, 刘春华. 福建柏和杉木人工林凋落物性质的比较. 林业科学, 2004, 40(1): 2-10.
- [13] Wu J S, Jiang P K, Chang S X, Xu Q F, Lin Y. 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(1): 27-36.
- [14] Akagi J, Zsolnay Á, Bastida F. Quantity and spectroscopic properties of soil dissolved organic matter (DOM) as a function of soil sample treatments: Air-drying and pre-incubation. *Chemosphere*, 2007, 69(7): 1040-1046.
- [15] Corvasce M, Zsolnay A, D'Orazio V, Lopez R, Miano T M. Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile. *Chemosphere*, 2006, 62(10): 1583-1590.
- [16] Kalbitz K, Geyer W, Geyer S. Spectroscopic properties of dissolved humic substances—a reflection of land use history in a fen area. *Biogeochemistry*, 1999, 47(2): 219-238.
- [17] Zsolnay A. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions. *Geoderma*, 2003, 113(3-4): 187-209.
- [18] 周程爱, 张于光, 肖焯, 张小全, 李迪强. 土地利用变化对川西米亚罗林土壤活性碳库的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4542-4547.
- [19] Chen C R, Xu Z H, Mathers N J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(1): 282-291.

- [20] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 何宗明, 谢锦升, 陈光水. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. *生态学报*, 2004, 24(2): 359-367.
- [21] 刘强, 王超, 杨智杰, 陈光水, 黄锦学, 黄蓉, 田浩. 福建建瓯万木林柑橘与锥栗凋落物数量、组成及动态. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(4): 29-34.
- [22] Li Y, Zhang J, Chang S X, Jiang P, Zhou G, Shen Z, Wu J, Lin L, Wang Z, Shen M. Converting native shrub forests to Chinese chestnut plantations and subsequent intensive management affected soil C and N pools. *Forest Ecology and Management*, 2014, 312: 161-169.
- [23] Burton J, Chen C R, Xu Z H, Ghadiri H. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2723-2734.
- [24] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*, 2003, 113(3-4): 357-380.
- [25] 万晓华, 黄志群, 何宗明, 胡振宏, 余再鹏, 王民焯, 杨玉盛, 范少辉. 杉木采伐迹地造林树种转变对土壤可溶性有机质的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 12-18.
- [26] Fujii K, Funakawa S, Hayakawa C, Kosaki T. Fluxes of dissolved organic carbon and nitrogen in cropland and adjacent forests in a clay-rich Ultisol of Thailand and a sandy Ultisol of Indonesia. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 267-275.
- [27] Kiem R, Kögel-Knabner I. Contribution of lignin and polysaccharides to the refractory carbon pool in C-depleted arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1): 101-118.
- [28] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter. *Environmental Science Technology*, 2002, 36(4): 742-746.
- [29] Bu X L, Wang L M, Ma W B, Yu X N, McDowell W H, Ruan H H. Spectroscopic characterization of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types along an elevation gradient in the Wuyi Mountains. *Geoderma*, 2010, 159(1-2): 139-146.
- [30] Bi R, Lu Q, Yuan T, Zhou S G, Yuan Y, Cai Y F. Electrochemical and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter in a forest soil profile. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(10): 2093-2101.
- [31] Michel K, Matzner E, Dignac M F, Kögel-Knabner I. Properties of dissolved organic matter related to soil organic matter quality and nitrogen additions in Norway spruce forest floors. *Geoderma*, 2006, 130(3-4): 250-264.
- [32] Traversa A, D'Orazio V, Senesi N. Properties of dissolved organic matter in forest soils: influence of different plant covering. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(12): 2018-2028.