

DOI: 10.5846/stxb201906231325

黄桥明, 吕茂奎, 聂阳意, 任寅榜, 熊小玲, 谢锦升. 武夷山不同海拔森林表层土壤轻组有机质特征. 生态学报, 2020, 40(17): 6215-6222.

Huang Q M, Lyu M K, Nie Y Y, Ren Y B, Xiong X L, Xie J S. Characteristics of light fraction organic matter in surface soil of different altitude forests in Wuyi Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6215-6222.

武夷山不同海拔森林表层土壤轻组有机质特征

黄桥明¹, 吕茂奎¹, 聂阳意¹, 任寅榜¹, 熊小玲¹, 谢锦升^{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: 土壤轻组有机质是土壤有机质的重要组成部分, 研究轻组有机质在不同森林生态系统土壤中的变化规律对理解土壤有机质形成与转换具有重要意义。以福建省武夷山国家级自然保护区不同海拔的常绿阔叶林(海拔 600 m)、针阔混交林(海拔 1000 m)和针叶林(海拔 1400 m)为研究对象, 利用密度分组方法分离了表层(0—5 cm 和 5—10 cm)土壤轻组有机质, 研究了不同海拔森林土壤轻组有机质特征及其影响因素。结果表明: 针阔混交林表层土壤的轻组有机质含量大于针叶林和常绿阔叶林($P < 0.05$), 并且轻组有机碳的含量变化亦是如此($P < 0.05$), 而轻组有机氮的含量无显著差异($P > 0.05$)。表层土壤对应土层的轻组 C:N 大于土壤 C:N, 针阔混交林轻组 C:N 和土壤 C:N 均大于其他林分类型。0—5 cm 与 5—10 cm 土层针阔混交林的轻组有机碳、氮储量均大于针叶林和常绿阔叶林($P < 0.05$), 并且针阔混交林的轻组有机碳、氮储量所占土壤有机碳与总氮的比重均大于其余两种林分。0—10 cm 土层针叶林土壤有机碳与总氮含量与储量最高, 并随海拔降低而减小, 但差异不显著($P > 0.05$)。相关分析结果表明, 轻组有机碳、氮储量与 SOC、DOC、MBC 和细根生物量具有显著相关关系($P < 0.05$), 而与年凋落物量无关($P > 0.05$), 说明地下细根可能是土壤轻组有机质的重要来源。因此, 在未来气候和植被变化共同作用下, 地下细根对土壤轻组有机质的形成可能具有不可忽视的作用。

关键词: 森林类型; 气候变化; 轻组有机质; 碳氮储量

Characteristics of light fraction organic matter in surface soil of different altitude forests in Wuyi Mountain

HUANG Qiaoming¹, LYU Maokui¹, NIE Yangyi¹, REN Yinbang¹, XIONG Xiaoling¹, XIE Jinsheng^{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: Soil light fraction organic matter is an important component of soil organic matter. It is crucial to understand the relationship between soil organic matter and climate change by studying the variation of light fraction organic matter along an elevation gradient in subtropical China. Taking evergreen broad-leaved forest (EBF), mixed coniferous and broad-leaved forest (BCF), and coniferous forest (CF) at different altitudes (from low to high elevation) in Wuyishan National Park in Fujian Province as research objects, the light fraction organic matter in surface soil (0—5 cm and 5—10 cm) was separated by density fractionation analyses, as well as the characteristics of light fraction organic matter and its influencing factors in different forest ecosystems were studied. The results showed that the content of light fraction organic matter in BCF was higher than that in CF and EBF in 0—5 cm and 5—10 cm soil layers ($P < 0.05$). The pattern of the content of light fraction organic carbon was similar to the light fraction organic matter, but there was no significant difference in light organic nitrogen content ($P > 0.05$). The light fraction C/N was greater than soil C/N, and the light fraction C/N and soil C/N in

基金项目: 国家自然科学基金促进海峡两岸科技合作联合基金项目(U1405231)

收稿日期: 2019-06-23; 网络出版日期: 2020-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jshxie@163.com

BCF were greater than those of other forest types in the same soil layer. In 0—5 cm and 5—10 cm soil layer, the storage of light fraction organic carbon and nitrogen in BCF were higher than those in CF and EBF ($P < 0.05$), and the contribution of light fraction organic carbon and nitrogen to soil organic matter in BCF was higher than that of the other two forests. The contents and storage of soil organic carbon and total nitrogen in CF was the highest in 0—10 cm, and decreased with the decrease of altitude, but the difference was not significant ($P > 0.05$). The correlation analysis showed that the storage of light fraction organic carbon and nitrogen was significantly correlated with soil organic carbon, dissolved organic carbon, microbial biomass carbon and fine root biomass ($P < 0.05$), but not annual litterfall ($P > 0.05$), suggesting that root derived organic matter might be an important source of light fraction organic matter in soil. Therefore, we concluded that belowground sources may play an important role in regulation of the formation of light fraction organic matter in soil under future climate change.

Key Words: forest type; climate change; light fraction organic matter; carbon and nitrogen storage

森林土壤有机质在全球碳循环和碳平衡中具有重要作用,也是森林生态系统生产力重要物质基础和土壤质量与健康的重要指标^[1-2]。土壤有机质按密度大小可分为轻组(light fraction, LF)和重组(heavy fraction, HF)。轻组有机质主要由部分分解的植物残体和动物、微生物残骸组成,碳和氮含量高^[3],周转速度快^[4],是易变土壤有机质的主要部分,对植物养分供给、平衡土壤碳库和保持土壤肥力特性有重要的作用。由于缺乏黏粒等的保护,轻组有机质易受自然与人为干扰的影响^[5],因此对环境的响应比总有机质更为敏感和迅速,能较好地反映出土壤有机碳库的微小变化^[6]。

由于轻组是易变的有机质库,对耕作措施、作物种植制度、施肥、土地利用变化等变化的响应非常敏感。如秸秆覆盖处理和免耕处理可以显著提高土壤轻组有机碳^[7];生物有机肥与化肥配施和单施有机肥处理比单施化肥能更大程度上提高了轻组有机碳(LFOC)含量^[8];有的研究表明轻组有机碳明显受土地利用方式的影响,表现为次生林>人工林>灌草丛>坡耕地^[9]。已有的研究表明,天然林(次生林)的轻组有机碳(LFOC)含量大于人工林^[10]。人工混交林的轻组有机碳含量大于人工纯林^[11-12]。天然林人工更新后,土壤轻组有机碳含量及占总碳的比例均有降低趋势^[13]。同一森林类型不同的海拔条件下,轻组有机碳含量的变化也不相同。如在川西高山冷杉林的研究中发现,有研究表明表层土壤轻组有机碳在海拔梯度上是随着海拔升高逐渐增加的^[14],也有研究表明随海拔升高轻组有机碳表现出双峰特征^[15],甚至有的研究则发现土壤轻组有机碳含量在海拔梯度上没有明显的变化趋势^[16]。这些不同的分布模式,可能是所处的气候条件、立地差异,以及微生物^[17]的不同而导致的差异,但其主导轻组有机质变化的因子与其来源尚不清楚。借此,本研究选择武夷山不同海拔的典型森林土壤类型为例,试图揭示不同海拔森林类型对土壤轻组有机质的影响,为进一步认识森林土壤有机质及森林管理提供科学依据。

1 试验地概况

研究区位于武夷山自然保护区(27°33′—27°54′ N, 117°27′—117°51′ E),地处福建省西北部,总面积 99975 hm²,拥有世界同纬度带现存面积最大、保存最完整的中亚热带常绿阔叶林。区内动植物资源丰富,森林覆盖率为 96.3%。境内以黄岗山为主峰,海拔 2158 m,植被垂直带谱分布完整,沿海拔植被带依次为常绿阔叶林、针叶林、亚高山矮林和高山草甸,属亚热带季风气候,年平均气温垂直变化为 19.2—8.5℃,降水量为 1600—3303 mm,年平均相对湿度 78%—84%,无霜期 253—272 d。

依据植被类型和海拔选择黄岗山主峰东南坡的常绿阔叶林(Evergreen broadleaf forest, EBF)、针阔混交林(Mixed broadleaf-conifer forest, BCF)和针叶林(Coniferous forest, CF)作为研究对象。常绿阔叶林乔木层主要为米槠(*Castanopsis carlesii*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*),林冠较高,郁闭度较大。针阔混交林乔木层主要为黄山松(*Pinus tanwanensis*)、木荷(*Schima superba*),下层以肿节少穗竹(*Oligostachyum oedogonatum*)为主,土层较厚

(40 cm 左右),表层细根较多,地表枯枝落叶较厚(3—5 cm)。针叶林乔木层主要为黄山松,灌木层的植被较少。样地基本情况见表 1。

表 1 研究样地概况
Table 1 Overview of research sample plots

样地 Sample plots	海拔 Altitude/m	年均温 Annual mean temperature /℃	年均降水 Annual average precipitation/ mm	坡度 Slope	土壤类型 Soil type	年凋落量 Annual litter fall/ (g/m ²)	细根生物量 Fine root biomass/ (g/m ²)	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	密度 Stand density/ (棵/hm ²)
常绿阔叶林(EBF)	600	17.6	2374.2	东南 26°	山地红壤	616.7 ±44.2	197.8 ±54.6	10.3	12.0	1588
针阔混交林(BCF)	1000	15.8	2671.0	东南 24°	山地黄壤	628.1 ±73.6	625.8 ±68.6	13.0	14.6	1425
针叶林(CF)	1400	14.2	3487.3	东南 31°	山地黄壤	559.3 ±64.9	140.8 ±55.2	17.2	25.8	451

EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest; BCF: 针阔混交林 Mixed broadleaf-conifer forest; CF: 针叶林 Coniferous forest

2 研究方法

2.1 样品采集

2016 年 11 月分别在三个海拔设置 5 个 20 m×20 m 的标准样方,共 15 个。2017 年 10 月在每个样方内使用内径为 2 cm 的土钻“S”型随机、多点取表层 0—5 cm 和 5—10 cm 土样,分别混合,每个海拔土样 5 个重复,共 30 个。随后迅速将土壤样品用内含冰袋的保温箱保存,带回实验室处理。在室内,挑走土壤中的细根和石块,过 2 mm 土壤筛混合均匀装袋放入 4℃ 冰箱保存待分析,并收集土壤中的细根,洗净烘干,挑出土壤中 <2 mm 的细根,计算细根生物量。每月从设置的凋落物框中收集凋落物并计算年凋落量。

2.2 实验方法

土壤轻组和重组有机质的分离采用相对密度分组方法^[18]。将 10.00 g 风干土样放在 100 mL 的塑料离心管中,加入 50 mL NaI 溶液(密度 1.7 g/cm³),盖紧手动摇晃混匀,并在往复震荡机上震荡 180 min,震速 1 min 往复 250 次。分散后的悬浮液以转速 4000 rpm 离心 20 min。离心后的上层液通过滤纸抽滤,使轻组物质全部过滤在滤纸上。在剩余的重组残留物中加入 25—30 mL NaI,用涡旋仪将离心后聚在底部的土样,振散混合,再次离心并抽滤,重复上述步骤直至没有可见的轻组物质。分离出来的轻组物质用去离子水进行多次冲洗,彻底淋洗掉残留的 NaI 溶液,然后将滤纸上的轻组物质洗到预先称重的小烧杯中,在 60℃ 烘箱中烘干,获得轻组物质的干质量。用玛瑙研钵将烘干后的轻组物质磨碎,并过 100 目筛。用碳氮元素分析仪(Elementar Vario EL III, Germany)测定轻组碳氮含量。

土壤微生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法测定^[19]。土壤可溶性有机碳(DOC)使用总有機碳分析仪 TOC-VCPN 测定。土壤容重使用环刀法测定。

2.3 数据处理与分析

表层土壤特定深度的土壤有机碳和总氮储量计算方法如下:

$$S = C \times B \times D \times (1 - G) \div 10$$

其中,S 为土壤有机碳(SOC)或总氮(TN)储量(t/hm²),C 为 SOC(或 TN)含量(g/kg),B 为土壤密度(g/cm³),D 为土层深度(cm),G 为直径 > 2 mm 的石砾所占的体积比例(%)。

运用 Excel 2013 和 SPSS22.0 软件对数据进行处理分析。单因素方差分析(one-way ANOVA)和 LSD 多重比较法对不同数据间进行差异性比较(P<0.05),Pearson 进行相关分析,Origin 9.0 软件制图。所有数据均为 5 次重复的平均值。结果为平均值±标准误差。

3 结果与分析

3.1 不同森林生态系统表层土壤轻组含量

三种林分表层 0—5 cm 土壤的轻组含量具有显著差异(P<0.05),其中针阔混交林最大,常绿阔叶林最

小;针阔混交林分别是针叶林的 2.6 倍、常绿阔叶林的 10.7 倍(图 1)。5—10 cm 土层土壤轻组有机质含量的变化趋势与 0—5 cm 土层基本一致,但针叶林和常绿阔叶林无显著差异,并且不同林分间的差异缩小。各林分 0—5 cm 土层轻组含量均显著高于 5—10 cm 土层。

3.2 不同森林生态系统表层土壤轻组碳氮含量

0—5 cm 土层不同林分轻组的碳含量(LFC)和 SOC 含量变化规律均为:针阔混交林>针叶林>常绿阔叶林($P<0.05$)(表 2),针阔混交林的轻组的碳含量比针叶林和常绿阔叶林的分别高 18.0%和 27.6%,SOC 含量分别高 22.3%和 172.4%。在 5—10 cm 土层,针阔混交林的轻组的碳含量显著高于针叶林和常绿阔叶林,针叶林和常绿阔叶林之间无显著差异($P>0.05$),而 SOC 含量针叶林显著高于针阔混交林和常绿阔叶林,针叶林和常绿阔叶林之间无显著差异($P>0.05$)。总体上,表层土壤(0—10 cm)轻组的平均碳含量针阔混交林较高,SOC 则由高海拔向低海拔降低,针叶林与针阔混交林之间无显著差异($P>0.05$)。

在 0—5 cm 土层,轻组的氮含量(LFN)变化规律均为:针阔混交林>针叶林>常绿阔叶林,但林分间的差异不显著($P>0.05$)。针叶林和针阔混交林土壤 TN 含量显著高于常绿阔叶林($P<0.05$),分别高出 108.3%和 86.9%。在 5—10 cm 土层,轻组的氮含量林分之间无显著差异($P>0.05$),而 TN 含量针叶林海拔显著高于针阔混交林和常绿阔叶林($P<0.05$),分别高出 83.6%和 72.5%,总体上,表层土壤(0—10 cm)轻组的平均氮含量针叶林较高,但林分间没有显著差异($P>0.05$),TN 则由高海拔向低海拔降低,针阔混交林与常绿阔叶林之间无显著差异($P>0.05$)。在所有土层中,轻组 C:N 比土壤 C:N 大,针阔混交林轻组 C:N 和土壤 C:N 均大于其他海拔。

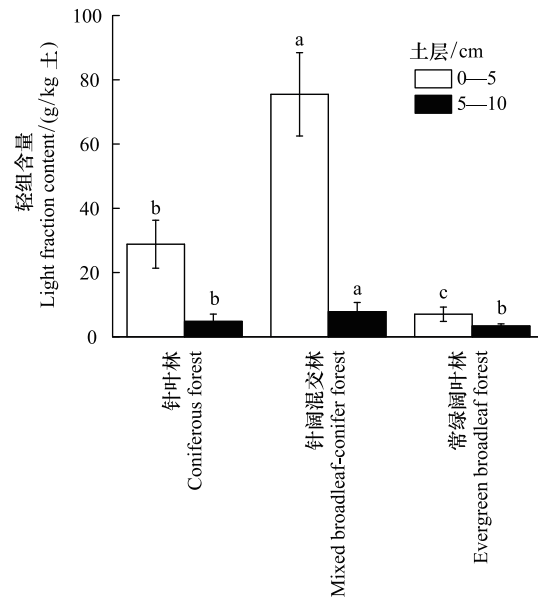


图 1 不同海拔表层土壤轻组有机质含量

Fig.1 Light fraction organic matter contents in surface soil in different stands

不同字母表示同一土层,不同林分间差异显著($P<0.05$)

表 2 不同森林表层土壤轻组碳氮含量

Table 2 Light fraction carbon (LFC) and nitrogen (LFN) in surface soil in different stands

土层 Layer/cm	森林类型 Forest type	轻组碳 LFC/ (g/kg LF)	轻组氮 LFN/ (g/kg LF)	有机碳 SOC/ (g/kg 土)	总氮 TN/ (g/kg 土)	轻组 LF C:N	土壤 Soil C:N
0—5	CF	329.6 ±9.5b	12.7 ±1.9a	72.6 ±14.5b	4.29 ±0.90a	26.38 ±3.22a	16.92 ±0.33b
	BCF	388.8 ±9.6a	13.1 ±2.1a	88.8 ±12.0a	3.85 ±0.61a	28.93 ±3.74a	23.22 ±2.40a
	EBF	304.7 ±10.8c	11.1 ±0.7a	32.6 ±5.9c	2.06 ±0.35b	27.54 ±1.51a	15.84 ±0.23b
5—10	CF	323.5 ±23.0b	10.9 ±1.6a	40.0 ±15.4a	2.57 ±0.92a	30.08 ±4.30b	15.45 ±0.90b
	BCF	370.5 ±15.3a	8.7 ±1.6a	26.3 ±8.72b	1.40 ±0.35b	40.00 ±4.93a	18.54 ±1.79a
	EBF	304.9 ±30.5b	9.3 ±0.5a	22.7 ±2.1b	1.49 ±0.17b	32.87 ±4.00b	15.22 ±0.53b
0—10	CF	325.7 ±16.3b	11.6 ±1.5a	51.9 ±14.1a	3.20 ±0.85a	28.49 ±3.42b	16.21 ±0.51b
	BCF	372.6 ±16.1a	10.1 ±1.8a	44.4 ±8.2a	2.11 ±0.39b	37.99 ±7.44a	21.08 ±1.52a
	EBF	305.0 ±18.0b	10.1 ±0.4a	27.0 ±2.7b	1.74 ±0.17b	30.29 ±2.11b	15.54 ±0.35b

0—10 cm 土层的三种林分的各项值为对应林分 0—5 cm 与 5—10 cm 土层的值的加权平均数,权重为对应土层的土壤容重;不同小写字母表示同一土层不同海拔间差异显著($P<0.05$)

3.3 不同森林生态系统表层土壤碳氮储量变化

在 0—5 cm 土层中,3 种林分的轻组有机碳储量(LFOC)具有显著差异($P<0.05$),针阔混交林最高(达到

4.7 t/hm²),分别为针叶林和常绿阔叶林海拔的 2.0 倍和 5.7 倍(表 3)。SOC 储量针叶林显著高于针阔混交林和常绿阔叶林,针阔混交林和常绿阔叶林之间无显著差异($P>0.05$)。5—10 cm 土层,针阔混交林的轻组有机碳储量显著高于针叶林和常绿阔叶林,针叶林和常绿阔叶林之间无显著差异($P>0.05$)。SOC 储量变化规律均:为针叶林>常绿阔叶林>针阔混交林,各林分之间无显著差异($P>0.05$)。总体上,表层土壤(0—10 cm)轻组有机碳储量针阔混交林显著高于针叶林和常绿阔叶林,SOC 储量为针叶林>针阔混交林>常绿阔叶林,针阔混交林和常绿阔叶林之间无显著差异($P>0.05$)。所有土层中,轻组有机碳储量占总有机碳储量的比重较小,针阔混交林的轻组有机碳储量占比值最高($P<0.05$)。

在 0—5 cm 土层,不同林分轻组有机氮储量(LFON)变化规律为:针阔混交林>针叶林>常绿阔叶林($P<0.05$),针阔混交林分别为针叶林和常绿阔叶林的 1.9 倍和 5.7 倍(表 3)。针叶林土壤 TN 储量显著高于针阔混交林和常绿阔叶林,针阔混交林和常绿阔叶林之间无显著差异($P>0.05$)。而在 5—10 cm 土层 LFON 储量林分间的差异不显著($P>0.05$),TN 储量与 0—5 cm 变化趋势一致。总体上,表层土壤(0—10 cm)LFON 储量与 LFOC 储量沿海拔的变化趋势一致。各林分土壤 TN 储量变化趋势表现为针叶林>常绿阔叶林>针阔混交林。所有土层中,轻组有机质氮储量占总氮储量的比重与轻组有机碳储量占总有机碳储量的比重规律类似。

表 3 不同森林表层土壤轻组有机碳氮储量及其所占总有机碳与总氮储量的比例

Table 3 Light fraction organic carbon (LFOC) and nitrogen (LFON) storages and its ratio of total organic carbon and nitrogen storage in surface soil in different stands

土层 Layer/cm	森林类型 Forest type	轻组有机碳 LFOC/ (t/hm ²)	轻组有机氮 LFON/ (t/hm ²)	有机碳 SOC/ (t/hm ²)	总氮 TN/ (t/hm ²)	LFOC/ SOC/%	LFON/ TN/%
0—5	CF	2.34±1.02b	0.09±0.05b	19.49±5.34a	1.16±0.33a	11.58±2.20b	7.64±2.30b
	BCF	4.70±1.26a	0.17±0.06a	14.49±1.94b	0.65±0.12b	32.61±8.02a	26.54±7.50a
	EBF	0.82±0.35c	0.03±0.01c	12.17±3.30b	0.77±0.20b	6.58±1.64b	3.8±0.99b
5—10	CF	0.56±0.16b	0.02±0.01a	13.62±4.76a	1.05±0.44a	5.66±2.96b	3.1±2.13b
	BCF	1.28±0.35a	0.03±0.01a	10.20±2.04a	0.54±0.07b	12.54±2.69a	5.47±1.66a
	EBF	0.61±0.28b	0.02±0.01a	10.87±0.51a	0.71±0.05b	5.56±2.34b	2.7±1.54b
0—10*	CF	2.91±1.02b	0.11±0.05b	33.11±9.13a	2.21±0.75a	8.66±1.12b	4.92±0.66b
	BCF	5.98±1.60a	0.20±0.07a	24.69±3.63b	1.19±0.18b	24.30±5.78a	16.89±4.49a
	EBF	1.43±0.60b	0.05±0.02b	23.05±3.60b	1.48±0.22b	6.03±1.64b	3.24±1.05b

0—10 cm 土层的三种林分各项值为对应海拔 0—5 cm 与 5—10 cm 土层平均值的和

3.4 土壤轻组有机质碳氮储量的影响因子分析

如表 4 所示,表层土壤轻组有机质碳储量(LFOC)与 TN 含量、DOC 含量呈显著正相关关系($P<0.05$),与 SOC 含量、MBC 含量、粉粒含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与容重呈极显著的负相关关系($P<0.01$)。轻组有机质氮储量(LFON)与 TN 含量、DOC 含量具有显著相关关系($P<0.05$),与容重呈显著的负相关关系($P<0.05$),与 SOC 含量、MBC 含量、粉粒含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),如表 5 所示,LFOC 和 LFON 与细根生物量呈极显著正相关关系($P<0.01$),而与年凋落物量、树高、胸径密度没有相关关系($P>0.05$)。

表 4 表层土壤轻组有机质碳氮储量与土壤理化因子之间的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients between LFOC and LFON storages and soil physicochemical factors

	有机碳 SOC	总氮 TN	可溶性 有机碳 DOC	微生物 生物量碳 MBC	容重 Bulk density	土壤全磷 TP	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
LFOC	0.766**	0.548*	0.640*	0.663**	-0.676**	-0.148	-0.306	0.701**	-0.499
LFON	0.737**	0.572*	0.620*	0.680**	-0.606*	-0.214	-0.331	0.675**	-0.426

* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关

表 5 表层土壤轻组有机质碳氮储量与林分因子之间的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between LFOC and LFON storages and their stand factors

	年凋落量 Annual litter fall	细根生物量 Fine root biomass	胸径 DBH	树高 Tree height	密度 Stand density
LFOC	-0.027	0.766 **	0.063	0.323	-0.023
LFON	-0.081	0.697 **	0.127	0.386	-0.087

4 讨论

4.1 不同森林类型土壤轻组有机质的变化

本研究表明,武夷山森林土壤轻组有机质含量在不同林分中的分布不同(图 1),其中针阔混交林含量显著高于针叶林和常绿阔叶林($P<0.05$),轻组有机碳含量与的变化与其一致(表 2)。轻组有机氮的含量各林分间无显著差异。其他研究也发现类似的结果,郭璐璐^[20]等发现川西贡嘎山针阔混交林表层土壤 LFC 含量均显著高于常绿落叶阔叶林和暗针叶林。这些研究的不同可能是微生物分解和利用输入土壤中的植物残体的碳氮元素的速率和程度不同。本研究发现,三种林分轻组有机碳、氮储量均表现出针阔混交林高于其余两种林分(表 3)。上述结果表明不同树种组成显著影响轻组有机质的变化。0—10 cm 土壤有机碳和总氮含量及储量大体沿海拔的升高而降低。说明气候对有机碳和总氮积累具有重要作用。这也从侧面说明轻组有机碳比土壤有机碳对环境的响应更为敏感和复杂。

4.2 影响森林土壤轻组有机质变化的因素

气候是森林土壤轻组有机质变化的主要影响因素。因为气温较低时,微生物活性低,不同分解程度的动植物残体、木质素等不能及时矿化分解,导致大量有机物质积累,进而使轻组含量较高^[15,20]。Song^[21]等研究表明,降水量的增加刺激了土壤 LFC 的增加,而增温降低了土壤 LFC 含量。所以气候寒冷、干燥的条件有利于轻组有机质的积累^[22]。本研究结果也表现出这种普遍的模式,高海拔针叶林分解较慢,轻组有机质含量显著高于低海拔阔叶林(图 1)。未来气候变暖可能影响不同海拔的水热条件,导致植物生长习性及其生物量变化^[23],甚至整个海拔梯度的林线上移和森林林型的变化^[24],从而影响土壤轻组有机质的分布模式。赵华晨^[25]等研究表明长白山阔叶红松林和邻近杨桦次生林间轻组有机碳、氮含量与储量无显著差异。这反映了气候的主导作用超过了林分性质的差异。

Six^[26]等研究发现表层土壤轻组有机质主要依赖于植被凋落物和细根输入。而凋落物和细根的质量和数量与森林类型十分密切。相关分析表明,武夷山三种森林类型中,轻组碳储量与森林年凋落物量没有显著关系($P>0.05$),而与细根生物量有显著关系($P<0.05$)(表 5),并且 1000 m 海拔针阔混交林地下细根生物量显著大于其余两个海拔($P<0.05$)(表 1)。这说明轻组有机碳储量大小可能受不同森林类型地下细根的影响。而且 1000 m 海拔为针阔混交林以黄山松和木荷为主,木荷细根密集,主要分布在表层土壤中^[27]。Sun^[28]等研究 6 年的一级根和凋落叶分解实验发现,一级根的分解速度比凋落物慢,所以植被细根可能成为土壤轻组的重要来源^[29-30]。而 Boone 在美国威斯康辛州两个栎树林研究凋落物和根对轻组的相对贡献时认为地上凋落物是土壤轻组的主要来源^[31]。这可能是不同森林类型凋落物和细根的性质不同,对轻组的作用和贡献也不同。

本研究发现, LFOC 与 MBC 之间存在显著正相关性($P<0.05$)(表 4),这与相关学者的研究结果一致^[15,17,32]。可能是这些部分分解的植物残体为微生物活动提供丰富的营养物质,促进了微生物的生长繁殖,微生物生物量随之增加^[33-34]。而孙力^[35]等在天山森林的研究表明 LFOC 与 MBC 呈负相关关系。这些研究表明不同森林类型对轻组形成的作用机制具有不同的模式。在轻组的形成过程中,土壤菌根真菌具有促进作用。叶思源^[36]等研究发现接种外生菌根真菌提高了马尾松林土壤轻组有机碳含量。原因可能是根际微生物群落形成的有机碳库效率更高,积累更多^[37]。这表明了地下细根与微生物的共同作用对轻组有机质的形成

具有重要影响。所以森林类型能通过细根和与之相关的微生物群落,影响轻组有机质的形成与转换。由于木荷同时具有外生菌根和内生菌根^[38]。因此黄山松与木荷混交林可能更有利于轻组有机质的形成。今后可着重加强菌根对森林土壤轻组有机质的作用机制的研究。轻组有机质受海拔高度的影响未达到显著水平($P>0.05$),表明轻组有机质受其他因素的作用超过了海拔因素的影响。轻组有机质的形成转换较为复杂,模式多变。总体上,气候条件、细根数量与性质和微生物作用是影响轻组有机质的重要因素。

虽然轻组有机质所占比例较小,对短时间内土壤碳氮总储量的影响较小,但因其不稳定性,易周转性与高碳氮比,使其能敏感的对气候变化与人类干扰做出反应^[39],从而对森林生态碳氮循环具有重要影响。在全球变暖的背景下,对不同海拔森林土壤轻组有机质的变化模式的相关研究具有一定的现实意义。

5 结论

武夷山森林土壤轻组有机质变化表现为:针阔混交林的轻组有机质含量及其碳氮储量,显著高于针叶林与阔叶林($P<0.05$)。SOC 与土壤 TN 含量及储量随海拔降低而减小,但海拔差异不显著($P>0.05$)。表层土壤轻组有机质碳氮储量与 SOC、DOC、MBC 含量和细根生物量具有显著相关关系($P<0.05$),而与年凋落物量无关($P>0.05$)。地下细根可能是土壤轻组有机质的重要来源。

参考文献 (References):

- [1] Ding G, Novak J M, Amarasingiwardena D, Hunt P G, Xing B. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2): 421-429.
- [2] 张勇, 庞学勇, 包维楷, 尤琛, 汤浩茹, 胡庭兴. 土壤有机质及其研究方法综述. *世界科技研究与发展*, 2005, 27(5): 72-78.
- [3] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 杨少红, 杨智杰. 土壤轻组有机质研究进展. *福建林学院学报*, 2006, 26(3): 281-288.
- [4] Jiang R, Gunina A, Qu D, Kuzyakov Y, Yu Y J, Hatano R, Frimpong K A, Li M. Afforestation of loess soils: old and new organic carbon in aggregates and density fractions. *CATENA*, 2019, 177: 49-56.
- [5] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 211-219.
- [6] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle 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(7): 1459-1466.
- [7] 王琳. 长期保护性耕作对黄绵土总有机碳及其组分动态的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [8] 焦欢, 李廷亮, 高继伟, 李彦, 何冰, 李顺. 施肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 208-213, 221-221.
- [9] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 岷江流域不同土地利用方式对土壤有机碳组分及酶活性的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(9): 1617-1624.
- [10] 姜霞, 王进, 李丛瑞, 戴晓勇, 张贵云, 刘兰. 黔中地区 3 种林分土壤轻组有机碳含量研究. *江苏农业科学*, 2013, 41(2): 359-361.
- [11] 程彩芳, 李正才, 周君刚, 吴亚丛, 赵志霞, 孙娇娇. 北亚热带地区退化灌木林改造为人工阔叶林后土壤活性碳库的变化. *林业科学研究*, 2015, 28(1): 101-108.
- [12] 陈小花. 海南文昌滨海台地不同森林类型土壤碳储存特征研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
- [13] 李小平. 川南三种林地土壤有机碳及其组分研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [14] 李菊, 王琴, 孙辉. 海拔梯度对川西高寒土壤轻组有机碳动态影响研究. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 51-55.
- [15] 宫立, 刘国华, 李宗善, 叶鑫, 王浩. 川西卧龙岷江冷杉林土壤有机碳组分与氮素关系随海拔梯度的变化特征. *生态学报*, 2017, 37(14): 4696-4705.
- [16] 秦纪洪, 王琴, 孙辉. 川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化. *生态学报*, 2013, 33(18): 5858-5864.
- [17] 马延虎, 刘育红, 魏卫东. 冻融作用对退化高寒草甸土壤有机碳及组分的影响. *现代农业科技*, 2018, (20): 175-176.
- [18] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1799-1806.
- [19] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [20] 郭璐璐, 李安迪, 商宏莉, 孙守琴. 川西贡嘎山不同森林生态系统土壤有机碳垂直分布与组成特征. *中国农业气象*, 2018, 39(10): 636-643.

- [21] Song B, Niu S L, Zhang Z, Yang H J, Li L H, Wan S Q. Light and heavy fractions of soil organic matter in response to climate warming and increased precipitation in a temperate steppe. *PLoS One*, 2012, 7(3): e33217.
- [22] 秦纪洪, 武艳燭, 孙辉, 马丽红. 低温季节西南亚高山森林土壤轻组分有机碳动态. *土壤*, 2012, 44(3): 413-420.
- [23] 李晓杰, 刘小飞, 林成芳, 陈仕东, 熊德成, 林伟盛, 胥超, 谢锦升, 杨玉盛. 土壤增温调节中亚热带森林更新初期植物生物量分配格局. *生态学报*, 2017, 37(1): 25-34.
- [24] 严力蛟, 杨伟康, 林国俊, 董萍. 气候变暖对森林生态系统的影响. *热带地理*, 2013, 33(5): 621-627.
- [25] 赵华晨, 高菲, 李斯雯, 高雷, 王明哲, 崔晓阳. 长白山阔叶红松林和杨桦次生林土壤有机碳氮的协同积累特征. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1615-1624.
- [26] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [27] 黄文超, 黄丽莉. 马尾松-木荷混交造林效果的调查研究. *林业科学研究*, 2004, 17(3): 316-320.
- [28] Sun T, Hobbie S E, Berg B, Zhang H G, Wang Q K, Wang Z W, Hättenschwiler S. Contrasting dynamics and trait controls in first-order root compared with leaf litter decomposition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(41): 10392-10397.
- [29] 黄小娟, 郝庆菊, 吴艳. 紫色水稻土轻组有机质的季节动态研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(12): 1579-1585.
- [30] 许延昭, 马维伟, 李广, 吴江琪, 孙文颖. 尕斯库勒湖湿地植被退化过程中土壤轻重组有机碳动态变化特征. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 205-211.
- [31] Boone R D. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11): 1459-1468.
- [32] 裴隆翠, 陈月明, 张鑫, 陈祥伟. 红松人工林植被恢复对土壤活性有机碳组分影响的时效性. *东北林业大学学报*, 2019, 47(6): 21-25.
- [33] 严海元, 辜夕容, 申鸿. 森林凋落物的微生物分解. *生态学杂志*, 2010, 29(9): 1827-1835.
- [34] 陈苏, 谢建坤, 黄文新, 陈登云, 彭晓剑, 付学琴. ‘南丰蜜橘’园生草对土壤有机碳及其组分的影响. *果树学报*, 2018, 35(3): 285-292.
- [35] 孙力. 天山森林不同植被类型土壤有机碳组分动态[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [36] 叶思源, 陈展, 曹吉鑫, 尚鹤. 模拟酸雨和接种外生菌根真菌对马尾松土壤养分、土壤团聚体及有机碳组分的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1141-1148.
- [37] Sokol N W, Bradford M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 46-53.
- [38] 弓明钦, 陈应龙, 仲崇禄. 菌根研究及应用. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [39] Mayer S, Kolbl A, Völkel J, Kogel-Knabner I. Organic matter in temperate cultivated floodplain soils: light fractions highly contribute to subsoil organic carbon. *Geoderma*, 2019, 337(1): 679-690.