

不同林龄云南松人工林土壤腐殖质的组成分析

柏松¹, 罗敏², 何帅¹, 景连东¹, 李晖¹

(1. 西南民族大学化学与环境保护工程学院, 四川 成都 610041; 2. 西南民族大学期刊社, 四川 成都 610041)

摘要: 为了解不同林龄阶段人工林土壤腐殖质化学组成和结构特征差异, 以云南松人工纯林为研究对象, 利用土壤化学分组及傅里叶变换红外光谱等研究手段, 对土壤胡敏酸(HA)和富里酸(FA)的结构特征进行分析。结果表明, 随着造林时间增加, 土壤pH呈下降趋势, 造林年限增加27年, 土壤pH下降0.6个单位。幼林阶段土壤C、C/H高于中龄林和成熟林阶段, 而土壤N、H、C/N随造林年限增加变化不大。各林龄阶段表层土壤C、N、C/N、C/H普遍高于表层以下土壤。红外光谱分析表明, 云南松人工林土壤HA和FA具有相似的化学结构及官能团组成, 主要含有酚羟基、芳香基、脂族烃基、羧基等基团。从造林年限变化趋势看, 从幼林到成熟林阶段, 土壤表层HA中小分子糖类物质减少, 芳香类物质增加, 说明造林年限增加土壤HA结构变得复杂。土壤FA随造林年限的变化特征与HA相似, 但其表层(0~20 cm)土壤中羧基含量增加十分明显, 说明表土羧酸类物质有随林龄增加的趋势, 这可能是引起造林后期土壤pH下降的原因之一。从剖面深度看, 随土层增加, 土壤HA和FA中小分子糖类物质呈降低趋势, 而芳香类物质含量增加, 说明人工林深层土壤腐殖质的化学稳定性高于表土层。

关键词: 土壤腐殖质; 化学结构特征; 红外光谱; 人工林

中图分类号: O65; S714

文献标志码: A

文章编号: 2095-4271(2018)01-0024-07

Composition analysis of soil humus in Yunnan pine plantation at different stand ages

BAI Song¹, LUO Min², HE Shuai¹, JING Lian-dong¹, LI Hui¹

(1. School of Chemistry and Environmental Protection Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, P. R. C. ;

2. Department of Journals, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, P. R. C.)

Abstract: To understand the differences of chemical composition and structure characteristics in plantation soil humus with different ages, humic acids (HA) and fulvic acids (FA) in Yunnan pine plantation were studied by chemical fractionation, elemental analysis and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results indicated that the soil pH decreased with the increase of afforestation time. When the afforestation time increased by 27 years, the pH of soil decreased by 0.6 units. The C and C/H ratios of soil in young forest stage were higher than those either in middle-aged forest or mature forest, while N content, H content and C/N ratio in soil changed little with increasing stand age. Generally, at the same afforestation age, the C content, N content, C/N ratio and C/H ration in surface soil were higher than those in deep soil. The FTIR analysis indicated that the HA and FA in Yunnan pine plantation soil showed similar chemical structure and functional groups, and there were mainly phenolic hydroxyl group, aromatic group, aliphatic hydrocarbon group, carboxyl group, et al. With the extension of afforestation time, the content of carbohydrate of HA in surface soil decreased, while the amount of aromatics increased, suggesting the HA in soil became complicated and refractory. The content of carboxyl groups of FA in surface soil (0~20 cm) showed obvious increase with the extension of afforestation time, which could further result in the decrease of soil pH. When the soil depth rose up, the content

收稿日期: 2017-11-13

作者简介: 柏松(1979-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 土壤环境地球化学。E-mail: songbai1240@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(31400419); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016NZYQN14)

of small molecule carbohydrate in HA and FA of soil gradually decreased, while the content of aromatic substances showed increasing trend. The results indicated chemical structure of soil humus in plantations soil was more stable than that in surface soil.

Key words: soil humus; chemical structure; FTIR analysis; plantation

森林土壤碳循环是当前全球气候变化研究领域的热点问题^[1]. 大量研究表明, 人工林能够有效的固持土壤中的有机碳, 增强土壤系统对碳的吸收, 减少大气 CO₂ 浓度. 近年来, 关于人工林系统土壤有机碳固持机理的研究备受关注^[2]. 新近研究发现, 森林土壤有机碳固持机理很大程度取决于土壤有机碳的稳定性, 因此, 人工林土壤有机碳稳定机制的研究成为该领域新的热点. 土壤腐殖质作为土壤有机碳的主要组成部分, 占土壤总有机碳 75% ~ 85%, 是土壤有机碳库的重要来源^[3-4], 对决定土壤有机碳的化学稳定性具有重要作用. 在全球土壤生态学研究领域, 关于土壤腐殖质的相关研究方兴未艾.

土壤腐殖质是由胡敏酸(humic acid, HA)、富里酸(fulvic acid, FA)和胡敏素(humin)三部分组成的稳定性土壤有机碳组分, 其形成与转化对于维持有机碳库的稳定具有重要意义^[5-6]. 近年来, 森林土壤腐殖质的研究日益增多, 但研究内容一方面主要集中于森林更新、森林植被类型和森林管理措施对土壤腐殖质的影响; 另一方面则主要关注土壤腐殖质结构特征与土壤物理、化学特性的相互关系^[7-9]. 针对人工纯林土壤腐殖质各组分化学结构特征的研究报道较少. 事实上, 在人工林系统中, 尽管纯林的树种组成单一, 但林地的凋落物分解、根系分泌过程及养分元素的生物地球化学循环等, 必然对土壤腐殖质的含量及组成结构产生影响^[10-12], 在人工林生长的不同阶段, 甚至在同一林龄阶段的不同剖面深度上, 土壤的腐殖化程度和过程也不尽相同. 因此, 针对人工林地土壤腐殖质组成和结构特征差异的研究亟待开展.

为此, 本研究拟以不同林龄阶段的云南松人工林为研究对象, 综合运用土壤腐殖质分组方法, 元素分析及傅里叶变换红外光谱等分析手段, 研究土壤腐殖质的含氧官能团性质和化学结构等特征, 这不仅有助于从分子结构特征角度揭示土壤有机碳的稳定机制, 也为进一步查明人工林土壤有机碳固持机理奠定理

论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于四川省凉山州普格县(27°57' E, 102°36' N), 属康滇季风气候区, 区内气候受印度季风和极地干燥性大陆气团控制, 冬春与夏秋气候差异明显, 干湿季分明^[13]. 年均气温 12 ~ 16 °C, 最冷月均温 9.1 °C, 最热月均温 21.2 °C, 年无霜期 265 天, ≥10 °C 积温为 4 100 ~ 5 000 °C, 年均降水量 1 150 ~ 1 400 mm, 全年降水 90% 集中于 5 ~ 9 月. 植被主要为喜湿和耐寒型植被, 土壤为山地红壤, 母质为石英砂岩或玄武岩, 质地轻粘, 土层较薄. 云南松人工林地主要分布在研究区海拔 1 600 ~ 3 000 m 的阳坡及坡脊, 土壤薄瘠地区. 云南松(*Pinus yunnanensis*)为耐脊薄的阳性树种, 其林地分布地方多呈酸性. 云南松人工林为近期飞播的跨地带性次生林树种, 林子多为纯林, 也混有一些麻栎(*Quercus acutissima* Carruth)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume)、滇青杠(*Cyclobalanopsis glaucoides* Schotky)等常绿阔叶树种, 但都属第二亚层.

1.2 样地设置与采样方法

在研究区选择代表幼龄(造林 12 年)、中龄(27 年)和成熟林(39 年)共 3 个林龄段的云南松人工纯林地为研究样地(面积 10 m × 10 m), 3 个样地郁闭度大于 0.75, 集中分布在 2 km² 范围内, 海拔(2 200 m)、坡向(东南坡), 坡度(15 ~ 25)和立地条件等基本相似, 不受区域气候和母质差异的影响. 在上述 3 个样地内按照梅花 5 点采样法各设 5 个 2 m × 2 m 的样方, 于每个样方按照 0 ~ 20, 20 ~ 40, 40 ~ 60 cm 间隔分 3 个层次采集土壤混合样品约 2 ~ 3 kg, 并剔除其中动植物残体、植物根系和砾石后带回实验室, 样品经风干研磨过 2 mm 筛用作供试样品.

1.3 样品分析方法

(1) 土壤 pH 及元素组成测定

土壤 pH 值按土水比为 1:2.5 的比例浸提^[14], FE20 型 pH 计测定. 土壤元素组成(C, N, H, S)采用德国 Elementar 元素分析仪 vario MACRO cube 测定.

(2) 土壤腐殖质结构分析

本研究提取出 2 种土壤腐殖质组成:胡敏酸(humic acids, HA)和富里酸(fulvic acids, FA),提取方法参考文献 10 的研究方法. 土壤胡敏酸和富里酸的红外光谱采用 KBr 压片法,在德国 Bruker Vector 型红外光谱仪上测定,扫描模式为 4 000 ~ 1000 cm^{-1} . 对谱线选取特征峰,并对相应的官能团进行比较分析.

2 结果与讨论

2.1 人工林土壤特性变化特征

人工林地土壤呈弱酸性, pH 在 5.66 ~ 6.31 之间. 在幼林阶段,土壤 pH 在 6.19 ~ 6.31 之间,中龄阶段土壤 pH 下降至 6.0 以下,成熟林阶段,土壤 pH 低于 5.9(表 1). 该结果表明,随着云南松人工林造林时间的增加,土壤 pH 呈下降趋势,造林年限增加 27 年,土壤 pH 下降 0.6 个单位. 多年来,人工造林对土壤酸碱性的影响已有不少报道. 多数研究显示,人工林更新易引起土壤酸性增加, pH 值降低,甚至出现土壤酸化现象,尤以营造针叶林土壤酸化现象更加明显^[15-17]. 但也有相反的研究报道, Binkley 等对火炬松的研究发现,人工造林后的 5 ~ 25 年,土壤 pH 增加了

0.3 ~ 0.8 个单位^[13]. 此外,还有不少研究指出,随着造林时间的增加,土壤的酸碱不会发生明显改变^[18-19]. 本研究中,成熟林阶段土壤 pH 值较幼林阶段下降了 0.6 个单位.

林地土壤总有机 C 含量在 0.38% ~ 5.07% 之间,平均值 1.96%,最高值 5.07% 出现在幼林阶段 0-20 cm 表层土中. 从造林时间趋势看,幼林阶段土壤 C 含量最高,平均值为 2.98%,中龄和老林阶段土壤 C 含量相差不大,其平均值分别为 1.20% 和 1.71%. 林地表层土壤 C/H 与土壤总 C 变化趋势相似,幼林阶段土壤 C/H 最高,其值为 4.30,中龄和成熟林阶段土壤 C/H 分别为 3.08 和 2.96,两者差异不大. 而土壤 N, H, C/N 随造林年限增加无明显变化规律. 从剖面深度上看,各林龄阶段土壤总 C 含量均随剖面深度增加呈下降趋势,三个林龄阶段土壤 C 含量最高值均出现在土壤表层. 林地土壤 N 含量较小,其值在 0.09% ~ 0.42% 之间,平均值仅 0.21%. 土壤 N 随造林时间增加的变化趋势不明显,但随剖面深度增加,土壤含量下降,与土壤 C 的剖面变化特征相似. 在幼龄、中龄和老龄阶段,土壤 C/N 分别为 9.65%, 9.32% 和 7.61%,说明各林龄阶段土壤 C/N 值差别不大,但在剖面深度上,3 个林龄阶段表层土壤 C/N 都高于亚表层和底层. 土壤 C/H 与土壤 C/N 也有相似的变化特征.

表 1 人工林地土壤剖面 pH 和元素分析结果

Table 1 Results of pH and elemental analysis in plantation soil profile

样地编号 Research plot number	林龄/年 Stand age/year	土层深度 (cm) Soil depth (cm)	pH	元素分析 (%) Elemental Analysis				
				C%	N%	H%	C/N	C/H
YN01	12	0-20	6.24 ± 0.08a	5.07 ± 0.32a	0.42 ± 0.03a	1.18 ± 0.2a	12.07 ± 0.21a	4.30 ± 0.21a
		20-40	6.19 ± 0.05a	2.61 ± 0.13b	0.36 ± 0.02a	0.68 ± 0.02b	7.25 ± 0.18b	3.84 ± 0.16a
		40-60	6.31 ± 0.02a	1.25 ± 0.18b	0.13 ± 0.01b	0.44 ± 0.01b	9.62 ± 0.25b	2.84 ± 0.11a
YN02	27	0-20	5.84 ± 0.12a	2.43 ± 0.13a	0.19 ± 0.01a	0.79 ± 0.01a	12.79 ± 0.33a	3.08 ± 0.14a
		20-40	5.76 ± 0.03b	0.78 ± 0.05b	0.08 ± 0.01b	0.67 ± 0.09a	9.75 ± 0.13a	1.16 ± 0.05b
		40-60	5.98 ± 0.04a	0.38 ± 0.06b	0.07 ± 0.01b	0.69 ± 0.04a	5.43 ± 0.09b	0.55 ± 0.02c
YN03	39	0-20	5.85 ± 0.06a	3.38 ± 0.14a	0.35 ± 0.02a	1.14 ± 0.05a	9.66 ± 0.15a	2.96 ± 0.10a
		20-40	5.66 ± 0.11b	1.27 ± 0.07b	0.16 ± 0.02a	0.68 ± 0.02a	7.94 ± 0.23a	1.87 ± 0.07a
		40-60	5.76 ± 0.08b	0.47 ± 0.02c	0.09 ± 0.01b	0.67 ± 0.04a	5.22 ± 0.09b	0.70 ± 0.02b

注:相同字母表示各土层之间不存在显著差异,不同字母表示存在显著差异($p < 0.05$)

上述结果表明,在云南松人工林系统中,一方面,表层土壤 C、N 含量, C/N, C/H 高于表层以下土壤;另一方面,幼林阶段的土壤 C 含量和 C/H 高于中龄和成熟林阶段,而土壤 N, H, C/N 则随造林年限增长变化特征不明显.

2.2 人工林土壤腐殖质红外光谱分析

2.2.1 土壤 HA 红外光谱分析

为了系统地研究不同林龄和剖面深度对土壤 HA 化学结构的影响,本文选取三个林龄阶段(12, 27, 39 年)和三个土层深度(0 ~ 20, 20 ~ 40, 40 ~ 60 cm)的

HA 进行红外光谱分析(图 1 ~ 图 3). 图 1 显示了林地表层(0 ~ 20 cm)土壤 HA 的变化特征,结果表明各林龄阶段表层土壤 HA 的红外光谱吸收峰基本相似,主要包括:3 400 cm^{-1} (碳水化合物或酚羟基中 O-H 键的伸缩振动);2 958 cm^{-1} 和 2 924 cm^{-1} (脂肪族结构中 C-H 的伸缩振动);1 630 cm^{-1} (芳香环骨架 C=C 的共轭振动);1 450 cm^{-1} (脂肪族结构中甲基 CH_3 和亚甲基 CH_2 的变形振动);1 030 cm^{-1} (碳水化合物或多糖结构中 C-O 的伸缩振动). 其中,芳香环骨架振动 1 630 cm^{-1} 和糖类物质中 C-O 伸缩振动 1 030 cm^{-1} 两个吸收峰可以作为土壤 HA 的特征吸收峰. 由图 1 还可看出,三个林龄阶段表层土壤 HA 中缺少醛基、羧基、酮或醌型羰基的吸收峰(1 700 cm^{-1} 左右),这可能是由于林地表层土壤受区域气候、植被、微生物活动或地表人为扰动影响较大,土壤腐殖质结构不稳定,分

子结构变得较为简单.

图 2 和图 3 分别为亚表层(20 ~ 40 cm)和深层(40 ~ 60 cm)土壤 HA 在三个林龄阶段的结构特征. 比较图 1,图 2 和图 3 可以发现,幼龄林阶段土壤 HA 在 3 400 cm^{-1} ,1 630 cm^{-1} 和 1 030 cm^{-1} 的吸收峰很高,说明酚羟基类、芳香类和小分子糖类物质含量较高,而至中龄林和成熟林阶段土壤 HA 在 1 030 cm^{-1} 的吸收强度逐渐降低,但在 1 630 cm^{-1} 的吸收峰强度增大,表明随着造林年限增加,剖面深层土壤 HA 中小分子糖类物质逐渐减少,更多地形成芳香类物质,从而使剖面深处土壤 HA 结构变复杂,化学稳定性增加进而更难以分解. 这一现象也被其他研究者观察到^[9],原因可能是由于亚表层和深层土壤受气候和扰动作用等因素的影响相对较小,微生物分解作用减弱,导致土壤中 HA 化学结构要比表层更复杂.

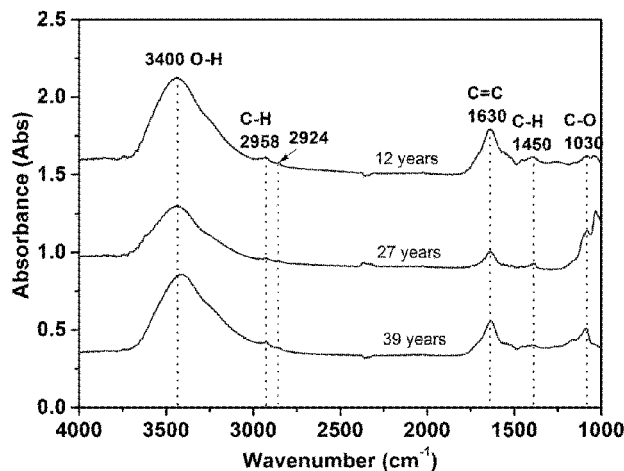


图 1 不同林龄人工林剖面(0 ~ 20cm)土壤 HA 红外图谱

Fig. 1 Infrared spectroscopy of soilhumic acid in plantation profile(0 ~ 20 cm) at different afforestation ages

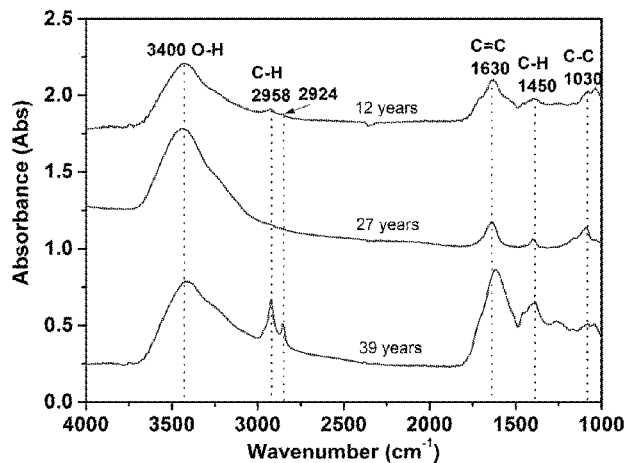


图 2 不同林龄人工林剖面(20 ~ 40cm)土壤 HA 红外图谱

Fig. 2 Infrared spectroscopy of soilhumic acid in plantation profile(20 ~ 40 cm) at different afforestation ages

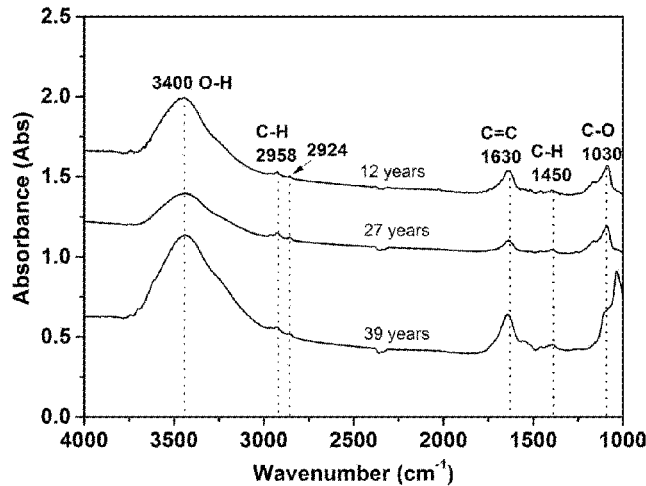


图3 不同林龄人工林剖面(40~60cm)土壤HA红外图谱

Fig. 3 Infrared spectroscopy of soil humic acid in plantation profile(40~60 cm) at different afforestation ages

2.2.2 土壤FA红外光谱分析

图4~图6分别比较了人工林不同林龄(12, 27, 39年)和不同土壤深度(0~20, 20~40, 40~60 cm) FA的红外光谱分析结果. 综合比较FA与上述HA的红外光谱图, 不难发现, FA和HA的吸收峰峰位基本相同, 说明云南松人工林土壤中FA和HA具有相似的化学结构和官能团组成, 例如碳水化合物或酚羟基O-H在 $3650 \sim 3200 \text{ cm}^{-1}$ 的伸缩振动宽峰; 芳香环类在 1630 cm^{-1} 处的骨架振动峰; 糖类物质在 $1200 \sim 1070 \text{ cm}^{-1}$ 附近的伸缩振动峰, 后两者也属于土壤FA的特征吸收带. 从图4还可以看出, 表层土壤FA在各个

林龄阶段均没有明显的脂肪族类物质出现(2958 cm^{-1} 和 2924 cm^{-1}), 却出现了羧基中C=O的伸缩振动峰(1720 cm^{-1}), 并且羧基含量随着林龄的增加而升高, 说明土壤中羧酸类物质有所增加, 这与前述造林27年后土壤pH下降0.6个单位的研究结果相吻合. 该结果表明, 人工林表土中羧基含量随林龄增加可能是引起造林后期土壤pH下降的原因之一. 最近马云波等也发现, 森林凋落物在微生物及土壤动物的作用下分解, 会产生部分酸性物质随雨水等入渗到土壤中, 导致土壤酸性增加^[20].

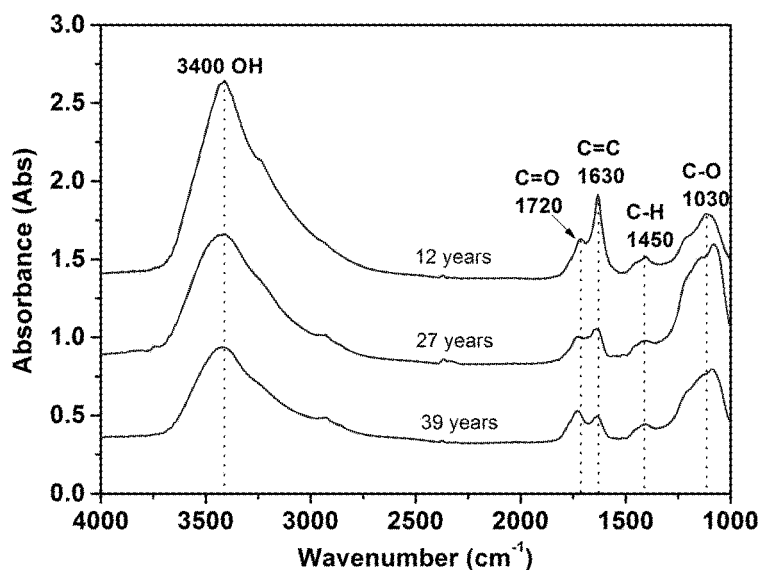


图4 不同林龄人工林剖面(0~20cm)土壤FA红外图谱

Fig. 4 Infrared spectroscopy of soil fulvic acid in plantation profile(0~20 cm) at different afforestation ages

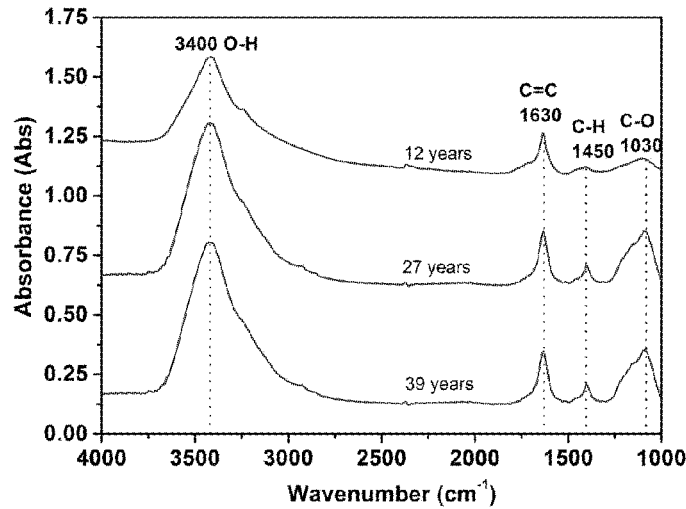


图 5 不同林龄人工林剖面(20~40cm)土壤 FA 红外图谱

Fig. 5 Infrared spectroscopy of soilfulvic acid in plantation profile(20~40 cm) at different afforestation ages

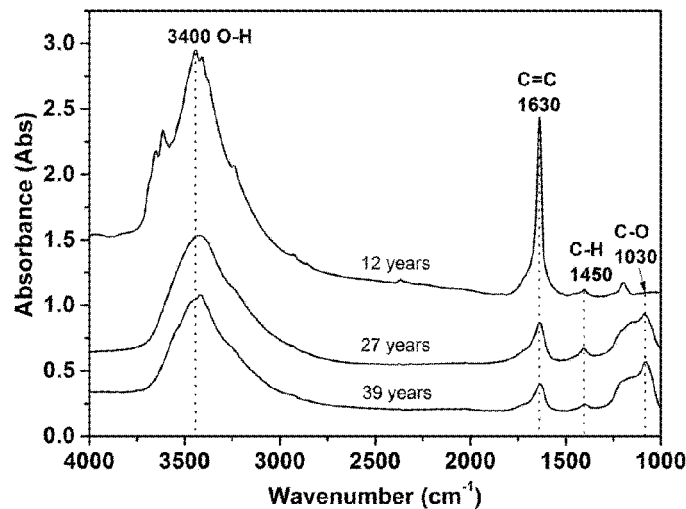


图 6 不同林龄人工林剖面(40~60cm)土壤 FA 红外图谱

Fig. 6 Infrared spectroscopy of soilfulvic acid in plantation profile(40~60 cm) at different afforestation ages

图 5 和图 6 显示了亚表层(20~40 cm)和深层(40~60 cm)土壤 FA 在各林龄阶段的变化特征. 从图 5 和图 6 中均未观察到羧基中 C=O 的伸缩振动峰(1720 cm^{-1})出现,这可能是由于亚表层层和深层土壤中微生物活动不及表层活跃,故不易产生代谢的酸性物质. 并且随着造林年限增加,中龄林和成熟林土壤 FA 在 1030 cm^{-1} 的吸收强度降低,在 1630 cm^{-1} 处的吸收峰强度增大,这与 HA 的分析结果相似. 上述结果表明,随着造林年限增加,深层土壤 FA 中小分子糖类物质减少,有更多的芳香类物质形成,使 FA 整体结构趋于复杂和稳定,但该现象是否也存在于其它人工林系统中,尚需要更多的研究工作加以证实.

3 结论

本研究以云南松人工林为研究对象,通过土壤腐殖质分组方法、元素分析和红外光谱分析等多种手段,研究了林龄分别为 12, 27 和 39 年三个造林阶段土壤 HA 和 FA 的化学结构特征差异,获得以下结论:

(1) 随林龄增加,土壤 pH 呈下降趋势,成熟林较幼林阶段土壤 pH 下降近 0.6 个单位. 幼林阶段土壤 C, C/H 高于中龄和成熟林阶段,而土壤 N, H, C/N 随林龄增加变化不明显. 从剖面深度上看,林地表层土壤 C, N, C/N, C/H 普遍高于表层以下土壤.

(2) 云南松人工林土壤胡敏酸(HA)和富里酸

(FA)的化学结构及官能团组成基本相似,主要含有酚羟基、芳香基、脂族烃基、羧基等基团。从林龄变化趋势看,随林龄增加,土壤表层 HA 中小分子糖类物质减少,芳香类物质增加,说明造林年限增加土壤 HA 和 FA 结构变复杂,结构变得稳定,难分解。其中,表层土壤 FA 中羧酸类物质含量增加明显,这可能是引起造林后期土壤 pH 下降的主要原因之一。

(5)从林地剖面深度变化趋势看,随土层深度增加,土壤 HA 和 FA 中小分子糖类物质呈下降趋势,而芳香类物质含量增加。该结果表明,随剖面深度增加,土壤 HA 和 FA 的化学结构趋于复杂和稳定,说明深层土壤腐殖质的化学稳定性高于表土层。

参考文献

- [1] 宋冰,牛书丽. 全球变化与陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2016,42(01):14-23.
- [2] PAQUETTE A, MESSIER C. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*,2010,8:27-34.
- [3] 窠森,于水强,张晋京. 不同 CO₂ 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. *土壤学报*,2007,(03):458-466.
- [4] 窠森, YVES TARDY, 张晋京, 等. 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究[J]. *土壤学报*,2010,47(01):71-76.
- [5] 王鑫,王金成,刘建新. 不同恢复阶段人工沙棘林土壤腐殖质组成及性质[J]. *水土保持通报*,2014,34(05):49-54.
- [6] 张玉兰,孙彩霞,陈振华,等. 红外光谱法测定肥料施用 26 年土壤的腐殖质组分特征[J]. *光谱学与光谱分析*,2010,30(05):1210-1213.
- [7] GHAZARYAN H G, KROYAN S Z, MANUKYAN N M. Current state of humus in irrigated meadow-brown soils in the Republic of Armenia[J]. *Annals of Agrarian Science*,2016,14(4):307-310.
- [8] PANDELOVA M, HENKELMANN B, BUSSIAN B M. Results of the second national forest soil inventory in Germany - Interpretation of level and stock profiles for PCDD/F and PCB in terms of vegetation and humus type[J]. *Science of The Total Environment*,2018,610(1):1-9.
- [9] 胡雷,王长庭,阿的鲁骥,等. 高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系[J]. 西南民族大学学报(自然科学版),2015,41(01):6-11.
- [10] 张晓曦,刘增文,朱博超,等. 半干旱黄土丘陵区纯林土壤腐殖质异化特征及与其他性质的关系[J]. *生态学报*,2015,35(6):1779-1787.
- [11] AHMED F, OSAMA O, HEND E. Spectroscopic analyses of soil samples outside Nile Delta of Egypt[J]. *Molecular and Biomolecular Spectroscopy*,2016,168(5):244-252.
- [12] PEEYUSH SHARMA, YAEL LAOR, MICHAEL RAVIV. Compositional characteristics of organic matter and its water-extractable components across a profile of organically managed soil[J]. *Geoderma*,2017,286(15):73-82.
- [13] 李强. 金沙江干热河谷生态环境特征与植被恢复关键技术研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
- [14] 王纪杰,王炳南,李宝福,等. 不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化[J]. *森林与环境学报*,2016,36(01):8-14.
- [15] JOHNSON C E, JOHNSON A H, HUNTINGTON T G. Whole-tree clear-cutting effects on soil horizons and organic matter pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1991,55:497-502.
- [16] 程国玲,邵士文,陈永亮. 水曲柳落叶松纯林与混交林根际土壤 pH 值变化对比[J]. *东北林业大学学报*,2001,29(2):102-104.
- [17] 陈立新. 落叶松人工林土壤质量变化规律与调控措施的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2003.
- [18] BINKLEY D, DUNKIN K A, BELL D. Production and nutrient cycling in mixed plantation of Eucalyptus and Albizia in Hawaii[J]. *Forestry Science*,1992,38:393-408.
- [19] MARCOS J A, MARCOS E, TABOADA A. Comparison of community structure and soil characteristics in different aged Pinus sylvestris plantations and a natural pine forest[J]. *Forest Ecology and Management*,2007,247(3):35-42.
- [20] 马云波,许中旗,张岩,等. 冀北山区华北落叶松人工林对土壤化学性质的影响[J]. *水土保持学报*,2015,29(4):165-170.

(责任编辑:李建忠,付强,张阳,罗敏;英文编辑:周序林,郑玉才)