

凋落物和根系输入对亚热带米槠天然林土壤有机碳组分的影响

张磊^{1,2}, 贾淑娴^{1,2}, 李啸灵^{1,2}, 陆宇明^{1,2}, 刘小飞^{1,2}, 郭剑芬^{1,2}

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室,福州 350007)

摘要: 植物残体添加和去除试验(the detritus input and removal treatments, DIRT)作为一种研究碳输入来源变化对土壤质地与质量影响的试验设计,对研究土壤养分来源以及主要影响机制具有关键作用。选择福建省三明森林生态系统与全球变化研究站的米槠常绿阔叶天然林,设置对照(CT)、去除凋落物(NL)、去除根系(NR)、去除凋落物+去除根系(NI)、添加双倍凋落物(DL)5种处理,于2018年12月对各处理不同土层(0—10,10—20 cm)土壤进行取样,研究其土壤有机碳组分及其影响因子。结果表明:(1)在0—10 cm土层中,DL中 NH_4^+-N 与TN含量明显高于其他处理。NR处理的 NH_4^+-N 与DON含量显著大于NL与NI处理。在10—20 cm土层中,DL处理在 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DON以及TN含量显著大于其他处理。NI处理的 NH_4^+-N 含量显著低于其他处理。(2)DL处理有机碳含量显著高于NL处理,但DL处理土壤有机碳含量与CT处理无明显差异($P>0.05$),其余各处理间差异均不显著。(3)含有凋落物的处理土壤活性碳组分含量显著高于去除凋落物处理,活性碳组分含量顺序为 $\text{DL}>\text{CT}>\text{NR}>\text{NL}>\text{NI}$ 。去除凋落物处理(NL)土壤惰性碳组分含量显著高于去除根系处理(NL、NI)。(4)凋落物和根系的输入对0—10 cm土层土壤 β -葡萄糖苷酶以及纤维素水解酶活性具有显著影响,呈现与土壤活性碳组分相同的变化趋势。冗余分析表明,土壤有机碳组分的变化主要是受控于 β -葡萄糖苷酶。pH以及土壤含水率也是影响土壤有机碳及其组分的关键因子。凋落物的输入有利于提高土壤养分有效性以及土壤质地,加快碳循环;植物根系则对土壤中有有机碳的稳定性具有关键作用。

关键词: 酸水解碳组分; 酶活性; 凋落物; 根系; 米槠天然林

中图分类号:S714.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0244-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.034

Effects of Litter and Root Inputs on Soil Organic Carbon Fractions in a Subtropical Natural Forest of *Castanopsis carlesii*

ZHANG Lei^{1,2}, JIA Shuxian^{1,2}, LI Xiaoling^{1,2}, LU Yuming^{1,2}, LIU Xiaofei^{1,2}, GUO Jianfen^{1,2}

(1.College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2.Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-Geographical Processes, Ministry of Education, Fuzhou 350007)

Abstract: The detritus input and removal treatments (DIRT), as an experimental design to study the effects of carbon input on soil texture and quality, plays a key role in the study of soil nutrient sources and main influencing mechanisms. In this study, the natural *Castanopsis carlesii* forest in the Sanming forest ecosystem and global change research station in Fujian province was selected, and five treatments were set up, including control (CT), no litter (NL), no roots (NR), no input (NI), double litter (DL), 0—10 and 10—20 cm soil samples in each treatment were collected in december 2018 to study the soil organic carbon fractions and their influencing factors. The results showed that: (1) In the 0—10 cm soil layer, the contents of NH_4^+-N and total N (TN) in DL treatment were significantly higher than those in other treatments. The contents of NH_4^+-N and dissolved organic N (DON) in NR treatment were significantly greater than those in NL and NI treatment. In the 10—20 cm soil layer, the contents of NH_4^+-N , NO_3^--N , DON and TN in the DL treatment were significantly greater than those in other treatments. The contents of NH_4^+-N in NI treatment was significantly lower than that in other treatments. (2) The contents of organic carbon in DL treatment was significantly higher than that in NL treatment, but there was no significant difference in soil organic carbon content between DL treatment and CT treatment ($P>0.05$), and there was no significant differ-

收稿日期:2020-11-08

资助项目:福建省科技厅公益类重点项目(2019R1002-4);福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(J1-1253)

第一作者:张磊(1996—),男,硕士研究生,主要从事森林碳氮循环研究。E-mail:zhangleic789@163.com

通信作者:郭剑芬(1977—),女,教授,主要从事森林碳氮循环研究。E-mail:jfguo@fjnu.edu.cn

ence among other treatments. (3) The contents of active carbon fraction in the treatment with litter was significantly higher than that in the treatment without litter, and the order of active carbon fraction content was $DL > CT > NR > NL > NI$. The content of soil recalcitrant carbon in litter removal treatment (NL) was significantly higher than that in root removal treatments (NL and NI). (4) Litter and root input had significant effects on the activities of β -glucosidase and cellobiohydrolase in 0–10 cm soil layer, showing the same changing trend as soil active carbon. Redundancy analysis showed that the variation of soil organic carbon fractions was mainly controlled by β -glucosidase activity. The pH value and soil moisture content were also key factors affected soil organic carbon and its fractions. Litter input was conducive to improve the availability of soil nutrients and soil quality, and accelerate the carbon cycle, while plant roots played a key role in the stability of organic carbon in the soil.

Keywords: acid-hydrolyzed carbon fraction; enzyme activity; litter; root system; natural forest of *Castanopsis carlessii*

在全球陆地生态中土壤碳库是最大的有机碳库,占全球陆地碳库总量的 67%~75%。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是表征土壤肥力与质地状况的关键指标之一,同时也直接影响全球碳循环过程。全球土壤中储存约有 1 500 Pg 的有机碳,其中约有 787 Gt 的有机碳贮存于森林土壤中,占全球土壤总有机碳库的 39%^[1]。同时,在森林土壤表层 20 cm 内土壤有机碳含量占 1 m 土层总有机碳 50%。虽然土壤有机碳储量相对较大,但在短期内更容易受到人类活动等影响,且由于碳在土壤中的贮存量较大,较小幅度的变化都会对全球碳平衡造成较大程度的影响。

森林土壤有机碳主要来自凋落物以及植物根系,其中包括叶片、果实、枝干等地上凋落物部分,以及地下输入的植物根系、根系分泌物以及根际微生物等有机质。随着全球气候变暖^[2]、氮沉降^[3]不断加剧,且陆地植被对气候变化十分敏感,致使森林生态系统净初级生产力(NPP)发生了难以确定的变化,凋落物与根系输入数量和质量亦不断变化^[4]。与此同时,森林植被与土壤之间物质和能量流通主要靠凋落物与根系分解产生的碎屑组织。植物凋落物(包括细根)分解释放出 CO_2 , 同时将一部分有机碳以腐殖质以及可溶性有机质等形式输入到土壤中去。因此,森林生态系统净初级生产力的变化对土壤有机碳输入产生直接或间接影响。DIRT(the detritus input and removal treatments)试验作为一种研究碳输入来源变化对土壤质地影响的试验设计,已在国内外大量应用。如 Liu 等^[5]在常绿阔叶林的凋落物添加与去除试验中发现,土壤有机碳含量显著低于对照样地是因为凋落物的添加促进土壤呼吸作用的增强;而 Leff 等^[6]在季雨林的凋落物添加与去除试验中发现,增加 1 倍的凋落物会使表层土壤碳含量增加 31%,而在去除凋落物的试验中发现,土壤碳的含量降低 26%,这主要是因为季雨林凋落物碳含量高以及气候影响分

解速率;Lajtha 等^[7]在针阔混交林的凋落物输入与去除研究中发现,不同处理间的土壤有机碳含量在矿质土层中并无明显变化,这可能是因为短期内的凋落物输入并不会将有机碳输入到矿质土层中。目前已有的凋落物与根系去除试验中,土壤有机碳的研究结果不同,与研究区域、凋落物类型、土壤类型等因素有关。而且现有 DIRT 试验研究主要集中于土壤碳库总和变化以及土壤呼吸作用,而对于土壤有机碳组分的结构组成及其研究机制少之又少。

土壤有机碳因其不同的结构、密度以及被氧化程度,导致土壤有机碳的分类多种多样,但总体上有物理分组和化学分组。其中,土壤活性碳以及惰性碳是按照土壤有机碳受环境因子影响下分解速率的差异进行分类的,其分类方法是通过加入不同浓度硫酸进行水解。活性碳库一般被认为是易被土壤微生物所分解的极其不稳定的有机碳组分,可以用来表征土壤质量变化情况。惰性碳库因其稳定的化学以及物理性质,很难被土壤中的微生物等分解,一般用来表征土壤中有机碳的稳定程度^[8]。此外,土壤有机碳的分解速率不仅受到气候等自然条件的影响,也与土壤生化过程中的酶活性息息相关。动植物以及微生物残体在生产活动中会释放对土壤养分具有一定催化能力的酶来实现自身对养分的需求。其中, β -葡萄糖苷酶(β -glucosidase, β G)与纤维素水解酶(cellobiohydrolase, CBH)被认为是有机碳分解的重要组成成分^[9]。 β -葡萄糖苷酶主要是将土壤中的多糖分解为单糖,然后经植物体分解利用转化为二氧化碳排放到空气中^[10]。纤维素水解酶则是将植物凋落物等含有纤维素的物质分解为葡萄糖^[11]。因此通过酸水解法划分的土壤有机碳组分是对土壤易分解碳库与难分解碳库进行研究的重要依据。同时,结合土壤酶活性分析,可为有机碳积累和分解提供一定的指示作用。

天然常绿阔叶林是我国亚热带地区典型的地带性植被,固碳能力约占全球森林的 8%,在我国森林碳汇中具有关键作用。米槠(*Castanopsis carlesii*)作为该地区的优势树种,其生物量大,在维持区域碳平衡中发挥着关键作用。因此,本文在福建省三明格氏栲自然保护区米槠天然林中设置 DIRT 试验,研究不同凋落物和根系输入处理土壤有机碳组分的变化,并对其主要影响因素深入分析,为进一步理解全球气候变化背景下植物凋落物及根系输入变化对亚热带常绿阔叶林土壤有机碳累积的影响机制提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于福建省三明市格氏栲自然保护区(117°28′03″E,26°09′24″N),平均海拔 386 m,坡度 15°~20°,坡向为 25°。该保护区夏热冬温,四季分明,水热同期,是典型的中亚热带季风气候,年均气温 18.6℃(1 月为 9.4℃,7 月为 28.4℃),年均降水量 1 670 mm,其中 77% 的降水集中于 3—8 月。土壤为砂岩发育的山地红壤,表层疏松透气,土层深厚。本研究区建群种是林龄>200 年的壳斗科米槠(*Castanopsis carlesii*),林下植被主要为华山姜(*Alpinia chinensis*)、硃砂根(*Ardisia crenata*)、香花崖豆藤(*Millettia dielsiana*)、桂北木姜子(*Litsea subcoriacea*)和狗脊(*Woodwardia japonica*)等^[12]。

1.2 DIRT 样地设置

本研究地于 2012 年 6 月在米槠天然林的上、中、下坡位分别随机布设 3 块 20 m×20 m 样地,在每块样地内随机布设 5 个 1 m×1 m 的试验小区,设计 5 种处理,3 个重复,共设置 15 个试验小区,包括:对照(CT)、去除根系(NR)、去除地上凋落物(NL)、无凋落物输入(即去除地上凋落物和地下根系输入,NI)、添加双倍地上凋落物(DL)(图 1)。地下根系的去除处理是在试验小区周围埋入 0.1 mm 孔径的尼龙网,该种尼龙网在有效隔绝周围根系侵入的同时也不阻碍水和微生物的自由移动。凋落物的去除处理是在试验样地高约 50 cm 处布设 1 mm 孔径的尼龙网框,防止地上凋落物的输入。本样地自 2013 年 1 月建成以来,每 2 周人工将地上凋落物去除试验小区内凋落物框中取出的凋落物加入到双倍凋落物小区中,并使其均匀分布在双倍凋落物处理的试验小区内。

1.3 土壤样品采集

2018 年 12 月,在 DIRT 处理各小区按照“S”形取样法采集 5 根土芯,在去除地表残存凋落物后,利用土钻钻取 0—10,10—20 cm 土层土芯,将土芯混合均匀后装入已除菌的自封袋中带回实验室。把土样

中肉眼可见的砾石和动植物残体去除后过 2 mm 筛,贮存于已除菌的自封袋中,并置于 4℃冷藏箱内保存。土样分为 3 部分:一部分新鲜土样用于测定土壤酶活性;一部分过 2 mm 筛后测定土壤基本理化性质;一部分土壤室内自然风干后过 0.149 mm 筛,测定土壤碳组分等指标。

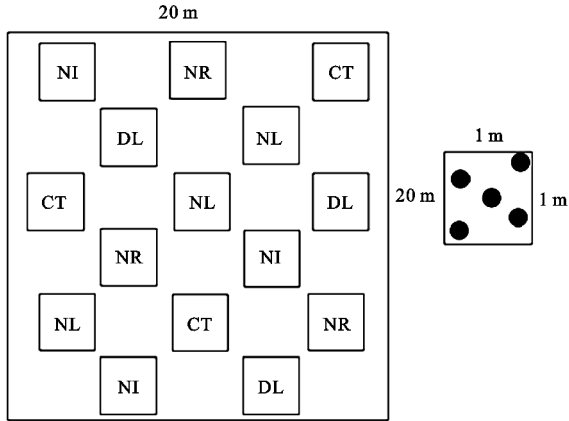


图 1 样地设置与取样设置

1.4 土壤基本理化性质测定

土壤含水率采用烘干法,在 105℃烘干 24 h 后测定;土壤 pH 以水土比(1:2.5)为标准,采用便携式 pH 计(STARTER 300,OHAUS,USA)测定;全氮含量是将风干过 0.149 mm 筛置于土壤碳氮元素分析(Elemental Analyzer Vario ELIII,Germany)测定;可溶性有机氮采用去离子冷水浸提(水土比为 4:1),振荡离心后用 0.45 μm 滤膜抽滤,采用连续流动分析仪(Skalar San++,The Netherlands)测定;土壤铵态氮和硝态氮采用硫酸钾浸提法,经过振荡离心过滤后,使用连续流动分析仪(Skalar San++,The Netherlands)测定。

1.5 土壤碳组分及其相关酶活性测定

土壤有机碳组分采用不同浓度硫酸进行水解提取^[13]。称取 1.00 g 过 0.149 mm 筛的风干土壤样品于凯氏消煮管内。首先加 20 mL 2.5 mol/L H₂SO₄,盖漏斗在 105℃下油浴消解 30 min 后移至离心管,离心后将清液倒出。在管内再次加入去离子水离心,将 2 次清液过 0.45 μm 滤膜,该部分为活性碳组分 I (Fraction of labile C I, LPI-C)。将管内剩余土样反复加水离心,直至其 pH=7。将其置于 60℃烘箱烘干后加入 2 mL 的 13 mol/L H₂SO₄于离心管内,振荡 10 h 后将管内 H₂SO₄稀释至 1 mol/L,后移至消煮管内于 105℃下消解 3 h。消解后移至离心管离心加水离心收集清液过 0.45 μm 滤膜,该部分为活性碳组分 II (Fraction of labile C II, LP II-C)。将管内剩余土样用去离子水离心清洗直至其 pH=7,置于 60℃烘干,该部分为惰性碳组分(Fraction of recalcitrant C, RP-C)。其中 LP I-C 与 LP II-C 组

分使用总有机碳分析仪(TOC-VCPH, Japan)测定, RP-C使用土壤碳氮元素分析(Elemental Analyzer Vario ELIII, Germany)测定。LP I-C与LP II-C组分为活性碳组分, RP-C为惰性碳组分。

土壤 β -葡萄糖苷酶(β G)与纤维素水解酶(CBH)酶活性测定具体方法为:取1.00 g新鲜土壤, 用125 mL 50 mmol/L的醋酸盐缓冲液(pH=5)提取, 借助磁力搅拌器搅拌5 min使其混合均匀, 达到均质化。溶液澄清后, 用移液器取200 μ L溶液移于96孔微孔板, 检测每个样品, 有16个重复。用伞形酮(MUB, Methylumbelliferyl)作为底物标示。将微平板置于20 $^{\circ}$ C暗环境中孵育4 h后使用多功能酶标仪(Spectra Max M5, Molecular Devices, USA)测定土样中水解酶的活性。

1.6 数据处理

数据经过Excel 2010软件基本处理后利用SPSS 24.0软件进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、事后检验采用邓肯法(Duncan)检验不同处理指标间的差异显著性($P=0.05$)。采用双因素(two-way ANOVA)方差分析土层与处理是否存在交互效应。采用独立样本 T 检验对不同土层各指标进行显著性检验, 显著性水平设定为 $P=0.05$ 。采用Canoco 5.0软件将不同土层土壤有机碳及其组分作为物种因子, 土壤基本理化性质、酶活性作为环境因子进行冗余分析(RDA)。绘图主要由Origin 2018软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同凋落物和根系输入处理土壤有机碳及各组分含量

在0—10 cm土层中, 土壤有机碳含量表现为CT>DL>NL>NR>NI(图2)。其中, CT处理土壤有机碳含量(20.7 g/kg)和DL(20.1 g/kg)没有显著差异, NL(16.61 g/kg)与NR(16.41 g/kg)土壤有机碳含量也无明显差异, NI处理土壤有机碳含量最低, 且明显低于其他处理, 即植物根系与凋落物在该区域对0—10 cm土层土壤有机碳含量影响相同。而在10—20 cm土层中, 土壤有机碳含量表层土壤有机碳分布趋势基本相似, 但NR与NL处理间具有明显差异。

经酸水解分解得出的活性碳(LP I-C、LP II-C)、惰性碳(RP-C)含量呈现惰性碳>活性碳。在相同处理, 不同土层之间有机碳组分差异显著, 0—10 cm土层各碳组分含量达到10—20 cm土层的2倍。

活性碳含量在0—10 cm土层与10—20 cm土层中变化趋向类似, DL与CT处理活性碳含量无明显变化。在NL、NR与NI处理中, 活性有机碳含量依次为NR>NL>NI。惰性碳则呈现与活性碳相反的

变化方向。在0—10 cm土层中, NL处理中惰性碳含量显著高于NR处理($P<0.05$), 根系相对凋落物对惰性碳的贡献更大。而在10—20 cm土层中NL与NR处理惰性碳组分含量差异不明显, 且与NI处理惰性碳含量也没有明显差异。

有机碳的难降解指数(RIC)是惰性碳占土壤总有机碳(SOC)的比例, 一般用来表征土壤有机碳的分解性的难易程度以及土壤质地状况。在不同凋落物和根系输入处理下, 0—10 cm土层中CT、NR、NL、NI、DL处理难降解指数分别为53.74%, 51.13%, 56.11%, 58.75%, 53.03%, 在10—20 cm土层中难降解指数为53.95%, 54.65%, 60.77%, 65.41%, 54.74%。2土层不同处理间差异显著。NI处理由于没有新鲜碳源的输入导致难降解指数最高, 其次为NL处理, 其他3种处理则没有显著差异($P>0.05$)。

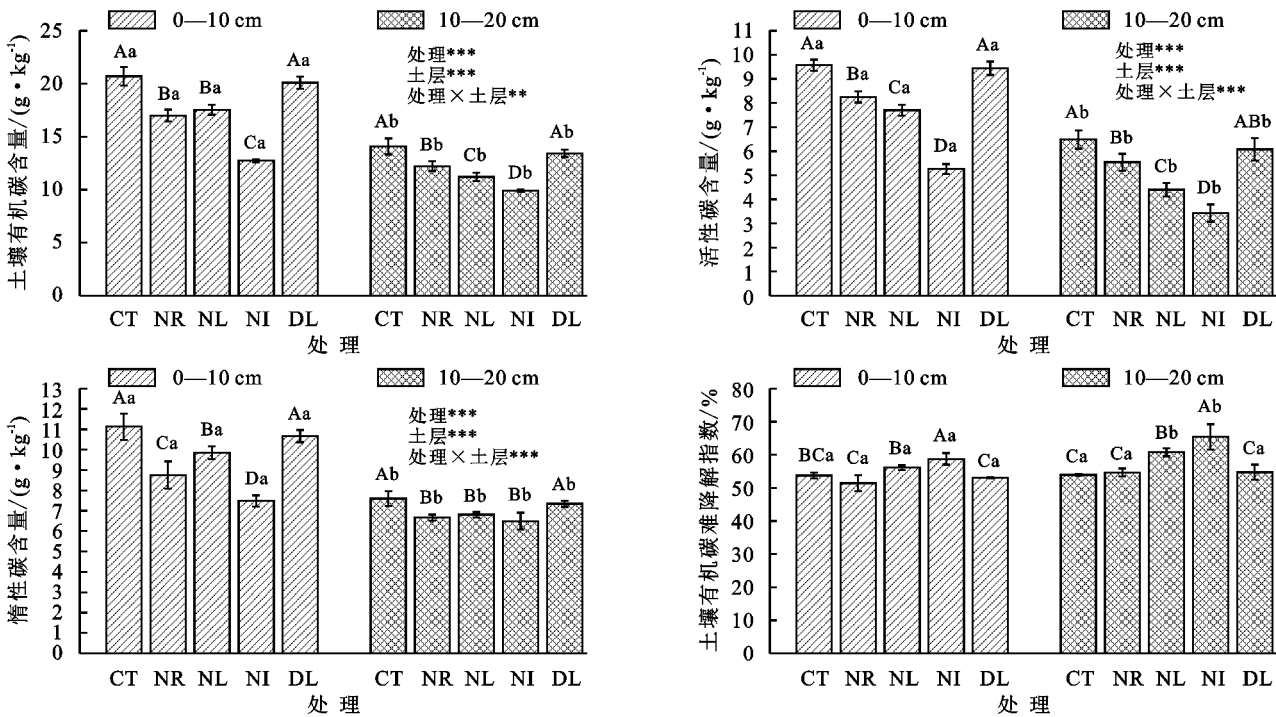
2.2 不同凋落物和根系输入处理土壤基本理化性质

不同凋落物和根系输入处理下土壤理化性质变化明显(表1)。在0—10 cm土层中, DL处理的 NH_4^+-N 与TN含量显著高于其他处理。NR处理的 NH_4^+-N 与DON含量显著大于NL与NI处理。在10—20 cm土层中, DL处理在 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DON以及TN含量等指标中显著大于其他处理($P<0.05$)。同时, NI由于没有有机质的输入, 导致 NH_4^+-N 含量明显低于其他处理, NO_3^--N 含量除CT外明显高于其他处理($P<0.05$)。此外, 不同处理与不同土层之间的pH、 NH_4^+-N 、TN和C/N的交互效应显著($P<0.001$)。

2.3 不同凋落物和根系输入处理土壤酶活性

不同处理间的 β -葡萄糖苷酶与纤维素水解酶的酶活性差异显著(图3)。0—10 cm土层中 β -葡萄糖苷酶在CT、DL、NR处理中含量显著高于NL与NI处理($P<0.05$), 表明凋落物对表层土壤 β -葡萄糖苷酶影响较大。在10—20 cm土层中NI则显著低于其他处理。另外, 本研究发现, 同一处理不同土层间变化差异显著($P<0.05$), 表层土壤 β -葡萄糖苷酶含量明显高于10—20 cm土层。

表层土壤不同处理间的纤维素水解酶含量明显不同。DL纤维素水解酶活性为1.19 nmol/(g $\cdot$ h)显著高于其他处理($P<0.05$)。而在10—20 cm土层中纤维素水解酶与0—10 cm土层变化趋势相似, 但不同处理间的纤维素水解酶活性差异不明显。同一处理不同土层间纤维素水解酶活性均有明显变化, 都为0—10 cm土层活性远大于10—20 cm土层。比较不同处理间2土层纤维水解酶活性状况可知, 纤维素水解酶在DL处理为1.80 nmol/(g $\cdot$ h), 活性显著大于其他处理($P<0.05$)。



注:图柱上方不同大写字母表示不同处理间差异显著;不同小写字母表示不同土层间差异显著($P<0.05$);***表示 $P<0.001$,**表示 $P<0.01$ 。下同。

图 2 凋落物和根系输入处理土壤有机碳和各组分含量以及土壤难降解指数

表 1 不同凋落物和根系输入处理土壤基本理化性质

土层 深度/cm	处理	含水率/ %	pH	铵态氮	硝态氮	可溶性	总氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	C/N
				NH ₄ ⁺ —N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ —N/ (mg·kg ⁻¹)	有机氮 DON/ (g·kg ⁻¹)		
0—10	CT	0.29±0.02Aa	4.15±0.02Bb	12.99±1.57Ca	2.19±0.52Aa	1.85±0.13Ba	1.49±0.03Ba	13.94±0.85Aa
	NR	0.26±0.01Aa	4.25±0.07Aa	19.00±1.13Ba	0.73±0.31Ba	4.35±1.05Aa	1.44±0.01Ba	13.10±0.96Aa
	NL	0.25±0.02BCa	4.31±0.02Ab	13.09±1.15Ca	1.30±0.36ABa	2.02±0.88Ba	1.28±0.06Ca	12.95±0.21ABa
	NI	0.25±0.01Ca	4.28±0.06Aa	13.83±1.84Ca	0.92±0.84Ba	2.69±0.49Ba	1.34±0.05Ca	12.21±0.19BCa
	DL	0.26±0.01Ba	4.24±0.01Ab	27.85±0.01Aa	2.12±0.01Aa	5.50±0.01Aa	1.77±0.01Aa	11.34±0.42Ca
10—20	CT	0.25±0.01Ab	4.42±0.01Aa	11.63±0.01Ba	2.28±0.01Aa	1.66±0.01Ba	0.97±0.01Bb	10.02±0.34Bb
	NR	0.22±0.02Bb	4.33±0.07Aa	11.15±1.3Bb	0.71±0.81Ba	1.61±0.73Bb	0.84±0.04Ca	11.77±0.25Aa
	NL	0.23±0.02ABa	4.39±0.03Aa	11.49±1.24Ba	0.81±0.48Ba	1.48±0.18Ba	0.94±0.03BCb	12.03±0.72Aa
	NI	0.22±0.01Bb	4.37±0.02Aa	9.23±0.57Cb	1.79±0.30Aa	1.56±0.81Ba	0.97±0.12Bb	9.59±0.62Bb
	DL	0.25±0.01Ab	4.36±0.01Aa	15.48±0.01Ab	1.36±0.01Aa	3.13±0.01Ab	1.65±0.01Ab	8.13±0.26Db
T		***	ns	***	***	***	***	***
L		***	***	***	ns	***	***	***
T×L		*	***	***	ns	*	***	***

注:T为处理;L为土层;TN为总氮;DON为可溶性有机氮;n=3,表中数据为平均值±标准误;同列不同大写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同土层间差异显著($P<0.05$)。ns表示 $P>0.05$;*表示 $P<0.05$;**表示 $P<0.01$;***表示 $P<0.001$ 。下同。

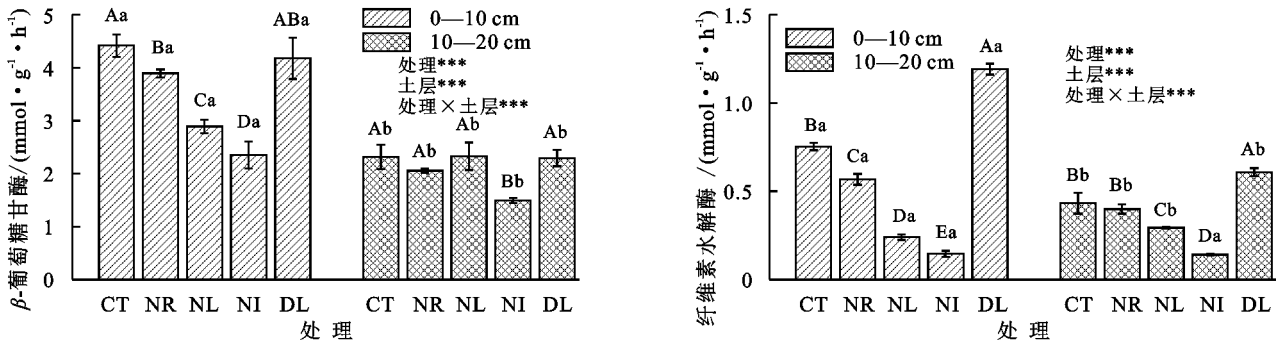
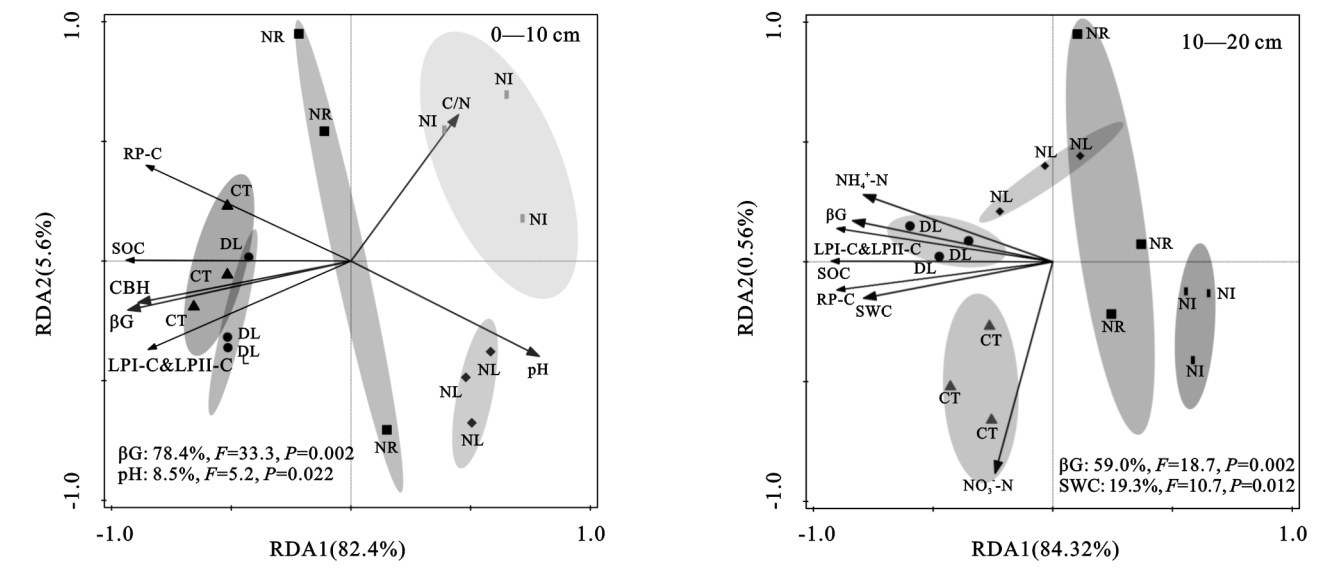


图 3 不同凋落物和根系输入处理土壤酶活性

2.4 不同凋落物和根系输入处理土壤碳组分与环境因子的相关性

冗余分析表明,相同土层在 CT、DL、NL、NI 处理中具有较好的聚类,而在 NR 处理中聚类相对较差。0—10 cm 土壤有机碳组分与 β -葡萄糖苷酶含量为正相关关系,而 pH 与土壤碳组分是负相关关系(图 4)。RDA1 和 RDA2 分别解释了变量变化的 82.4%和 5.6%。其中, β -葡萄糖苷酶对有机碳组分的解释变量值达到了 78.4%($P=0.002$)。而在 10—

20 cm 土层 β -葡萄糖苷酶与土壤含水率对该土层碳组分影响最大,同时,该土层中第 1 标准轴(RDA1)和第 2 标准轴(RDA 2)分别解释了碳组分变量变化的 59.0%和 19.3%,与 0—10 cm 土层主要驱动因子一致, β -葡萄糖苷酶对该土层土壤有机碳组分变化解释度达到了 59.0%。因此, β -葡萄糖苷酶对土壤碳组分的变化起重要作用。另外, NH_4^+-N 以及纤维素水解酶等环境因子对不同处理碳组分含量也具有一定影响。



注:SWC 为含水率; β G 为 β -葡萄糖苷酶;CBH 为纤维素水解酶;图中阴影部分面积大小表示处理间差异情况。

图 4 凋落物和根系输入变化土壤碳组分差异冗余分析

3 讨论

一般认为,植物碳库(树干、枝叶)、凋落物(残落物)碳库以及土壤有机碳库是陆地生态系统中含量最高且是陆地碳循环的主要组成成分。本研究中不同土层相同处理下土壤有机碳含量及其组分含量差异明显。表层土壤有机碳以及组分含量远超过 10—20 cm 土层,这主要是因为土壤表层有机质丰富,含有氮、磷等营养元素,促进土壤中 β -葡萄糖苷酶和纤维素水解酶活性升高,同时在土壤表层植物根系分布密集,其分泌物以及植物死根会促进土壤碳的积累。在 10—20 cm 土层中有机碳及其组分主要来源是雨水对凋落物以及土壤的淋溶以及灌木、乔木植物等具有较长根系的植物对碳的固定。而土壤水分为土壤中各种微生物分解有机质提供基本需求,特别是在亚热带地区的干季,水分更是保证土壤微生物活性的关键^[14],而该土层相对土壤表层水分下渗能力差,从而导致与碳分解相关的酶活性降低。另外,氮素作为微生物结构与活动的必要养分之一,由于其在土层中需要借助水的淋溶,因此在该土层也成为影响有机碳含量的因素之一。综合以上因素,在本研究中次表层土

壤有机碳及其组分含量明显低于表层土壤。凋落物是土壤有机碳的主要来源以及肥力的重要保证。在本研究中,DL 与 CT 处理土壤有机碳含量及其组分间没有显著差异。这是因为额外的碳输入形成较强的激发效应^[15],增加了微生物活动的底物来源,腐生真菌等微生物会促进对碳有分解作用的 β -葡萄糖苷酶和纤维素水解酶的生成。其中,微生物为满足自身需求吸收少量碳,大部分有机碳及活性碳组分以 CO_2 的形式释放到大气中^[16]。Doyle 等^[17]在沙漠地区放置含有纤维素水解酶的凋落物定期收集处理后也发现,凋落物的添加会使得纤维素水解酶大量增加,促进凋落物的分解。因此,双倍凋落物的输入会形成一个负反馈,并不会促进土壤有机碳的贮存^[18]。Liu 等^[5]在生长季的常绿阔叶林中发现,双倍凋落物的添加反而减少了土壤有机碳含量,这与本研究结果不一致,这可能是由于取样季节的差异。植物在生长季根系会分泌对碳具有分解作用的酶以及低分子量有机酸^[19],汲取土壤中有机碳来维持自身发育,导致土壤中有机碳含量降低。另外,Liu 等^[5]在研究中也发现,双倍凋落物的添加会促进土壤激发效

应的形成,这与本研究结果一致。NR 与 NL 处理有机碳含量并没有显著变化($P>0.05$),但其活性碳以及惰性碳含量差异明显。凋落物中含有大量有机碳、氮以及养分元素,有研究^[20]发现,含氮量高的有机质容易被微生物分解、迁移以及转化,这可能是由于氮素可以促进微生物活性增加,使得其分解和利用凋落物的效率提升,促进碳积累。同时,凋落物受到雨水淋溶后大量可溶性有机碳从中释放于土壤中。因此,NR 处理中输入表层土壤的活性碳增加,难降解指数较低。土壤惰性碳是土壤中的难分解部分,其主要成分是难分解的木质素、纤维素等具有芳香环结构的碳^[13]。在表层土壤中,NL 处理惰性碳含量显著高于 NR 处理。这主要是土壤植物根系中含有较多的难降解物质,如缩合单宁酸以及酸不溶性碳,而在土壤中这 2 种成分含量,植物根系贡献了 75%^[21]。这 2 种成分作为难降解的物质在土壤惰性碳的产生中具有关键作用。另外,细根在分解过程中可以将大量的有机碳转化为较为稳定的惰性碳成分储存于土壤中。在落叶阔叶林的研究^[22]中发现,土壤碳库含量变化的直接影响因素是地上凋落物的输入,但是植物根系的输入会对土壤惰性碳的形成产生更为长期的影响,而且植物根系在活动中形成的有机碳,在物理以及化学上更容易受到外界的保护,不受微生物活动的影响,这与本研究中 NL 处理 β -葡萄糖苷酶和纤维素水解酶活性显著低于 NR 处理的结果相一致。在 NI 处理中,去除凋落物以及根系导致土壤中易被利用的碳与氮减少,pH 升高,使 2 种酶活性显著降低,王棣等^[23]也在落叶阔叶林森林中发现,土壤 pH 与有机碳存在极显著负相关关系。而在本研究中 2 种酶主要是分解土壤中多糖、半纤维素以及纤维素等易分解碳^[20],由于没有新鲜碳源的长期输入,导致土壤中活性碳被分解完后,微生物降低了对这 2 种酶的分泌,不得不分泌对有芳香环结构的碳具有分解作用的过氧化物酶等。Hernandez 等^[24]研究发现,将土壤酶相应底物的阻断,会导致相关酶的数量以及活性降低。凋落物与根系的去除导致易分解物质减少,难分解的大分子物质积聚(如木质素等),致使 2 种酶活性以及含量不断降低,有机碳含量也不断降低。

在本研究中不同处理与土层的交互效应显著,这表明有机碳及其组分含量受到处理方式和不同土层的共同影响。土壤微生物及其酶活性是有机碳含量变化的因素之一,不同处理及土层之间含水量以及氮素的差异导致有机碳含量差异大,而凋落物和植物根系作为土壤碳以及微生物碳的主要来源也对土壤有

机碳含量具有重要影响,两者共同作用于土壤碳及其组分的变化。

综合以上讨论分析,凋落物与根系输入变化对土壤碳组分的影响,主要是通过改变土壤理化性质,如水分以及土壤氮的含量,迫使土壤微生物分泌出适应当前环境的酶分解碳来满足自身养分需求,从而导致土壤有机碳的含量以及组分发生变化,但由于凋落物和根系输入变化引起的微生物群落结构对碳分解微生物还需要进一步的研究。

4 结 论

植物残体添加与去除试验对土壤有机碳以及组分含量变化作用明显。双倍凋落物的添加相对去除凋落物增加了 16.6% 有机碳,特别是活性碳组分增加了 28.3%;同时,由于激发效应的影响,导致双倍凋落物处理与对照土壤有机碳以及碳组分并没有显著变化。凋落物与根系的去除导致土壤有机碳含量变化差异并不明显。而凋落物中含有大量易淋溶的可溶性碳,以及根系会分泌物质对碳形成保护作用,因此,2 个处理间活性碳与惰性碳组分差异显著,去除根系为去除凋落物处理活性碳含量的 1.13 倍,去除凋落物下惰性碳含量是去除根系处理的 1.08 倍。去除凋落物处理土壤惰性碳含量高、难降解指数大,去除植物根系处理土壤活性碳含量高、难降解指数小。此外, β -葡萄糖苷酶、pH、土壤含水率以及土壤氮素是影响土壤有机碳及其组分的关键因素,其主要是通过凋落物与植物根系输入导致土壤理化性质发生改变,从而间接作用于土壤有机碳及其组分的分解。由此可见,凋落物输入有利于土壤质量的改善,加快土壤碳循环速度,而植物根系更有利于碳的固定,提高土壤稳定性。

参考文献:

- [1] Köchy M, Hiederer R, Freibauer A. Global distribution of soil organic carbon-Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world [J]. *Soil*, 2015, 1(1): 351-365.
- [2] Guardia G, Aguilera E, Vallejo A, et al. Effective climate change mitigation through cover cropping and integrated fertilization: A global warming potential assessment from a 10-year field experiment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118307.
- [3] Wang J Q, Shi X Z, Zheng C Y, et al. Different responses of soil bacterial and fungal communities to nitrogen deposition in a subtropical forest [J]. *Science of the To-*

- tal Environment, 2020, 755(S1): e142449.
- [4] 马志良, 赵文强. 植物群落向土壤有机碳输入及其对气候变暖的响应研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 270-281.
- [5] Liu X F, Lin T C, Yang Z J, et al. Increased litter in subtropical forests boosts soil respiration in natural forests but not plantations of *Castanopsis carlesii* [J]. Plant and Soil, 2017, 418(1/2): 141-151.
- [6] Leff J W, Wieder W R, Taylor P G, et al. Experimental litterfall manipulation drives large and rapid changes in soil carbon cycling in a wet tropical forest [J]. Global Change Biology, 2012, 18(9): 2969-2979.
- [7] Lajtha K, Bowden R D, Nadelhoffer K. Litter and root manipulations provide insights into soil organic matter dynamics and stability [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(S1): S261-S269.
- [8] Tan Z X, Lal R, Izaurralde R C, et al. Biochemically protected soil organic carbon at the north appalachian experimental watershed [J]. Soil Science, 2004, 169(6): 423-433.
- [9] 胡启凯, 罗敏, 黄佳芳, 等. 闽江河口潮汐沼泽湿地天然低盐度梯度土壤胞外酶活性特征[J]. 环境科学学报, 2019, 39(9): 3107-3116.
- [10] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 等. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(4): 171-178.
- [11] Morrissey E M, Gillespie J L, Morina J C, et al. Salinity affects microbial activity and soil organic matter content in tidal wetlands [J]. Global Change Biology, 2014, 20(4): 1351-1362.
- [12] 李伟, 刘小飞, 陈光水, 等. 凋落物对中亚热带米楮天然林和人工林土壤呼吸的影响[J]. 林业科学, 2016, 52(11): 11-18.
- [13] 吴传敬, 郭剑芬, 许恩兰, 等. 采伐残余物不同处理方式对杉木幼林土壤有机碳组分和相关酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1504-1513.
- [14] 赵家煦. 东北黑土区秸秆还田深度对土壤水分动态及土壤酶、微生物 C、N 的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [15] Sulzman E W, Brant J B, Bowden R D, et al. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO₂ efflux in an old growth coniferous forest [J]. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 231-256.
- [16] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1485-1498.
- [17] Doyle J, Pavel R, Barness G, et al. Cellulase dynamics in a desert soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(2): 371-376.
- [18] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, et al. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 58(10): 2224-2232.
- [19] 孔涛, 林俊杰, 伏虹旭, 等. 低分子量有机酸对土壤微生物碳源代谢特征的影响[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 365-372.
- [20] Cheng L, Leavitt S W, Kimball B A, et al. Dynamics of labile and recalcitrant soil carbon pools in a sorghum free-air CO₂ enrichment (FACE) agroecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 39(9): 2250-2263.
- [21] Koranda M, Schnecker J, Kaiser C, et al. Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech - The influence of plant C exudates [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(3): 551-558.
- [22] Bowden R D, Deem L, Plante A F, et al. Litter input controls on soil carbon in a temperate deciduous forest [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(S1): 66-75.
- [23] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5421-5429.
- [24] Hernández D L, Hobbie S E. The effects of substrate composition, quantity, and diversity on microbial activity [J]. Plant and Soil, 2010, 335(1/2): 397-411.