

doi: 10.11707/j.1001-7488.20170609

环割对杉木和马尾松人工林土壤微生物群落结构的影响*

贺同鑫^{1,2} 孙建飞¹ 李艳鹏² 俞有志² 胡宝清¹ 王清奎²

(1. 广西师范学院 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室 广西地表过程与智能模拟重点实验室 南宁 530001;

2. 中国科学院会同森林生态实验站 会同 418307)

摘要: 【目的】以期揭示环割对森林土壤微生物群落结构的影响。【方法】2012 年 6 月在杉木和马尾松人工林中分别布置 6 个 6 m × 6 m 样方,每个样方至少包含 5 棵树。杉木和马尾松平均树高分别为 16.3 和 15.3 m,平均胸径分别为 18.5 和 17.2 cm。每种林分随机选择 3 个样方进行环割,即在树木胸径处去除 10 cm 宽的树皮和韧皮部,以阻断光合产物的地下碳分配,剩余 3 个为对照。环割 1 个月后测定土壤基本理化性质,环割 1 个月和 1 年后采用磷脂脂肪酸方法测定土壤微生物群落结构。【结果】杉木林环割 1 个月后土壤可溶性有机碳含量降低了 18.3% ($P < 0.01$),硝态氮增加了 182.1% ($P < 0.01$),有效磷和土壤含水量分别增加了 66.9% 和 10.6% ($P < 0.05$);马尾松林环割 1 个月后土壤可溶性有机碳、硝态氮和有效磷含量分别增加了 11.3%、72.7% 和 235.5% ($P < 0.05$),土壤含水量增加了 12.1% ($P < 0.01$)。环割降低了土壤微生物生物量并改变了微生物群落结构,而且这种影响存在树种和时间差异性。杉木林环割 1 个月后总磷脂脂肪酸、细菌、真菌、真菌:细菌和革兰氏阴性细菌含量分别降低了 10.3%、10.9%、20.0%、10.1% 和 13.4% ($P < 0.05$),环割 1 年后细菌和革兰氏阴性细菌的含量分别降低了 20.3% 和 22.1% ($P < 0.05$);马尾松林环割 1 个月后真菌和革兰氏阳性细菌的含量分别降低了 21.9% 和 14.5% ($P < 0.05$);环割 1 年后总磷脂脂肪酸、细菌和放线菌含量分别降低了 17.8%、15.9% 和 27.4% ($P < 0.05$);环割 1 个月后杉木林土壤中磷脂脂肪酸 $cy17:0/16:1\omega7c$ 显著升高 ($P < 0.05$),而马尾松林中该比值的升高则发生在环割 1 年后 ($P < 0.05$),该比值的升高表明可利用碳有效性不足引起了微生物生长压力。相关分析表明土壤可溶性有机碳含量与总磷脂脂肪酸、细菌、真菌、革兰氏阳性细菌和革兰氏阴性细菌含量极显著正相关 ($P < 0.01$),土壤 $NO_3^- -N$ 和全氮含量均与细菌和革兰氏阳性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$),土壤有效磷含量与革兰氏阳性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$),土壤 $NH_4^+ -N$ 含量与总磷脂脂肪酸、细菌、革兰氏阳性细菌和革兰氏阴性细菌含量极显著负相关 ($P < 0.01$),与真菌含量显著负相关 ($P < 0.05$),土壤 pH 值与总磷脂脂肪酸、细菌、真菌和革兰氏阳性细菌含量极显著正相关 ($P < 0.01$),与革兰氏阴性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$),土壤有机碳含量与总磷脂脂肪酸、细菌、真菌和革兰氏阳性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$),全磷含量与总磷脂脂肪酸、真菌和革兰氏阴性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$),与细菌和革兰氏阳性细菌含量极显著正相关 ($P < 0.01$),土壤含水量与土壤微生物生物量没有显著相关性 ($P > 0.05$)。【结论】环割导致植物光合产物供应变化,进而改变了土壤碳的可利用性及养分有效性,降低了土壤微生物生物量,改变了微生物群落结构,且对真菌群落的影响要高于细菌群落,而且环割对微生物的影响具有树种差异性。

关键词: 杉木; 马尾松; 人工林; 磷脂脂肪酸; 环割; 微生物群落结构

中图分类号: S714.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2017)06-0077-08

Effects of Girdling on Soil Microbial Community Composition in *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* Plantations

He Tongxin^{1,2} Sun Jianfei¹ Li Yanpeng² Yu Youzhi² Hu Baoqing¹ Wang Qingkui²

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf of Ministry of Education Guangxi Key Laboratory of

Earth Surface Processes and Intelligent Simulation Guangxi Teachers Education University Nanning 530001;

2. Huitong Experimental Station of Forest Ecology, Chinese Academy of Sciences Huitong 418307)

Abstract: 【Objective】This study was carried out to reveal the effect of girdling on forest soil microbial community

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2017-01-20。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB15010301); 国家自然科学基金项目 (31570466); 国家重点研发计划 (2016YFA0600801); 广西科学研究与技术开发计划 (14125008-2-24)。

* 王清奎为通讯作者。

composition. **【Method】** Six plots (6 m × 6 m) were established in *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* stands respectively in June 2012, and each plot contained at least 5 trees. The mean heights of *C. lanceolata* and *P. massoniana* were 16.3 and 15.3 m respectively, and the mean diameters at breast height were 18.5 and 17.2 cm respectively. Three plots were randomly selected as girdling treatment, and trees were girdled by removing 10 cm of bark and phloem over the entire circumference of the stem at breast height, and the others as control treatment. Soil physicochemical properties were measured after one month of girdling, and microbial community composition was measured by phospholipid fatty acid after one month and one year of girdling respectively. **【Result】** The content of dissolved organic carbon was decreased by 18.3% ($P < 0.01$), and the content of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ was increased by 182.1% ($P < 0.01$), and available phosphorus content and soil water content were increased by 66.9% and 10.6% respectively ($P < 0.05$) after one month of girdling in the *C. lanceolata* plantation. In the *P. massoniana* plantation, the contents of dissolved organic carbon, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and available phosphorus were increased by 11.3%, 72.7% and 235.5% respectively ($P < 0.05$), and soil water content was increased by 12.1% ($P < 0.01$) after one month of girdling. Girdling decreased soil microbial biomass and altered the microbial community composition in both plantations, while the effects of girdling on soil microbes were different between the two tree species at different sampling time. In the *C. lanceolata* plantation, the contents of total PLFAs, bacteria, fungi, the ratio of fungi to bacteria and Gram-negative bacteria were significantly decreased by 10.3%, 10.9%, 20.0%, 10.1%, and 13.4% respectively ($P < 0.05$) after one month of girdling, and girdling decreased the contents of bacteria and Gram-negative bacteria by 20.3% and 22.1% respectively ($P < 0.05$) one year later. In the *P. massoniana* plantation, the contents of fungi and Gram-positive bacteria decreased by 21.9% and 14.5% respectively ($P < 0.05$) after one month of girdling, and the contents of total PLFAs, bacteria and actinomycetes were decreased by 17.8%, 15.9%, and 27.4% respectively ($P < 0.05$) after one year of girdling. Additionally, the ratio of cy17:0 to 16:1 ω 7c was significantly increased ($P < 0.05$) after one month of girdling in the *C. lanceolata* plantation, and that occurred after one year of girdling in the *P. massoniana* plantation ($P < 0.05$), indicating that the microbial growth was limited by the lack of available carbon. Correlation analysis result showed that the content of dissolve organic carbon was significantly positively correlated with the contents of total PLFAs, bacteria, fungi, Gram-positive bacteria and Gramnegative bacteria ($P < 0.01$); the contents of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and total nitrogen were significantly positively related to the contents of bacteria and Gram-positive bacteria ($P < 0.05$); soil available phosphorus content was significantly positively correlated with Gram-positive bacteria content ($P < 0.05$); the content of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ was significantly negatively correlated with the contents of total PLFAs, bacteria, Gram-positive bacteria and Gram-negative bacteria ($P < 0.01$), and fungi ($P < 0.05$); soil pH was significantly positively correlated with the contents of total PLFAs, bacteria, fungi and Gram-positive bacteria ($P < 0.01$), and Gram-negative bacteria ($P < 0.05$); soil organic carbon content had significantly positive correlation with the contents of total PLFAs, bacteria, fungi and Gram-positive bacteria ($P < 0.05$); total phosphorus content had significantly positive correlation with the contents of total PLFAs, fungi and Gram-negative bacteria ($P < 0.05$), and bacteria and Gram-positive bacteria ($P < 0.01$); there was no relationship between soil water content and microbial biomass ($P > 0.05$). **【Conclusion】** Girdling altered the soil carbon and nutrient availability by altering plant photosynthate supplying and soil nutrient uptake, and thereby decreased soil microbial biomass and altered microbial community composition. The effect of girdling on fungi was more intense than that on bacteria, and the effects of girdling on microbial biomass and community composition were different in the two plantations.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; *Pinus massoniana*; plantation; phospholipid fatty acid; girdling; microbial community composition

土壤微生物通过调控陆地生态系统元素转化和物质循环过程,对土壤肥力的形成和保育产生重要影响,进而影响土壤健康和生态服务功能。土壤微生物通过种群的消长与植物的养分吸收形成互补,维持和调节着生态系统的元素生物地球化学过程(方丽娜等,2011)。土壤微生物能够调控土壤碳

库,反之,土壤碳有效性也能影响土壤微生物群落结构(Brant *et al.*,2006; Tóth *et al.*,2007)。植物最新固定的光合产物约有30%~60%被输送到根系,其中约20%会以根系分泌物的形式进入到土壤中(Mucha *et al.*,2005; Yarwood *et al.*,2009)。根系及根系分泌物是土壤微生物可利用碳的重要来源

(Wang et al., 2013) 光合产物供应的变化可能会通过改变根系分泌物进而影响土壤微生物群落结构。因此了解光合产物供应对土壤微生物的影响有助于更好地探索碳输入的改变对土壤碳循环的影响。

自 Högberg 等 (2001) 利用环割法研究改变光合产物供应对土壤呼吸的影响之后, 因其对土壤-根系-生物系统的扰动较少, 因而被越来越多的学者采用。前人研究表明环割通过阻断光合产物供应, 改变土壤理化性质 (尤其是活性碳库和氮库), 从而对土壤微生物群落结构产生重要影响 (Högberg et al., 2007; 2010; Kaiser et al., 2010; Chen et al., 2012; Keel et al., 2012)。然而不同生态系统中环割对土壤微生物的影响有很大的差别, 如在欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 和欧洲云杉 (*Picea abies*) 林中环割导致微生物生物量显著下降 30% ~ 40% ($P < 0.05$) (Högberg et al., 2001; Subke et al., 2004)。而在尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*) 和厚荚相思 (*Acacia crassicaarpa*) 2 个人工林中, 环割对土壤微生物生物量并没有产生显著影响, 同时其研究表明环割降低了真菌含量, 但增加了细菌含量, 因而改变了土壤微生物群落结构, 然而环割对 2 种人工林的影响程度具有较大的差异 (Chen et al., 2012)。这表明土壤微生物群落结构对环割的响应可能存在树种差异, 但是这方面的研究还较少, 限制了深入理解光合产物供应的改变对土壤微生物群落结构的影响。

目前, 利用环割的方法探讨光合产物供应对土壤碳库、土壤呼吸及树干呼吸影响的研究较多 (Högberg et al., 2001; Chen et al., 2010; Maier et al., 2010; Trahan et al., 2015), 而对土壤微生物群落影响的研究则相对较少, 尤其是树种差异性更是鲜有报道。为了研究环割对土壤微生物群落结构的影响是否具有树种差异性, 且其时间效应又是怎样的? 本研究在湖南中国科学院会同森林生态实验站选择了亚热带地区常见的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*) 2 种人工纯林, 在林中分别设置 6 个 6 m × 6 m 样方, 并进行环割试验。环割 1 个月和 1 年后利用磷脂脂肪酸的方法测定土壤微生物群落结构, 探讨环割对不同树种土壤微生物的影响, 环割 1 个月后测定土壤基本理化性质, 探讨环割后土壤碳氮有效性的变化及其对土壤微生物的影响, 以期揭示环割对土壤微生物群落结构的影响。

1 研究区概况

研究区位于湖南省西南部的中国科学院会同森

林生态实验站 (110°08'E, 27°09'N)。该地区为低山丘陵地貌类型, 海拔 200 ~ 500 m, 属于典型的亚热带湿润气候, 年均气温 16.5 °C, 年降水量 1 200 ~ 1 400 mm, 土壤为山地红黄壤, pH 值为 4 ~ 6。地带性植被为以丝栗栲 (*Castanopsis fargesii*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 和刨花润楠 (*Machilus pauhoi*) 等为建群种的天然常绿阔叶林; 主要人工林类型为杉木、毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 和马尾松人工纯林。

2 研究方法

2.1 试验设置、环割方法和植被管理

2012 年 6 月, 分别在 26 年生杉木及 23 年生马尾松 2 个人工纯林内开展试验, 2 个人工林的密度均为 1 200 株·hm⁻²。在每个林中选择 6 个 6 m × 6 m 样方, 每个样方至少包含 5 棵树。样地坡度约为 23°, 坡向为南坡, 坡位为中坡。土壤厚 70 ~ 80 cm, 土壤密度为 1.2 g·cm⁻³, 土壤孔隙度约为 35%。土壤质地较黏重, 为中黏壤至重黏壤, 土体中石砾含量约 15%。杉木和马尾松平均树高分别为 16.3 和 15.3 m, 平均胸径分别为 18.5 和 17.2 cm。杉木林和马尾松林的枯落物层厚度分别约为 5 和 2 cm, 郁闭度分别为 0.7 和 0.8。

每种林分 6 个样方中随机选 3 个为对照 (CK), 3 个进行环割处理。环割处理是指在树木胸径处去除 10 cm 宽的树皮及韧皮部。环割处理后杉木和马尾松在环割部位下方萌芽, 因此每个月去掉萌芽。马尾松环割后 3 个月开始掉叶, 掉在地上的叶子尽快移除样地外以避免在样地内积累。杉木的凋落物比较特殊, 叶同枝一起掉落, 且一般即使叶子枯萎也不会立马掉落, 因此杉木林中的凋落物层没有太大变化。

杉木林中林下植被主要有杜茎山 (*Maesa japonica*)、蔷薇叶悬钩子 (*Rubus rosifolius*)、蕨 (*Pteridium aquilinum*)、中华金星蕨 (*Parathelypteris chinensis*) 和边缘鳞盖蕨 (*Microlepia marginata*), 在试验期间每月都在环割和对照小区用砍刀清除林下植被, 为避免对土壤干扰, 只去掉地上部分, 并移除。马尾松林中的林下植被很少, 没有进行处理。

2.2 土壤样品采集及室内处理

分别于 2012 年 7 月和 2013 年 7 月采集表层土壤 (0 ~ 10 cm), 在每个样方距离边界 1 m 以内的地方随机选取 10 个点, 去除地表凋落物, 用土钻 (直径为 4.5 cm) 进行采样, 然后混合成一个土壤样品。用手除去植物根系及石砾, 立即过 2 mm 筛。称取

20 g 鲜土在 105 °C 条件下烘 24 h 测定土壤含水量。其余土壤样品一部分冻干后于 -20 °C 中保存,用于测定土壤微生物群落结构;一部分新鲜土样保存在 4 °C 冰箱中用于测定可溶性有机碳(DOC)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量,剩余土壤样品风干后用于测定土壤有机碳、全氮、全磷和有效磷含量及 pH 值。

2.3 土壤理化指标测定

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量采用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾浸提-靛酚蓝比色,紫外分光光度计 625 nm 波长下比色测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量采用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾浸提法测定,紫外分光光度计 220 和 275 nm 波长下比色;土壤 DOC 含量采用 K_2SO_4 浸提法(Scott-Denton *et al.*, 2006),用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2SO_4 提取($300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 震荡 30 min),浸提液中有有机碳含量采用 TOC 分析仪测定(multi N/C 2100, 德国);土壤有效磷含量采用 $0.05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 和 $0.025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H_2SO_4 的混合溶液浸提,钼锑抗比色法,紫外分光光度计 700 nm 波长测定;土壤 pH 值采用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液以 1:2.5 (W/V) 的土水比例浸提,pH 计测量;土壤有机碳和全氮含量采用元素分析仪测定(Vario MAX CN, Elementar Co., Hanau, 德国);土壤全磷含量采用高氯酸-硫酸煮煮,钼锑抗比色法测定。

2.4 土壤微生物群落结构分析

土壤微生物群落结构的测定采用磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acid, PLFA)分析方法,采用改进后的简单提取法(Frostegård *et al.*, 1996; Bossio *et al.*, 1998),主要分为脂类提取、分离及甲基化 3 个步骤。1) 按照 1:4 的比例加入提取液(柠檬酸缓冲液、氯仿和甲醇按 0.8:1:2 体积比混合)于黑暗中充分震荡 3 h,然后离心取上清液($2500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min)。重复此过程,将 2 次上清液合并。向上清液中加入氯仿及缓冲液,混匀,静置过夜。吸取氯仿层, N_2 吹干。2) 依次采用氯仿、丙酮和甲醇分离出中性脂、糖脂和磷脂,收集甲醇相, N_2 吹干。3) 甲基化:将磷脂溶于 1:1 的甲醇和甲苯溶液中,加入 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钾甲醇溶液进行皂化,最后用正己烷萃取,收集正己烷相,即为磷脂脂肪酸甲酯。在测定前 2~3 天,加入 19:0 的内标以定量。采用气相色谱质谱仪(安捷伦 GC-MS 6890 N-5973 N)测定每个样品中的磷脂脂肪酸甲酯。PLFA 含量用 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示。从土壤中提取的 PLFA 的量可表征土壤微生物的群落结构。PLFA 的群落分类详见贺同鑫等(2015),PLFA 的命名方式中的 i、a、cy 和 Me,分别表示异、反异、环丙基和甲基分枝脂肪酸;

ω 、c 和 t 分别表示脂肪端、顺式空间构造和反式空间构造。

2.5 数据处理

所有数据统计分析基于 SPSS 17.0 软件进行。采用独立样本 *t* 检验分析土壤微生物群落各组分(细菌、真菌和放线菌)和土壤基本理化性质的差异。相关分析采用 Pearson 检验法。在统计检验过程中,显著水平为 $P < 0.05$,极显著水平为 $P < 0.01$ 。

3 结果与分析

3.1 树木生长变化

杉木具有很强的萌发能力,环割 1 个月后,其枝叶没有显著变化;环割 1 年后仍具萌芽能力,大部分枝叶仍是绿色的,因此表明杉木仍有大部分根系存活。马尾松萌芽能力很弱,环割 3 个月内,树木 80% 的枝叶已经死亡;环割 1 年后枝叶全部凋落,树木已经全部死亡。

3.2 土壤性质变化

环割 1 个月后,杉木林土壤 DOC 含量显著降低了 18.3% ($P < 0.01$),但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 增加了 182.1% ($P < 0.01$),有效磷含量和土壤含水量分别增加了 66.9% 和 10.6% ($P < 0.05$);马尾松林土壤 DOC、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和有效磷含量分别增加了 11.3%、72.7% 和 235.5% ($P < 0.05$),土壤含水量增加了 12.1% ($P < 0.01$)。环割对杉木林和马尾松林土壤有机碳、全氮、全磷含量、pH 值和碳氮比都没有产生显著影响($P > 0.05$, 表 1)。

3.3 土壤微生物群落结构

杉木和马尾松 2 种人工纯林的土壤微生物生物量表现为细菌 > 真菌 > 放线菌含量(图 1b, c, h),表明在亚热带人工林中土壤微生物是以细菌为主体的群落结构。环割处理 1 个月后和 1 年后杉木和马尾松土壤总微生物生物量(总磷脂脂肪酸含量)、细菌、真菌和放线菌含量总体呈现降低趋势,而且其群落结构均发生了显著变化(图 1)。环割处理 1 个月后,杉木林土壤微生物生物量和群落结构变化比马尾松林大;但 1 年后,马尾松比杉木变化大(图 1a, d)。

杉木林中,环割 1 个月后总磷脂脂肪酸、细菌、真菌含量、真菌:细菌和革兰氏阴性细菌含量分别下降了 10.3%、10.9%、20.0%、10.1% 和 13.4% ($P < 0.05$);环割 1 年后,细菌和革兰氏阴性细菌含量分别下降了 20.3% 和 22.1% ($P < 0.05$)。马尾松林中,环割 1 个月后真菌和革兰氏阳性细菌含

量分别下降 21.9% 和 14.5% ($P < 0.05$); 环割 1 年后, 总磷脂脂肪酸、细菌和放线菌含量下降了 17.8%、15.9% 和 27.4% ($P < 0.05$)。此外, 杉木

林中环割处理 1 个月后磷脂脂肪酸 $cy17:0/16:1\omega7c$ 显著升高, 而在马尾松林中环割处理 1 年后该比值显著升高 ($P < 0.05$ 图 1i)。

表 1 环割 1 个月后土壤理化性质变化^①

Tab. 1 Variation of soil physicochemical properties after one month of girdling

土壤理化性质 Soil physicochemical properties	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>		马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	
	对照 Control	环割 Girdling	对照 Control	环割 Girdling
土壤有机碳含量 Soil organic carbon content/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	11.1 ± 0.3	11.0 ± 0.9	14.2 ± 1.4	14.6 ± 0.4
全氮含量 Total nitrogen content/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	1.3 ± 0.0	1.3 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.1
土壤有机碳含量/全氮含量 Soil organic carbon content/total nitrogen content	8.7 ± 0.3	8.6 ± 0.1	9.2 ± 0.2	9.0 ± 0.2
可溶性有机碳含量 Dissolved organic carbon content/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	397.7 ± 7.8	325.0 ± 9.1**	471.6 ± 3.8	524.8 ± 12.5*
铵态氮含量 $NH_4^+ -N$ content/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	19.9 ± 0.8	19.1 ± 0.6	16.1 ± 1.4	16.5 ± 0.6
硝态氮含量 $NO_3^- -N$ content/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	2.6 ± 0.5	7.4 ± 0.9**	9.9 ± 0.5	17.0 ± 1.6*
全磷含量 Total phosphorus content/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	75.4 ± 1.8	69.4 ± 2.9	88.2 ± 1.6	96.1 ± 2.9
有效磷含量 Available phosphorus content/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	0.8 ± 0.2	1.3 ± 0.1*	0.9 ± 0.1	2.9 ± 0.5*
pH 值 Soil pH value	3.6 ± 0.0	3.6 ± 0.0	3.8 ± 0.1	3.7 ± 0.1
土壤含水量 Soil water content (%)	19.9 ± 0.4	22.0 ± 1.0*	20.7 ± 0.4	23.2 ± 0.4**

① * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$. 下同 The same below.

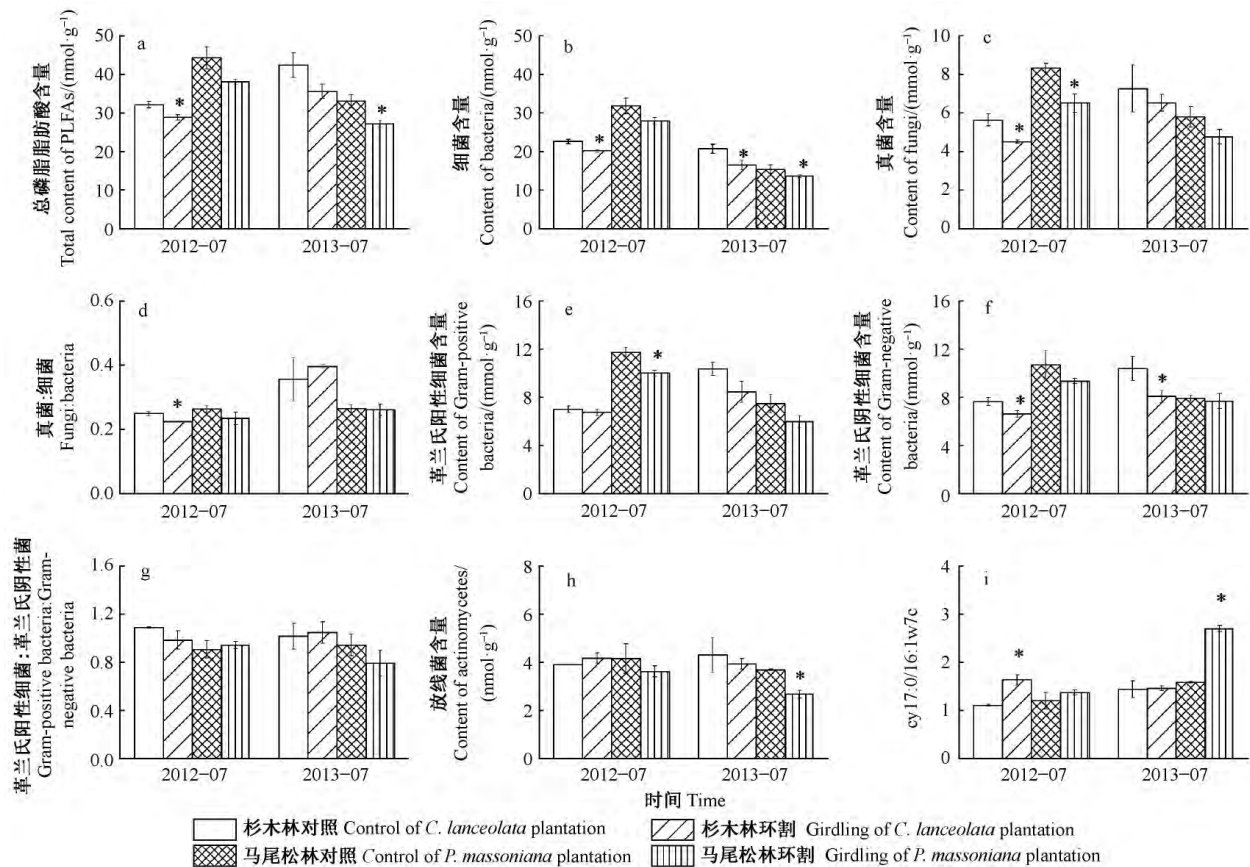


图 1 环割处理 1 个月和 1 年后土壤微生物群落结构变化

Fig. 1 Variation of soil microbial community composition after one month and one year of girdling

3.4 土壤微生物和土壤性质的相关性分析

土壤 DOC 含量与总磷脂脂肪酸、细菌、真菌、革兰氏阳性细菌和革兰氏阴性细菌含量极显著正相关 ($P < 0.01$ 表 2); 土壤 $NO_3^- -N$ 和全氮含量均与细菌和革兰氏阳性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$);

土壤有效磷含量与革兰氏阳性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$); 土壤 $NH_4^+ -N$ 含量与总磷脂脂肪酸、细菌、革兰氏阳性细菌和革兰氏阴性细菌含量极显著负相关 ($P < 0.01$), 与真菌含量显著负相关 ($P < 0.05$); 土壤 pH 值与总磷脂脂肪酸、细菌、真菌和革

兰氏阳性细菌含量极显著正相关 ($P < 0.01$) ,与革兰氏阴性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$) ;土壤有机碳含量与总磷脂脂肪酸、细菌、真菌和革兰氏阳性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$) ;全磷含量与总磷

脂脂肪酸、真菌和革兰氏阴性细菌含量显著正相关 ($P < 0.05$) ,与细菌和革兰氏阳性细菌极显著正相关 ($P < 0.01$) ;土壤含水量与土壤微生物生物量没有显著相关性 ($P > 0.05$) 。

表 2 土壤微生物群落结构与土壤性质相关性^①

Tab. 2 Correlations between soil microbial community composition and soil properties

项目 Item	总磷脂脂肪酸含量 Total phospholipid fatty acids content	细菌含量 Bacteria content	真菌含量 Fungi content	放线菌含量 Actinomycetes content	革兰氏阳性细菌含量 Gram-positive bacteria content	革兰氏阴性细菌含量 Gram-negative bacteria content	真菌:细菌 Ratio of fungi to bacteria	革兰氏阳性细菌:革兰氏阴性细菌 Ratio of Gram-positive bacteria to Gram-negative bacteria
可溶性有机碳含量 Dissolved organic carbon content	0.747 **	0.787 **	0.736 **	-0.290	0.778 **	0.750 **	0.324	-0.252
硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	0.433	0.530 *	0.345	-0.204	0.585 *	0.448	-0.088	-0.453
有效含量磷 Available phosphorus content	0.035	0.105	-0.098	-0.257	0.542 *	0.067	-0.416	-0.315
铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	-0.820 **	-0.840 **	-0.646 *	-0.333	-0.834 **	-0.833 **	0.049	0.304
pH 值 Soil pH	0.736 **	0.741 **	0.709 **	0.071	0.783 **	0.635 *	0.280	-0.486
土壤含水量 Soil water content	-0.014	0.037	-0.123	-0.163	0.089	0.094	-0.384	-0.015
土壤有机碳含量 Soil organic carbon content	0.567 *	0.546 *	0.568 *	-0.493	0.669 *	0.452	0.354	-0.485
全氮含量 Total nitrogen content	0.465	0.517 *	0.482	-0.490	0.634 *	0.440	0.201	-0.471
全磷含量 Total phosphorus content	0.683 *	0.721 **	0.679 *	-0.296	0.747 **	0.695 *	0.301	-0.292

① **: $P < 0.01$; * : $P < 0.05$.

4 讨论

4.1 土壤养分有效性的变化

本研究中无论是杉木林还是马尾松林环割后土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和有效磷含量均升高(表 1) ,这与前人的研究结果相一致(Zeller *et al.*, 2008; Dannenmann *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2012) 。环割一方面导致根系吸收土壤养分能力降低,另一方面降低微生物活性碳供应,受到碳限制的微生物促进土壤有机质分解,同时增加了氮和磷的矿化,导致了土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和有效磷含量升高(Zeller *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2012) 。然而杉木和马尾松林中土壤 DOC 含量对环割产生了不同的响应,说明环割对土壤碳有效性的影响具有树种差异性,推测这种差异主要是由树种萌芽能力造成的。土壤 DOC 主要有 2 个来源,其一是植物最新固定的光合产物输入,其二是土壤有机碳的分解(Carrillo *et al.*, 2012) 。环割一方面会导致树木根系减少向土壤中的碳输入,降低土壤 DOC 含量,另一方面导致土壤中根系发生死亡,增加微生物有机质利用底物,促进有机质的分解,增加土壤 DOC 含量。由于杉木具有较强的萌芽能力,根系在

短时间内不易死亡,而且土壤中较为丰富的可利用性 N、P 有利于维持短时间内植物根系的生长,促进杉木萌芽。萌芽过程中根系增加对新生芽的碳供应,减少向土壤中的碳输入,因此降低的光合产物碳供应和萌芽增加植物根系储存碳的消耗导致杉木土壤 DOC 含量的下降;而马尾松的萌生能力较弱,环割后大部分根系死亡并分解,从而导致土壤 DOC 含量有所升高。

4.2 土壤微生物群落结构的变化

本研究结果表明环割处理后,土壤总微生物生物量、真菌和细菌含量均显著降低,表明土壤微生物对地上光合产物具有依赖性,而且光合碳输入的改变对真菌群落的影响要显著高于细菌群落。环割处理 1 个月显著降低了 2 种人工林中真菌含量,但是并没有对马尾松土壤细菌群落产生显著影响;而且尽管杉木林中环割导致细菌生物量下降了 10.9%,但真菌下降的程度(20.3%)显著高于细菌(图 1b, c) 。这主要是由于真菌比其他微生物群落更依赖于光合产物供应(Keith-Roach *et al.*, 2002) ,而且前人的研究也表明地下光合碳输入的降低导致依赖于根系分泌物的菌根真菌数量显著下降(Högberg *et*

al., 2007; 2010; Kaiser *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2012)。此外, 本研究结果表明环割 1 个月后, 杉木土壤革兰氏阴性细菌含量显著下降(图 1f), 也说明光合产物供应的重要性, 因为革兰氏阴性细菌更倾向于利用根系分泌的活性碳(Treonis *et al.*, 2004)。

本研究发现环割对土壤微生物群落的影响具有树种差异性。在杉木林中环割 1 个月后, 总磷脂脂肪酸、细菌、真菌、革兰氏阴性细菌含量和真菌: 细菌都显著下降, 而在马尾松林中, 环割 1 个月仅降低了真菌和革兰氏阳性细菌的含量。这表明短时间内阻断光合产物供应后, 杉木林土壤微生物的响应大于马尾松林, 这归结于树种本身的生理特性。杉木具有很强的萌芽作用, 大部分根系一直保持活性, 杉木在环割 1 年后仍有大部分树枝是活的也支持这一观点。在同样具有萌芽作用的尾叶桉人工林中, Chen 等(2010)发现环割 6 个月后其根系生物量仅下降了 18%, 这主要是由于尾叶桉根系中存储的大量淀粉使得根系在环割后很长的时间都不会死亡, 并且有利于促进尾叶桉树木萌芽(Binkley *et al.*, 2006)。环割减弱了植物地下碳输入, 但并没有造成植物根系的大量死亡, 而且植物活根系中储存的碳更多地用于维持根系生长和促进植物萌芽, 因而减少向土壤中的碳输入(表 1), 导致微生物生长受到碳限制。前人的研究表明磷脂脂肪酸 $cy17:0/16:1\omega7c$ 可以用来指示基质可利用性的限制作用(Moore-Kucera *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2009), 该比值的升高表明基质有效性不足增加了微生物生长压力。杉木林中显著升高的微生物磷脂脂肪酸 $cy17:0/16:1\omega7c$ 也说明环割 1 个月后微生物受到可利用性碳的限制。而马尾松萌芽能力较弱, 环割后大部分根系死亡, 尽管环割降低了植物光合碳供应, 但是死亡的根系为微生物提供了分解底物, 增加土壤可利用性碳(表 1), 从而在短时间内降低了环割对微生物的影响。然而, 环割 1 年对马尾松土壤微生物的影响要高于杉木林。这主要是由于环割 1 年后, 杉木的萌芽能力逐渐减弱, 因而减少了对根系碳的消耗, 而且死亡的根系量增加, 两者为土壤微生物提供较充足的碳(图 1i), 有利于维持微生物的生长。而在马尾松林中, 环割 1 年后, 死亡根系中的可利用性碳已被微生物消耗, 而且缺乏新的碳输入导致微生物受到碳限制, 从而抑制了微生物生长(图 1i)。

环割对土壤微生物的树种差异性影响具有时间效应, 主要是由于 2 个树种的萌芽能力不同, 导致环割后短期和长期时间段内土壤碳输入发生变化。本

研究中土壤 DOC 含量与微生物生物量之间的显著正相关关系也证明了土壤可利用性碳的变化是导致土壤微生物发生变化的主要原因(表 2)。Chen 等(2012)在尾叶桉和厚荚相思人工林的研究结果也表明, 由于植物光合碳供应和死根分解碳补给的变化, 导致环割对土壤微生物的影响随时间发生变化。

5 结论

通过在亚热带杉木和马尾松 2 种人工林中为期 1 年的环割试验发现: 1) 环割降低了土壤微生物生物量, 且改变了土壤微生物群落结构, 这表明土壤微生物在很大程度上依赖于光合产物地下碳分配, 而且真菌对植物光合碳的依赖高于细菌; 2) 杉木和马尾松林土壤微生物对环割的响应具有较大的差异, 表明环割对土壤微生物群落结构的影响具有树种差异性, 而且这种差异性在时间尺度上受到植物光合碳供应和死根分解碳补给的调控。本研究表明采用环割的方法改变光合产物碳供应是一种有效的方法, 但是由于其对土壤微生物的影响具有树种差异性, 因此在今后的研究中应将树种本身的特性及测定时间考虑在内。此外, 这一结果也在一定程度上解释了目前研究中不同生态系统中结果差异较大的原因。但是由于本研究中重复数量偏少, 而且由于对树木的破坏性使得小区面积也偏小, 且研究时间不够长使得对环割的时间效应的研究不是很深入, 因此在今后的研究中应加强此方面的研究, 从而更好地探索光合产物供应变化对土壤微生物群落结构的影响, 以为研究碳循环提供更准确的基础数据。

参 考 文 献

- 方丽娜, 杨效东, 杜杰. 2011. 土地利用方式对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳的影响. 应用生态学报, 22(4): 837 - 844.
- (Fang L N, Yang X D, Du J. 2011. Effects of land use pattern on soil microbial biomass carbon in Xishuangbanna. Chinese Journal of Applied Ecology 22(4): 837 - 844. [in Chinese])
- 贺同鑫, 李艳鹏, 张方月, 等. 2015. 林下植被剔除对杉木林土壤呼吸和微生物群落结构的影响. 植物生态学报, 39(8): 797 - 806.
- (He T X, Li Y P, Zhang F Y *et al.* 2015. Effects of understory removal on soil respiration and microbial community composition structure in a Chinese fir plantation. Chinese Journal of Plant Ecology 39(8): 797 - 806. [in Chinese])
- Binkley D, Stape J L, Takahashi E N, *et al.* 2006. Tree-girdling to separate root and heterotrophic respiration in two *Eucalyptus* stands in Brazil. *Oecologia*, 148(3): 447 - 454.
- Bossio D A, Scow K M, Gunapala N, *et al.* 1998. Determinants of soil microbial communities: effects of agricultural management, season,

- and soil type on phospholipid fatty acid profiles. *Microbial Ecology*, 36 (1): 1–12.
- Brant J B, Sulzman E W, Myrold D D. 2006. Microbial community utilization of added carbon substrates in response to long-term carbon input manipulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8): 2219–2232.
- Carrillo Y, Dijkstra F A, Pendall E, *et al.* 2012. Controls over soil nitrogen pools in a semiarid grassland under elevated CO₂ and warming. *Ecosystems*, 15(5): 761–774.
- Chen D M, Zhang Y, Lin Y B, *et al.* 2010. Changes in belowground carbon in *Acacia crassicarpa* and *Eucalyptus urophylla* plantations after tree girdling. *Plant and Soil*, 326(1/2): 123–135.
- Chen D M, Zhou L X, Wu J P, *et al.* 2012. Tree girdling affects the soil microbial community by modifying resource availability in two subtropical plantations. *Applied Soil Ecology*, 53(10): 108–115.
- Dannenmann M, Simon J, Gasche R, *et al.* 2009. Tree girdling provides insight on the role of labile carbon in nitrogen partitioning between soil microorganisms and adult European beech. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(8): 1622–1631.
- Feng X, Simpson M J. 2009. Temperature and substrate controls on microbial phospholipid fatty acid composition during incubation of grassland soils contrasting in organic matter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(4): 804–812.
- Frostgård Å, Bååth E. 1996. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 22(1): 59–65.
- Högberg M N, Briones M J, Keel S G, *et al.* 2010. Quantification of effects of season and nitrogen supply on tree below-ground carbon transfer to ectomycorrhizal fungi and other soil organisms in a boreal pine forest. *New Phytologist*, 187(2): 485–493.
- Högberg M N, Högberg P, Myrold D D. 2007. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three?. *Oecologia*, 150(4): 590–601.
- Högberg P, Nordgren A, Buchmann, *et al.* 2001. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 411(6839): 789–792.
- Kaiser C, Koranda M, Kitzler B, *et al.* 2010. Belowground carbon allocation by trees drives seasonal patterns of extracellular enzyme activities by altering microbial community composition in a beech forest soil. *New Phytologist*, 187(3): 843–858.
- Keel S G, Campbell C D, Högberg M N, *et al.* 2012. Allocation of carbon to fine root compounds and their residence times in a boreal forest depend on root size class and season. *New Phytologist*, 194(4): 972–981.
- Keith-Roach M J, Bryan N D, Bardgett R D, *et al.* 2002. Seasonal changes in the microbial community of a salt marsh, measured by phospholipid fatty acid analysis. *Biogeochemistry*, 60(1): 77–96.
- Maier C A, Johnsen K H, Clinton B D, *et al.* 2010. Relationships between stem CO₂ efflux, substrate supply, and growth in young loblolly pine trees. *New Phytologist*, 185(2): 502–513.
- Moore-Kucera J, Dick R P. 2007. PLFA profiling of microbial community structure and seasonal shifts in soils of a douglas-fir chronosequence. *Microb Ecology*, 55(3): 500–511.
- Mucha A P, Almeida C M R, Bordalo A A, *et al.* 2005. Exudation of organic acids by a marsh plant and implications on trace metal availability in the rhizosphere of estuarine sediments. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 65(1/2): 191–198.
- Scott-Denton L E, Rosenstiel T N, Monson R K. 2006. Differential controls by climate and substrate over the heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration. *Global Change Biology*, 12(2): 205–216.
- Subke J A, Hahn V, Battipaglia G, *et al.* 2004. Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity. *Oecologia*, 139(4): 551–559.
- Tóth J A, Lajtha K, Kotrocó Z, *et al.* 2007. The effect of climate change on soil organic matter decomposition. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, (3): 75–85.
- Trahan N A, Dynes E L, Pugh E, *et al.* 2015. Changes in soil biogeochemistry following disturbance by girdling and mountain pine beetles in subalpine forests. *Oecologia*, 177(4): 981–995.
- Treonis A M, Ostle N J, Stott A W, *et al.* 2004. Identification of groups of metabolically-active rhizosphere microorganisms by stable isotope probing of PLFAs. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(3): 533–537.
- Wang Q K, He T X, Wang S L, *et al.* 2013. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 178–179(4): 152–160.
- Yarwood S A, Myrold D D, Högberg M N. 2009. Termination of belowground C allocation by trees alters soil fungal and bacterial communities in a boreal forest. *FEMS Microbiol Ecology*, 70(1): 151–162.
- Zeller B, Liu J, Buchmann N, *et al.* 2008. Tree girdling increases soil N mineralisation in two spruce stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(5): 1155–1166.

(责任编辑 于静娴)