

DOI: 10.20103/j.stxb.202211213370

解玲玲, 王邵军, 肖博, 王郑钧, 郭志鹏, 张昆凤, 张路路, 樊宇翔, 郭晓飞, 罗双, 李瑞, 夏佳慧, 兰梦杰, 杨胜秋. 土壤碳库积累与分配对热带森林恢复的响应. 生态学报, 2023, 43(23): 9877-9890.

Xie L L, Wang S J, Xiao B, Wang Z J, Guo Z P, Zhang K F, Zhang L L, Fan Y X, Guo X F, Luo S, Li R, Xia J H, Lan M J, Yang S Q. Responses of soil carbon component accumulation and allocation to tropical forest restoration. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9877-9890.

土壤碳库积累与分配对热带森林恢复的响应

解玲玲, 王邵军*, 肖博, 王郑钧, 郭志鹏, 张昆凤, 张路路, 樊宇翔, 郭晓飞, 罗双, 李瑞, 夏佳慧, 兰梦杰, 杨胜秋

西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224

摘要:为探明土壤有机碳沉积对热带森林恢复的响应过程与机理,选取西双版纳处于不同恢复阶段的热带森林类型(前期的白背桐群落、中期的崖豆藤群落、后期的高檐蒲桃群落)为研究对象,探讨土壤有机碳库各组分积累与分配(微生物量碳储量/总有机碳储量、易氧化有机碳储量/总有机碳储量、惰性有机碳储量/总有机碳储量)的时空变化规律,分析乔木与林下物种的丰富度和多样性、土壤温湿度、容重、pH 及氮库(全氮、水解氮、铵氮、硝氮)对土壤有机碳库组分积累与分配的影响。结果表明:(1)热带森林恢复显著促进土壤碳库各组分的蓄积($P<0.05$),相较于恢复前期,恢复中后期土壤总有机碳、微生物量碳、易氧化有机碳、惰性有机碳储量增幅达 9.25%—50.84%;恢复促进了土壤微生物量碳和易氧化有机碳的分配(8.98%—25.36%)($P<0.05$),但对惰性有机碳分配无显著影响;(2)不同恢复阶段热带森林土壤碳组分积累与分配的时空变化存在一定的差异。其中上述 4 种碳组分积累最大值均出现在 6 月、垂直变化均沿土层递减;土壤易氧化有机碳和微生物量碳分配最大值出现在 6 月、惰性有机碳分配则在 12 月最大,易氧化有机碳和微生物量碳分配沿土层递减、惰性有机碳分配无显著垂直变化;(3)土壤微生物量碳、易氧化有机碳、惰性有机碳的储量在土壤碳库储量的分配占比分别维持在 2.40%—5.00%、18.22%—39.34%、18.50%—26.55%,土壤有机碳组分对总有机碳储量变化的解释率表现为:微生物量碳(83.71%)>惰性有机碳(82.17%)>易氧化有机碳(78.54%);(4)相较于恢复初期,恢复后期乔木与林下物种丰富度和 Shannon 多样性提升了 42.78%—490.82%,氮库(全氮、水解氮、铵氮、硝氮)含量仅提升了 12.73%—25.51%;(5)冗余分析表明,林下物种丰富度、温湿度、水解氮是影响土壤有机碳组分积累的主要驱动因子,而乔木香农多样性、湿度、容重则是影响土壤有机碳库组分分配的主控因子。因此,西双版纳热带森林恢复进程显著促进了土壤有机碳库组分积累与分配,影响程度取决于样地林下物种丰富度、乔木香农多样性、土壤温湿度、容重与水解氮的状况。

关键词:碳组分;碳积累;碳分配;氮组分;热带森林;次生恢复;西双版纳

Responses of soil carbon component accumulation and allocation to tropical forest restoration

XIE Lingling, WANG Shaojun*, XIAO Bo, WANG Zhengjun, GUO Zhipeng, ZHANG Kunfeng, ZHANG Lulu, FAN Yuxiang, GUO Xiaofei, LUO Shuang, LI Rui, XIA Jiahui, LAN Mengjie, YANG Shengqiu

College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: In order to explore the response process and mechanism of soil organic carbon sequestration to tropical forest restoration, three forest types, i. e., *Mallotus paniculatus* community (early restoration stage), *Mellettia leptobotrya* community (middle restoration stage), and *Syzygium oblatum* community (late restoration stage), were selected to identify the spatio-temporal variations in soil organic carbon component accumulation and allocation (i. e., microbial biomass

基金项目:国家自然科学基金项目(32271722, 32060281);云南省教育厅科学研究基金项目(2021Y235)

收稿日期:2022-11-21; **网络出版日期:**2023-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shaojunwang2009@163.com

carbon/total organic carbon, easily oxidizable organic carbon/total organic carbon, and resistant organic carbon/total organic carbon) in Xishuangbanna tropical forests. We also analyzed the effects of species richness and diversity of tree and understory plants, soil temperature and humidity, bulk density, pH and nitrogen pool (i.e., total, hydrolyzable, ammonium, and nitrate nitrogen) on component accumulation and allocation of soil organic carbon in the tropical forests. The results were as follows. (1) The tropical forest restoration significantly accelerated the accumulation of soil organic carbon components ($P < 0.05$). The stocks of total, microbial, easily oxidizable, and resistant organic carbon at the middle and late restoration stages increased by 9.25%—50.84%, compared with early restoration stage. The forest restoration promoted the allocation of soil microbial and oxidizable organic carbon stocks by 8.98%—25.36%, but it had no significant effect on the allocation of resistant organic carbon ($P < 0.05$). (2) Soil carbon component accumulation and allocation had spatiotemporal changes in the three restoration stages of tropical forests. The maximum accumulation of the above four carbon components was in June and they decreased along the soil layer. The maximum allocation of soil easily oxidized and microbial biomass carbon occurred in June, while that of resistant organic carbon was in December. The allocation of microbial and easily oxidized organic carbon decreased along the soil layer, while that of resistant organic carbon had no significant vertical change. (3) The component allocation of soil organic carbon stocks was ranked as microbial biomass carbon stock (83.71%) > resistant organic carbon (82.17%) > easily oxidized organic carbon stock (78.54%) ($P < 0.05$). The explanation percentages of microbial, easily oxidizable, and resistant organic carbon to total organic carbon in the three restoration stages were 2.40%—5.00%, 18.22%—39.34%, and 18.50%—26.55%, respectively. (4) In contrast to early restoration stage, species richness and Shannon diversity of tree and understory plants increased by 42.78%—490.82%, and nitrogen pool (i.e., total, hydrolyzed, ammonium, and nitrate nitrogen) only increased by 12.73%—25.51% at the late restoration stage. (5) Redundancy analysis showed that understory species richness, temperature, humidity, hydrolyzed were the main driving factors affecting carbon component accumulation, while tree Shannon diversity, humidity, and bulk density were the main controlling factors of carbon component allocation. Therefore, Xishuangbanna tropical forests restoration significantly promoted the component accumulation and allocation of soil organic carbon, which was determined by understory species richness and tree Shannon diversity, as well as soil temperature, humidity, bulk density, and hydrolyzed nitrogen.

Key Words: carbon pool; carbon accumulation; carbon allocation; nitrogen pool; tropical forest; secondary restoration; Xishuangbanna

土壤有机碳库作为陆地生态系统中最大的碳储藏库,约占总碳储量的三分之二^[1-2],其微小变化导致大气 CO₂ 浓度的显著变化^[3-4]。土壤微生物量碳库、易氧化有机碳库、惰性有机碳库等有机碳组分,主要来源于动植物残体、腐殖质及微生物体等^[5],其在一定程度上决定土壤总有机碳的积累、分配及分解过程,而且能调控土壤腐殖质和团聚体结构的形成、土壤供水供肥能力以及有机物质的分解、转化与循环过程^[6]。微生物量碳对土壤有机碳库的贡献仅占 1%—4%,但能通过参与土壤生物化学转换与养分循环,调控土壤养分的固定、转化、分解及稳定过程^[7]。易氧化有机碳影响土壤有机碳库的时效性和有效性,对外界环境变化反应十分敏感,通常作为表征土壤有机碳库初期变化的主控因子^[8],惰性有机碳是土壤有机碳库中相对难分解、较稳定的部分,是土壤对环境长期变化的响应指标^[9]。因此,探索土壤总有机碳库与微生物量碳库、易氧化有机碳库、惰性有机碳库组分之间相互关系及其积累与分配特征,是研究生态系统碳过程及全球变化的关键科学问题。

研究表明,土壤有机碳库及其各组分积累与分配动态,取决于气候类型、土地利用变化、土壤环境条件、人类活动干扰等生物与非生物因素的作用^[10-14]。其中,森林恢复是促进生态系统修复、土壤有机碳库蓄积与分配的重要驱动因素^[15]。随着森林恢复进行,植被覆盖度、植物多样性、地上-地下凋落物输入逐渐增加,促进

了土壤微生物及动物主导的生态学过程,从而可能影响土壤有机碳库及各组分的蓄积与分配^[16]。张金^[17]研究表明,随森林恢复年限增加,土壤有机碳储量呈上升趋势,王卫霞^[18]发现重火干扰后北方温带森林恢复过程中土壤有机碳储量表现为后期阶段显著高于前中期阶段。特别是,土壤微生物碳源主要来自于活微生物、死微生物、微生物代谢产物,在恢复进程中,逐渐趋于稳定的森林小气候促进了土壤微生物量碳的蓄积^[19],而受凋落物碳输入以及微生物固定、转化等因素的调控,森林恢复进一步促进土壤易氧化有机碳、惰性有机碳含量的积累^[20]。然而,目前国内外学者主要集中于亚热带及温带森林土壤有机碳库的时空变化特征研究^[21],而关于热带森林恢复过程中土壤碳库组分积蓄与分配动态的研究却相对缺乏。因此,探明土壤有机碳库组分积累与分配对热带森林恢复的响应机制,能为理解热带森林土壤碳沉降过程的调控机制、温室效应减缓和全球碳平衡维持提供关键数据支撑。

西双版纳位于我国大陆热带雨林面积分布最为集中的气候区,由于人口增加、刀耕火种农业活动等人为因素干扰,热带雨林生态系统遭到了严重破坏,形成了一系列处于不同恢复阶段的次生热带森林类型^[22]。随着热带森林恢复进程,植物丰富度与多样性、凋落物输入及土壤理化环境可能发生显著改变,进而导致土壤总有机碳储量及微生物量碳库、易氧化有机碳库、惰性有机碳库积累量的变化^[15]。本文以西双版纳3种恢复阶段的森林类型(白背桐群落、崖豆藤群落、高檐蒲桃群落)为研究对象,比较不同恢复阶段热带森林土壤碳库各组分积累与分配(微生物量碳/总有机碳储量、易氧化有机碳/总有机碳储量、惰性有机碳/总有机碳储量)的时空特征,揭示土壤总有机碳与碳组分的相互关系,并分析热带森林恢复过程土壤碳库组分积累/分配与主要环境因子(植被丰富度与多样性、土壤温湿度、容重、pH、全氮、水解氮、铵氮、硝氮等)的关系,旨在探明土壤有机库积累与分配对热带森林植被恢复的响应特征,为理解热带森林恢复过程中土壤碳库变化对全球碳平衡的贡献提供基础数据参考。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区位于中国科学院西双版纳热带植物园(101°16'E, 21°55'N),地处东南亚热带北缘,为季风气候区,年平均气温 21.5℃,年平均降水量 1557 mm,有明显的干湿交替,其中雨季(5—10月)高温多雨,降水量占全年的 87%,干季(11—4月)降水主要以浓雾的方式,仅占全年降水量的 13%。土壤质地多为壤土,由花岗岩母质风化所形成的砖红壤,呈酸性。地带性植被类型为热带雨林和季雨林,刀耕火种恢复形成了白背桐、中平树、崖豆藤、野芭蕉、高檐蒲桃等一系列群落类型。

在西双版纳中国科学院热带森林植物园实验区内,选择具有代表性的3个处于不同恢复阶段热带森林(白背桐群落、崖豆藤群落、高檐蒲桃群落)为研究样地,3个群落处于连续演替的不同恢复阶段且起源于热带雨林经刀耕火种后形成的裸地,立地条件(包括坡度、坡向与坡位等)及土壤理化性质(pH=4.5,总有机碳=36.7 g/kg、全氮=1.9 g/kg、全磷=0.5 g/kg)等基本类似,样地之间间隔 100—800 m 左右(表1)。采用标准地法调查3个恢复阶段植物群落多样性,在群落种类组成分布比较均匀的地段,分别随机选取5个大小为 40 m×40 m 样方(距离大于 200 m),并在各样方内分别随机设置5个灌木(4 m×4 m)和草本(1 m×1 m)样方,测算各样地乔木层及林下植物 Margalef 丰富度(MR)、Shannon 多样性(H')。其中,MR 和 H' 分别按下式计算^[16]:

$$MR = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H' = - \sum (p_i / \ln p_i) \quad (2)$$

式中,S 为物种总数;N 是群落中所有类群的个体总数,式(2)中 $p_i = n_i / N$; n_i 为第 i 个类群的个体数。

1.2 样品采集与指标测定

于 2018 年 3、6、9、12 月在上述样地按三点法分别随机选择 3 个重复样方,去除地表凋落物后按照三个土层 0—5、5—10、10—15 cm 分层破坏性采集土壤样品,采用便携式土壤水分温度测量仪(SIN-TN8)同步测定各

土层的土壤温度和含水量。将样品带回实验室,剔除树根、残体等杂质后在室内进行自然风干,样品风干后过 2 mm 筛备用。

表 1 样地情况表

Table 1 Sample plot overview

恢复阶段 Restoration stages	白背桐群落 MP (<i>Mallotus paniculatus</i> community)	崖豆藤群落 ML (<i>Mellettia leptobotrya</i> community)	高檐蒲桃群落 SO (<i>Syzygium oblatum</i> community)
恢复年限 Restoration year/a	12	42	53
海拔 Altitude/m	600	568	619
盖度 Coverage/%	60	90	95
凋落物层厚度 Litter layer thickness/cm	1—2	4—5	6—7
树高 Average height/m	8.84 ± 1.42c	10.84 ± 2.41b	19.26 ± 4.75a
胸径 Diameter at breast height/cm	7.12 ± 0.57c	9.94 ± 1.44b	23.48 ± 6.85a
主要植物种类 Dominant plant species	白背桐 (MP)、高檐蒲桃 (<i>Syzygium oblatum</i>); 粉被金合欢 (<i>Acacia pruinescens</i>)、野生风铃草 (<i>Clinopodium chinensis</i>)、丰花草 (<i>Borreria stricta</i>)	思茅崖豆 (ML)、椴叶山麻秆 (<i>Alchornea tiliifolia</i>); 锈毛鱼藤 (<i>Derris ferruginea</i>)、钝叶金合欢 (<i>Acacia megaladena</i>); 刚莠竹 (<i>Microstegium ciliatum</i>)、银叶砂仁 (<i>Amomum sericeum</i>)	高檐蒲桃 (SO)、思茅崖豆 (<i>Millettia leptobotrya</i>)、印度栲 (<i>Castanopsis indica</i>); 黑风藤 (<i>Fissistigma polyanthum</i>)、南山花 (<i>Prismatomeris connata</i>); 多型叉蕨 (<i>Tectaria polymorpha</i>)

表中树高与胸径数值为 5 个调查样方中的平均值±标准误差;不同小写字母表示不同恢复阶段之存在显著性差异

土壤有机碳 (SOC) 采用油浴加热-重铬酸钾氧化法测定^[23];微生物量碳 (MBC) 采用液态氯仿熏蒸浸提-水浴法测定^[24];易氧化有机碳 (EOC) 采用高锰酸钾氧化法测定^[25];土壤容重 (BD) 采用环刀法测定^[26]。参照鲁如坤《土壤农业化学分析方法》^[27] 测定土壤 pH 值、全氮 (TN)、水解氮 (HN)、铵氮 (AN)、硝氮 (NN) 等土壤指标。

土壤剖面总有机碳储量 C_s 、土壤微生物量碳储量、易氧化有机碳储量用下列公式计算^[28]

$$C_s = C \times D \times E \times (1 - G) / 10 \tag{3}$$

式中, C_s 为碳储量、 C 分别代入为土壤有机碳含量 (g/kg)、土壤微生物量碳 (g/kg)、易氧化有机碳 (g/kg), D 为土壤容重 (g/cm³), E 为土层厚度 (cm), G 为直径>2mm 的石砾所占的体积比例 (%) (调查发现土壤粒径均 <2 mm, 故忽略不计)。代入计算分别得出总有机碳储量 (C_{SOC})、土壤微生物量碳储量 (C_{MBC})、易氧化有机碳储量 (C_{EOC})。惰性有机碳储量 (C_{ROC}) 通过 $C_{SOC} - C_{EOC} - C_{MBC}$ 得出。微生物量碳、易氧化碳、惰性有机碳占土壤总有机碳储量的比例 (MBC%、EOC% 和 ROC%) 分别通过 C_{MBC}/C_{SOC} 、 C_{EOC}/C_{SOC} 、 C_{ROC}/C_{SOC} 计算得出。

1.3 数据处理与分析

使用 Excel 2010 制作不同恢复阶段样地情况、土壤理化性质变化表, 土壤有机碳库组分间相互关系采用多项式回归曲线图; 单因素 ANOVA 检验通过 SPSS 26.0 比较各样地变量之间的差异显著性; 采用 Origin 2021 制作土壤碳库积累与分配时空特征图; 运用 Mental 检测植物及土壤性质对土壤碳库积累/分配的相关性及解释率; 通过 Canoco 5 软件进行冗余分析 (RDA) 分析, 确定影响土壤碳库积累与分配的主要环境因子。

2 结果与分析

2.1 不同恢复阶段热带森林土壤碳库组分积累的时空特征

西双版纳热带森林恢复显著促进了土壤有机碳的积累 (图 1—4, $P < 0.05$)。 C_{SOC} 、 C_{MBC} 、 C_{EOC} 、 C_{ROC} 大小顺序为: 恢复后期高檐蒲桃群落 (37.60 t/hm²、1.69 t/hm²、12.46 t/hm²、23.51 t/hm²) > 恢复中期崖豆藤群落

(34.12 t/hm²、1.42 t/hm²、9.96 t/hm²、22.43 t/hm²) > 恢复前期白背桐群落 (30.71 t/hm²、1.12 t/hm²、8.65 t/hm²、20.53 t/hm²), 相较于恢复前期 C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 在恢复后期分别提高了 20.54%、50.84%、44.11%、14.51%, 恢复中期分别提高了 11.12%、25.99%、15.12%、9.25%。不同恢复阶段 C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 均随时间变化显著, 月动态呈“单峰型”变化, 6 月达到峰值, 12 月达到最低水平, 总体呈现出湿季 (6、9 月) 大于干季 (3、12 月) 的季节变化特征。恢复前期, 6 月份 C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 比 12 月分别增加了 26.02%、102.78%、139.37%、19.70%; 恢复中期增加了 37.98%、78.85%、107.09%、21.77%; 恢复后期增加了 42.26%、80.65%、122.12%、24.86%。

热带森林恢复 C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 均具有随土层加深而减少的垂直变化特征 (图 1—4, $P < 0.05$)。在恢复前期, 0—5 cm 土层 C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 比 5—10 cm 土层分别增加了 1.15、1.44、1.25、1.14 倍, 比 10—15 cm 土层分别增加了 1.38、1.82、1.87、1.28 倍; 在恢复中期, 0—5 cm 土层 C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 比 5—10 cm 土层分别增加了 1.22、1.33、1.32、1.15 倍, 比 10—15 cm 土层分别增加了 1.42、1.95、1.77、1.32 倍; 在恢复后期, 0—5 cm 土层 C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 比 5—10 cm 土层分别增加了 1.15、1.24、1.25、1.13 倍, 比 10—15 cm 土层分别增加了 1.32、1.74、1.72、1.30 倍。C_{SOC}、C_{MBC}、C_{EOC}、C_{ROC} 在每一土层中均呈现出恢复后期 > 中期 > 前期的变化趋势, 可见森林恢复及土层对土壤碳库组分影响显著。

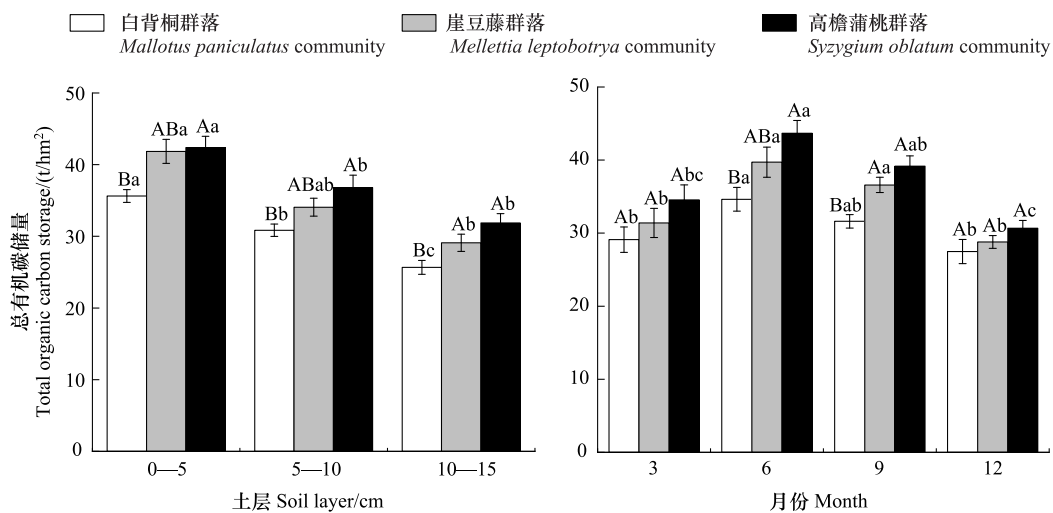


图 1 不同恢复阶段总有机碳储量时空变化

Fig.1 Spatio-temporal changes in total organic carbon storage at different recovery stages

不同大写字母表示不同恢复阶段之间存在显著差异; 不同小写字母表示不同土层或不同月份之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 不同恢复阶段热带森林土壤碳库组分分配的时空特征

热带森林恢复显著提升了 MBC%、EOC% (图 5—6, $P < 0.05$), 表现为后期 (4.47%、32.77%) 分别是前期 (3.58%、26.14%)、中期 (4.08%、30.07%) 的 1.14、1.25、1.15、1.25 倍; 不同恢复阶段 ROC% 均值分别为前期 (71.83%)、中期 (70.10%)、后期 (68.69%), 热带森林恢复对 ROC% 的影响不显著 (图 7, $P > 0.05$)。土壤有机碳组分分配具有明显的时间变化特征 (图 5—7, $P < 0.05$), MBC% 和 EOC% 在 6 月达到最大值 (2.43%—5.07%), 12 月达到最小值 (18.40%—39%)。恢复前期, 12 月份 MBC%、EOC% 比 6 月分别减少了 41.46%、43.75%; 恢复中期减少了 30.43%、48.64%; 恢复后期减少了 30.00%、46.15%, MBC%、EOC% 在同一月份表现为恢复后期 > 恢复中期 > 恢复前期, 湿季 (6、9 月) 分配大于干季 (3、12 月) 的变化特征。ROC% 表现出相反的特征, 在 12 月达到峰值 (58.61%—70.37%), 6 月达到谷值, 在恢复前期、中期、后期 6 月比 12 月分别减少了 9.12%、11.73%、14.83%。

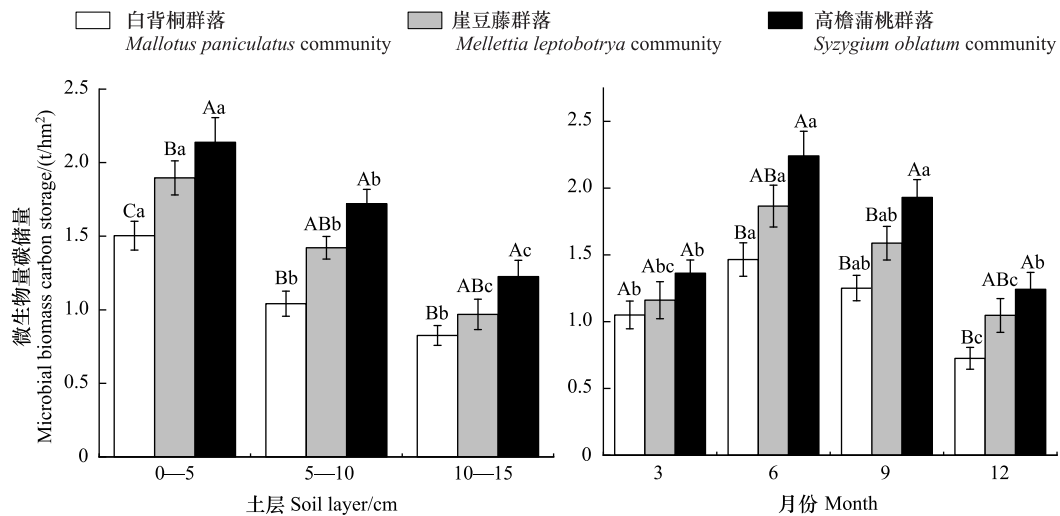


图2 不同恢复阶段微生物量碳储量时空变化

Fig.2 Spatio-temporal changes in microbial biomass carbon storage at different recovery stages

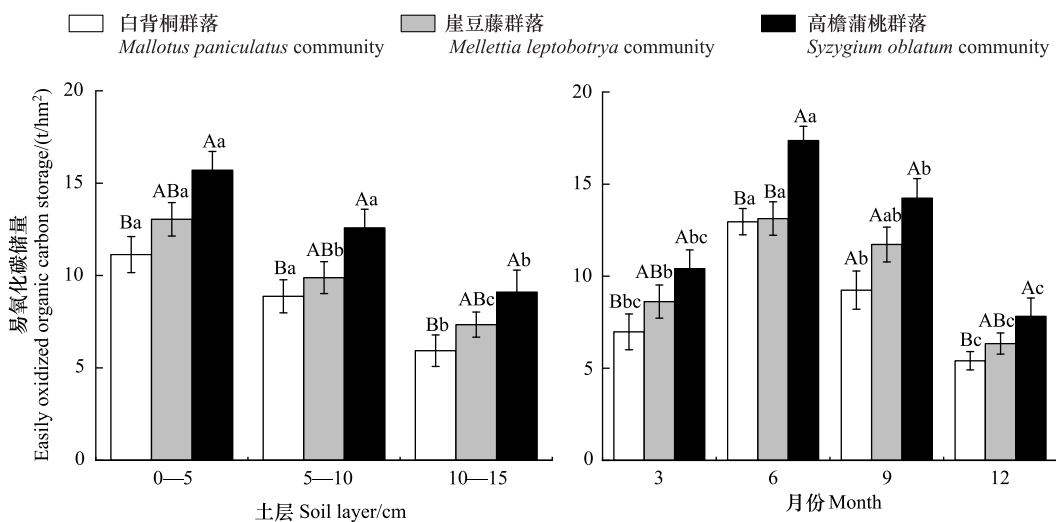


图3 不同恢复阶段易氧化碳储量时空变化

Fig.3 Spatio-temporal variation of easily oxidized organic carbon storage at different recovery stages

热带森林不同恢复阶段 MBC%、EOC%具有随土层深度增加而减少的垂直变化特征(图 5—7, $P < 0.05$)。MBC%在恢复前期、中期、后期 0—5 cm 分别是 5—10 cm、10—15 cm 的 1.26、1.32 倍, 1.16、1.31 倍, 1.06、1.31 倍; EOC%在恢复前期、中期、后期 0—5 cm 分别是 5—10 cm、10—15 cm 的 1.10、1.37 倍, 1.17、1.35 倍, 1.08、1.33 倍。ROC%具有随土层深度呈增加的垂直变化趋势, 但无显著差异, ROC%在恢复前期、中期、后期 0—5 cm 分别是 5—10 cm、10—15 cm 的 0.97、0.91 倍, 0.96、0.93 倍, 0.97、0.96 倍。

2.3 土壤总有机碳与各碳组分储量的相互关系

通过对 C_{SOC} 、 C_{MBC} 、 C_{EOC} 、 C_{ROC} 进行多项式回归分析, 结果表明 C_{SOC} 随 C_{MBC} 、 C_{EOC} 、 C_{ROC} 的增加而显著增加(图 8, $P < 0.05$)。土壤有机碳组分对总有机碳储量变化的解释率不同, 表现为 C_{MBC} (83.71%) $> C_{ROC}$ (82.17%) $> C_{EOC}$ (78.54%)。

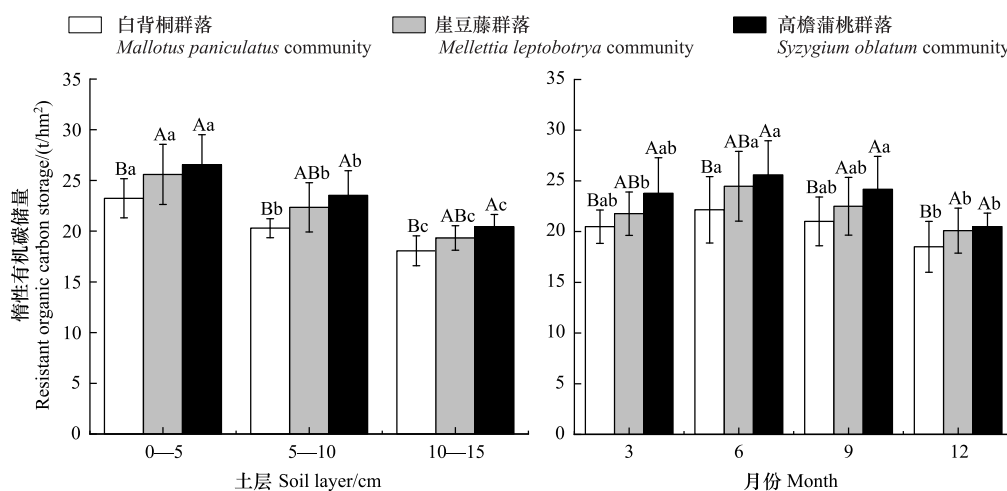


图4 不同恢复阶段惰性有机碳储量时空变化

Fig.4 Spatio-temporal variation of resistant organic carbon storage at different recovery stages

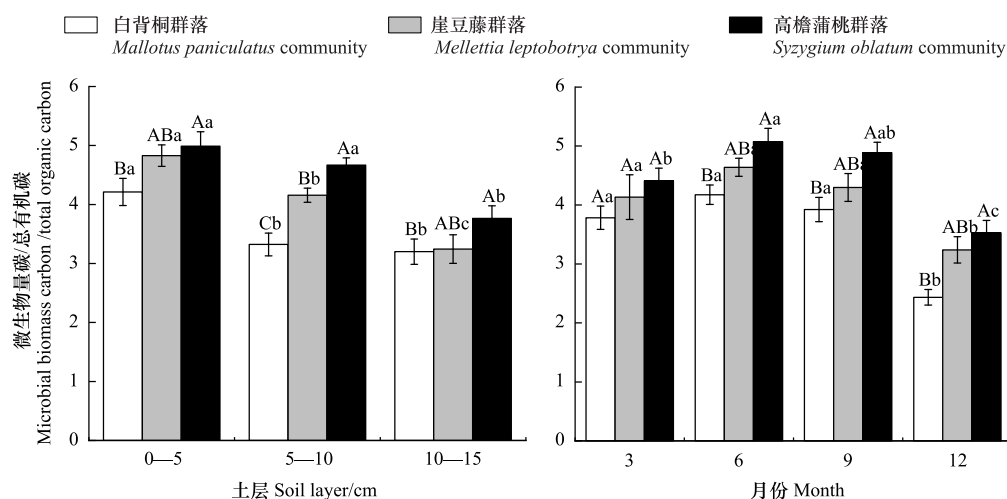


图5 不同恢复阶段微生物生物量碳分配时空变化

Fig.5 Spatial-temporal variation of microbial biomass carbon allocation at different restoration stages

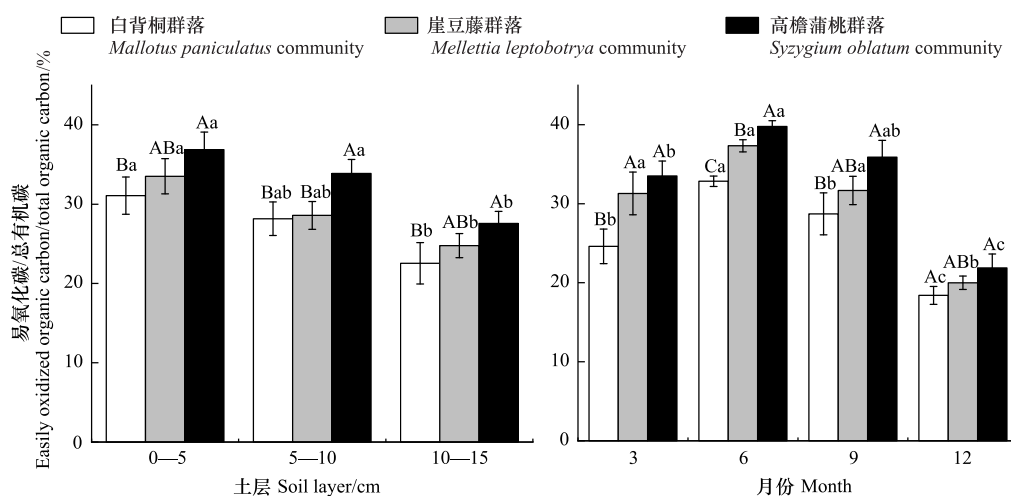


图6 不同恢复阶段易氧化有机碳分配时空变化

Fig.6 Spatial-temporal variation of oxidized organic carbon allocation at different recovery stages

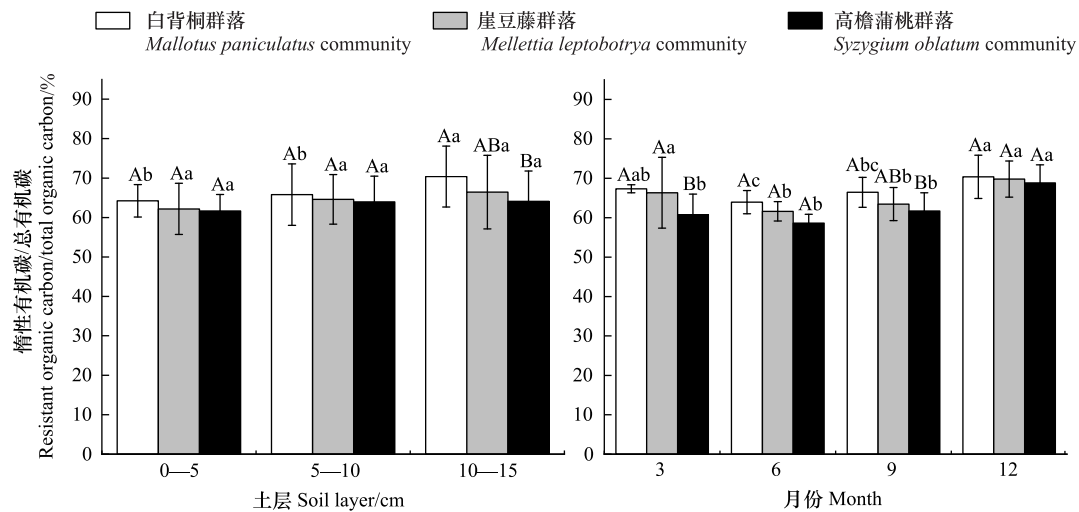


图 7 不同恢复阶段惰性有机碳分配时空变化

Fig.7 Spatial-temporal variation of resistant organic carbon allocation at different recovery stages

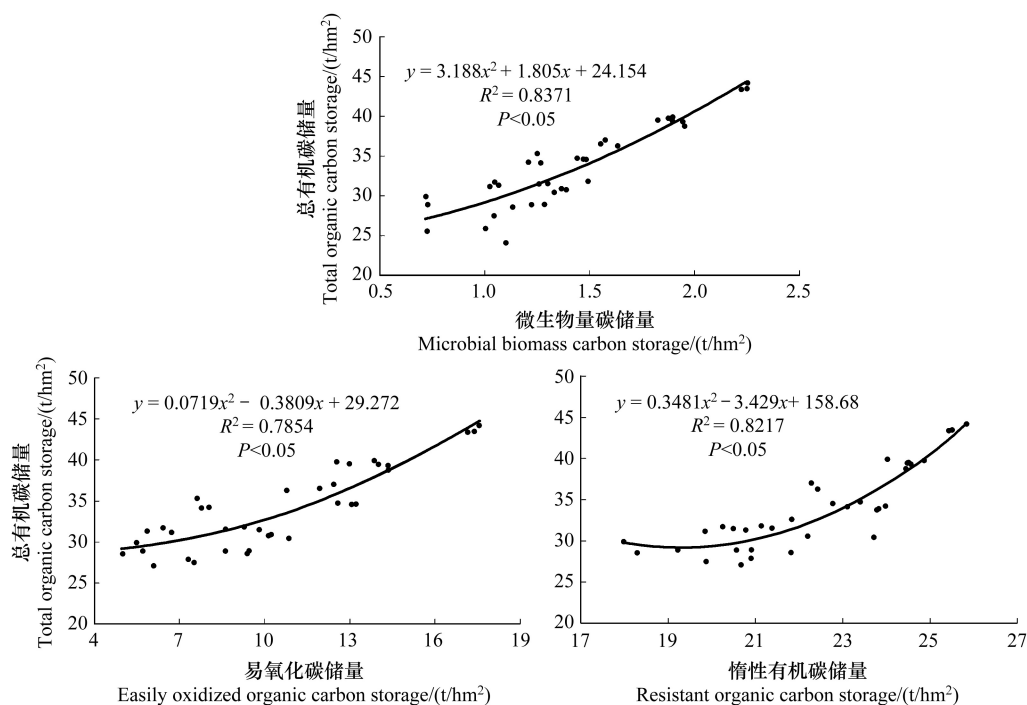


图 8 土壤总有机碳储量与碳组分储量相互关系

Fig.8 Correlation between total soil organic carbon stocks and carbon component stocks

2.4 土壤有机碳积累/分配与植物、土壤环境因子之间的关系

随着热带森林恢复的进行,乔木物种丰富度(TSR)、林下物种丰富度(USR)、乔木 Shannon 多样性(TSD)、林下植物 Shannon 多样性(USD)、HN、AN 均显著呈现出恢复后期>恢复中期>和恢复前期的变化趋势(表 2),在恢复后期,TSR、USR、TSD、USD、HN、AN 分别比恢复前期提高了 490.82%、240.92%、42.78%、50.04%、18.94%、20.18%;TN、NN 呈现出恢复后期显著大于恢复前期、中期的变化趋势(表 2),相较于恢复前期,TN、NN 在恢复后期分别提高了 12.73%、25.51%;ST、BD、pH 并无显著变化。

表 2 不同恢复阶段植物多样性及土壤理化性质的比较

Table 2 Comparison of plant diversity and soil physicochemical properties at different restoration stages

指标 Indexes	恢复阶段 Restoration stages		
	白背桐群落 MP	崖豆藤群落 ML	高檐蒲桃群落 SO
乔木物种丰富度 (TSR)	0.229±0.025c	0.455±0.034b	1.353±0.347a
林下物种丰富度 (USR)	0.474±0.045c	0.672±0.085b	1.616±0.174a
乔木 Shannon 多样性 (TSD)	0.935±0.195c	1.117±0.247b	1.335±0.335a
林下植物 Shannon 多样性 (USD)	1.139±0.116b	1.353±0.154b	1.766±0.285a
温度 ST/℃	20.110±0.89a	21.410±0.81a	20.710±0.63a
含水率 SW/%	22.940±0.75b	22.290±0.67b	23.630±0.77a
容重 BD/(g/cm ³)	1.290±0.023a	1.280±0.047a	1.270±0.027a
pH	3.820±0.046a	3.810±0.041a	3.800±0.035a
全氮 TN/(g/kg)	1.500±0.25b	1.570±0.26b	1.770±0.32a
水解氮 HN/(mg/kg)	91.980±8.32c	101.450±2.60b	109.410±6.71a
铵氮 AN/(mg/kg)	11.050±0.85c	12.660±0.84b	13.280±1.03a
硝氮 NN/(mg/kg)	1.450±0.19b	1.510±0.21b	1.820±0.16a

TSR:乔木物种丰富度 Tree species richness; USR:林下物种丰富度 Understory species richness; USD:乔木 Shannon 多样 Understory shannon diversit; TSD:林下植物 Shannon 多样 Tree shannon diversity; ST:土壤温度 Soil temperature; SW:土壤含水率 Soil moisture content; BD:容重 Bulk density; TN:全氮 Total nitrogen; HN:水解氮 Hydrolyzable nitrogen; AN:铵氮 Ammonium nitrogen; NN:硝氮 Nitrate nitrogen;不同小写字母表示不同恢复阶段之间存在显著差异 ($P<0.05$)

通过 Mantel 分析得出土壤有机碳库积累 (C_{SOC} 、 C_{MBC} 、 C_{EOC} 、 C_{ROC}) / 组分分配 ($MBC\%$ 、 $EOC\%$ 、 $ROC\%$) 与环境因子 (TSR、USR、TSD、USD、ST、SW、BD、pH、TN、HN、AN、NN) 之间的相关性和解释值 (图 9)。结果表明, TN 均与土壤有机碳库积累 (C_{SOC} 、 C_{MBC} 、 C_{EOC} 、 C_{ROC}) 与分配 ($MBC\%$ 、 $EOC\%$ 、 $ROC\%$) 弱相关 (Pearson's $r = 0.4—0.6$; $P<0.05$); 土壤有机碳库积累与 TSR、USR、BD、pH、HN、NN 中等相关, 土壤有机碳库分配与 SW、AN、NN 中等相关 (Pearson's $r = 0.6—0.7$; $P<0.05$); 土壤有机碳库积累与 TSD、USD、SW、ST、AN 较强相关, 土壤有机碳库分配与 TSR、USR、TSD、USD、ST、BD、HN 较强相关 (Pearson's $r = 0.7—0.9$; $P<0.05$)。pH、AN 是土壤有机碳库积累的主要影响因子, 而 TN、HN 对土壤有机碳库分配具有重要影响 (Mantel's $r \geq 50\%$, Mantel's $P<0.05$)。

RDA 结果显示 (图 10): 第一、二坐标轴对土壤有机碳库积累 (C_{SOC} 、 C_{MBC} 、 C_{EOC} 、 C_{ROC}) 贡献了 91.59%, 对土壤有机碳库分配 ($MBC\%$ 、 $EOC\%$ 、 $ROC\%$) 贡献了 82.42%。SW、ST 均与 C_{SOC} 和 C_{MBC} 的夹角较小, 是 C_{SOC} 和 C_{MBC} 主控因子; HN、USR 则分别是 C_{EOC} 和 C_{ROC} 的主要影响因子; TSD 与 $MBC\%$ 夹角较小, SW 与 $EOC\%$ 夹角较小, 故 TSD、SW 是 $MBC\%$ 和 $EOC\%$ 的主要驱动因子; BD 与夹角 $ROC\%$ 较小, 是 ROC 分配变化的主控因子。

3 讨论

3.1 热带森林不同恢复阶段土壤碳库组分积累时空变化特征

本研究发现热带森林恢复显著促进土壤有机碳库各组分的积累。这是热带森林恢复能够引起植物覆盖、凋落物输入和植物多样性增加, 从而导致土壤有机碳库各组分储量均呈增加的趋势^[29]。在恢复初期, 植被群落组成、结构及多样性较为单一, 森林内小气候不稳定, 且凋落物数量较少, 输入土壤的养分低, 不利于土壤微生物对土壤微生物量碳、易氧化有机碳和惰性有机碳的转化和固持^[30—31]。在恢复中后期, 森林小气候逐渐趋于稳定、群落结构与物种组成趋于复杂, 生物量及凋落物积累增加, 促进了土壤有机碳库组分的蓄积。徐红伟^[32]亦研究表明黄土高原地区森林恢复 (8a—45a) 促进土壤有机碳的积累, 但其增幅 (66.67%) 大于西双版纳热带森林 (18.91%), 可能是热带高温高湿的水热条件刺激土壤微生物对有机碳的分解, 致使土壤碳组分积累量较小^[33]。

热带森林恢复对土壤有机碳库组分积累季节动态的影响表现为湿季显著高于干季。这与样地土壤温湿度变化呈现出一致规律, 说明土壤微气候对土壤碳蓄积具有显著影响。湿季中, 6 月土壤有机碳库组分积累

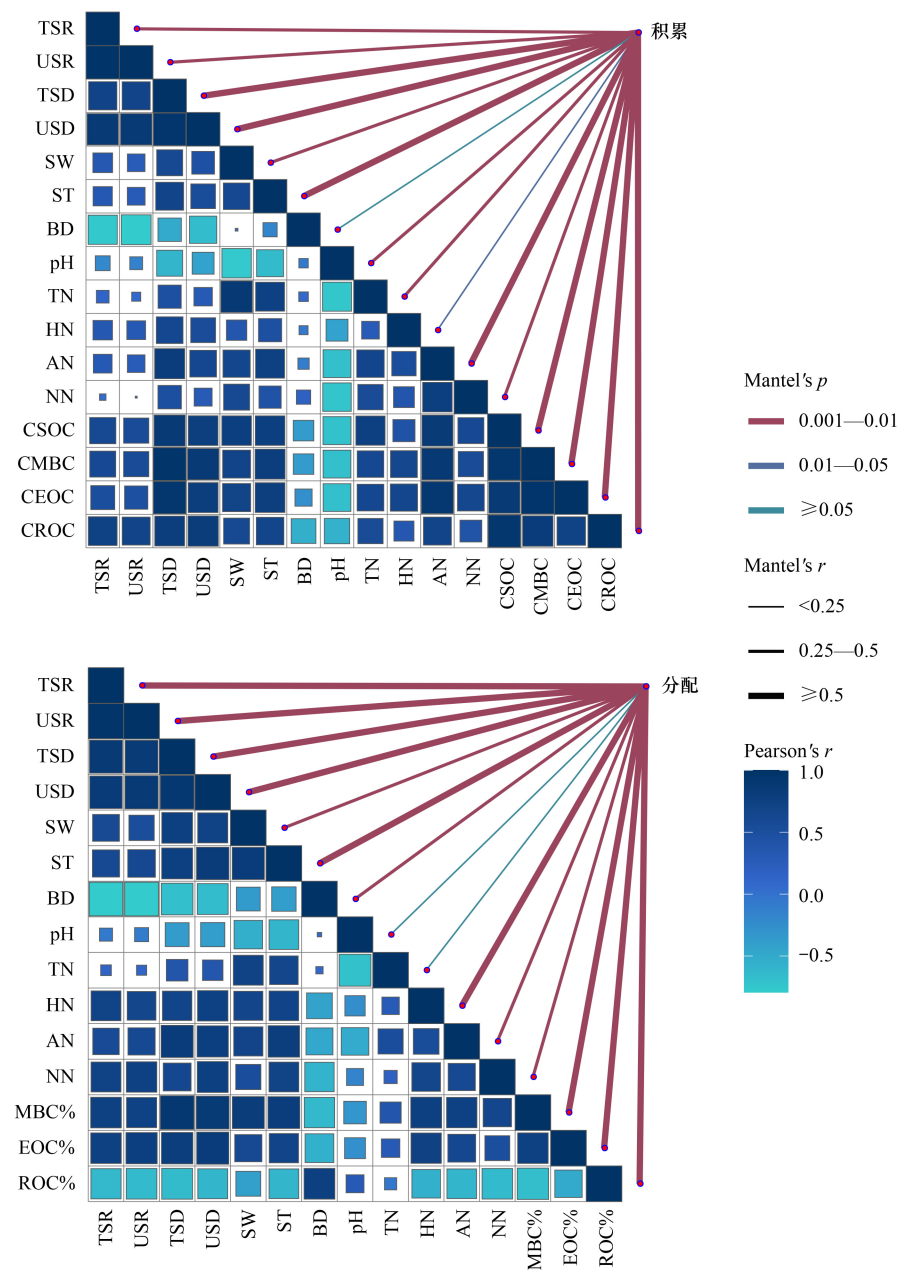


图9 土壤有机碳积累/分配与植物、土壤环境因子 Mantel 分析

Fig.9 Soil organic carbon accumulation/allocation and Mantel analysis of plant and soil environmental factors

C_{SOC} :土壤总有机碳储量 Total soil organic carbon stocks; C_{MBC} :微生物生物量碳储量 Microbial biomass carbon storage; C_{EOC} :易氧化有机碳储量 Easily oxidized organic carbon storage; C_{ROC} :惰性有机碳储量 Resistant organic carbon stocks; $MBC\%$:微生物生物量碳占比 Microbial biomass carbon allocation; $EOC\%$:易氧化有机碳占比 Eadily oxidizable organic carbon allocation; $ROC\%$:惰性有机碳占比 Resistant organic carbon allocation; TSR :乔木物种丰富度 Tree species richness; USR :林下物种丰富度 Understory species richness; USD :下层植被香农多样性指数 Understory shannon diversity; TSD :树种香农多样性指数 Tree shannon diversity; ST :土壤温度 Soil temperature; SW :土壤含水率 Soil moisture content; BD :容重 Bulk density; TN :全氮 Total nitrogen; HN :水解氮 Hydrolyzable nitrogen; AN :铵氮 Ammonium nitrogen; NN :硝氮 Nitrate nitrogen;

量最高,可能由于湿季较高的土壤温湿度有利于微生物的碳固持。曹润^[7]和李少辉^[34]研究表明,西双版纳湿季适宜温度与充沛降水,使得植被新陈代谢旺盛,促进了枯枝落叶和根系分泌物向土壤的碳输入,增强了土壤微生物活性从而促进土壤有机碳的积累。干季低温少雨,植被生长及凋落物输入速率缓慢,土壤微生物碳固

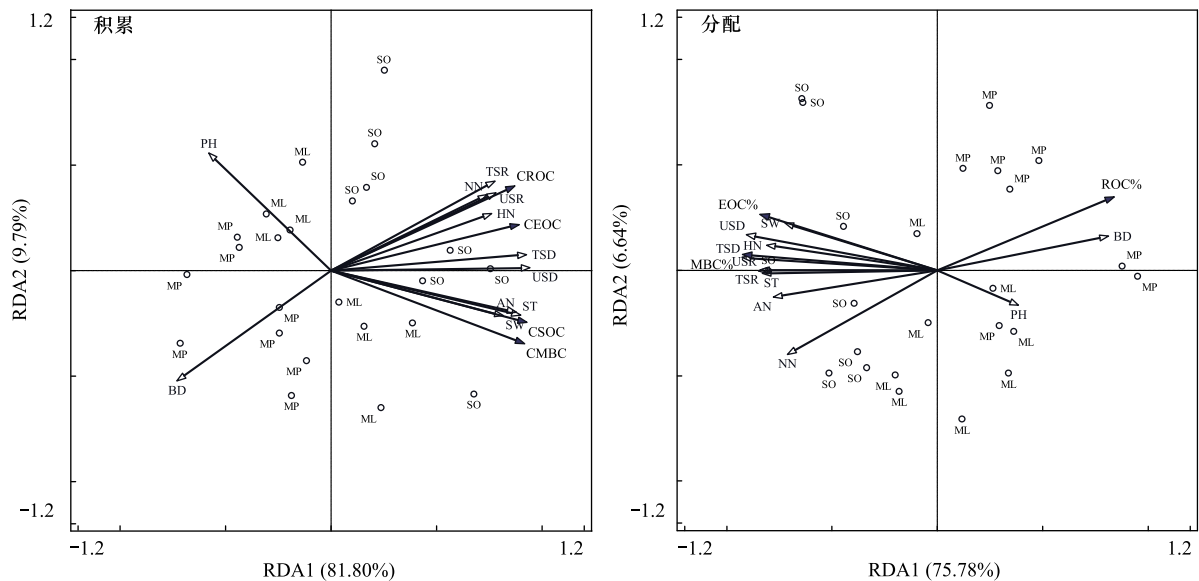


图 10 土壤有机碳积累/分配与植物、土壤环境因子冗余分析

Fig.10 Soil organic carbon accumulation/allocation and principal component analysis of plant and soil environmental factors

MP:白背桐群落 *Mallotus paniculatus* community; ML:崖豆藤群落 *Mellettia leptobotrya* community; SO:高檐蒲桃群落 *Syzygium oblatum* community

持及碳库组分积累均较慢,从而呈现出土壤碳库组分积累湿季大于干季的变化规律。热带森林恢复对土壤有机碳积累的季节波动具有样地差异性,恢复后期土壤有机碳储量、微生物量碳储量、惰性有机碳储量的季节波动大于恢复前期,此现象可能与立地条件、土壤有机碳矿化速率等因素有关^[35]

不同恢复阶段热带森林土壤有机碳库组分积累的垂直变化表现为沿土层深度的增加而减小。土壤有机碳储量主要取决于植物根系、分泌物、微生物数量,由于凋落物的碳归还量随土层加深而降低导致了土壤有机碳的表聚现象^[36]。表层凋落物输入数量较多,水热条件与透气性也较高,能够促进土壤微生物对表层有机碳的固持^[37—39]。另外,陈小梅^[40]研究得出的南亚热带森林土壤有机碳库积累的垂直减少幅度(46—55%)与西双版纳热带森林(15—87%)具有一定的差异性,这与不同研究区样地的林龄、植被多样性、凋落物输入及土壤理化环境的差异密切相关^[41]。热带森林恢复对土壤有机碳积累的垂直变化幅度有所不同,土壤易氧化有机碳储量在恢复前期的垂直变化幅度大于恢复中后期,猜测可能与土壤表层输入下层的土壤有机碳质量等因素相关^[42]。

3.2 热带森林不同恢复阶段土壤碳库组分分配变化特征

热带森林恢复促进了土壤微生物量碳和易氧化有机碳的分配,但对惰性有机碳分配无显著影响。这由于在恢复初期,通过地上植被进入土壤中的有机碳较少,导致恢复初期微生物量碳及易氧化碳的分配较低。而随着热带森林的恢复,植被组成逐渐稳定且多样化,凋落物输入量、根系分泌物及细根量增加,微生物活动增强,加快了土壤有机碳的周转速率,导致活性有机碳的分配量增加。而土壤惰性碳组分是由活性有机碳通过微生物转变碳形成,研究表明,森林恢复初期土壤惰性碳组分可能不会产生显著的增加,因此,本研究经 51 年的恢复未能导致惰性有机碳分配比例的显著增加。一般到 60—100 年后,活性有机碳在微生物作用下大量转化为惰性有机碳,从而使得惰性碳储量及惰性碳分配显著提高^[6]。热带森林不同恢复阶段土壤碳库组分分配(MBC%、EOC%)表现为湿季显著高于干季,且均在恢复后期配比最高,而 ROC%呈现出相反的变化规律。Sinsabaugh^[43]研究结果亦表明,恢复后期稳定的微环境和较高的凋落物输入,导致微生物对易分解有机碳的转化与积累量大于其分解量,从而促进了微生物量碳及易氧化有机碳在总有机碳库中占比的增加,相应地导致了惰性有机碳占比的减少。习丹^[44]研究表明,湿季高温高湿样地环境及丰富碳源,有利于土壤微生物对活

性有机碳的固持作用,并相应地减少了惰性有机碳,使其在总有机碳库中的占比降低;干冷的环境不利于微生物的活性,可能降低其对土壤有机碳的积累、分解与转化,影响土壤易氧化有机碳的产生与积累,从而使热带森林干季微生物量碳、易氧化有机碳在土壤碳库的分配比湿季少,干季干冷的土壤环境抑制了微生物对惰性有机碳的分解,导致其配比湿季高。与本研究结果不同,陈小梅^[40]研究表明南亚热带恢复演替序列 EOC% 呈现恢复早期高于后期的变化趋势,可能由于不同气候区样地物理化学环境的差异而导致。

热带森林不同恢复阶段 MBC%、EOC% 呈现随土层深度的增加而减少的垂直变化特征,而 ROC% 随土层无显著变化。Sinsabaugh^[45]、韩琳^[46]等研究表明,表层凋落物层和根系的集聚,能够促进土壤微生物的生长、繁殖与活动,而深层土壤透气差、温度低、可利用的反应底物少,土壤微生物活性较弱,导致土壤微生物的碳固定能力较弱,降低了土壤易氧化有机碳的分配,同时易氧化有机碳向惰性有机碳的转化在不同土层中可能差异不显著,从而导致惰性有机碳配比无显著垂直变化^[47]。另外,本研究中恢复前期 MBC%、EOC% 沿土层减少幅度高于恢复中后期,由于恢复前期还未形成稳定的林内小气候,植物所产生的碳源较少且更多在维持自身所需的生长发育,导致分配到下层的较少,从而减少最高。

3.3 植物与土壤环境因子对碳库储量及组分分配的影响

热带森林恢复显著提高了乔木与林下植物物种丰富度、Shannon 多样性以及土壤氮库含量,从而影响土壤碳库储量及组分分配。胡靓达等^[48]研究表明,植物群落作为土壤碳积累的主要驱动力,其类型、组成、结构、起源的不同决定了植物生物量和凋落物输入量的差异性,并影响土壤微生物对有机碳的固持,森林恢复过程中植物丰富度、多样性及凋落物数量的显著增加,能够促进土壤碳的蓄积过程^[49—51]。热带森林恢复提高了植被丰富度及多样性,促进有机碳输入、土壤微生物丰富度及功能多样性的增加,提高了对碳库的分解与转化,刺激易氧化有机碳形成与积累,从而显著促进了土壤有机碳库对微生物量碳及易氧化碳的分配^[52—53]。惰性有机碳主要存在于土壤黏粒及细粉粒中,具有较强的稳定性,一般在土壤中不易被微生物分解或矿化,大多数年平均周转年限超过一百年,所以热带森林恢复对惰性有机碳分配的影响并不显著^[54]。

土壤氮库组分(全氮、水解氮、铵氮、硝氮)显著促进了热带森林土壤碳库储量及组分分配,而对 ROC% 的影响不显著。李昌珍^[55]研究得出土壤氮库含量主要通过影响植被生长、枯枝落叶的生产及凋落物的质量,而调控土壤碳库各组分的积累与分配。Huang 等研究^[56]得出植物多样性及丰富度将导致枯落物碳氮比(C/N)降低,枯落物作为土壤-植物营养物质传输的主要桥梁,较高的凋落物质量(低 C/N),能提高枯落物的周转速率,有利于微生物对有机碳的分解、转化与积累,同时促进有机质向深层土壤运输的能力^[57—59];氮的增加能够提高微生物量和土壤酶活性,提高土壤氮素利用率、抑制土壤中有害物质的产生,为微生物营造良好生长环境,促进土壤有机碳库积累及组分分配^[54]。在本研究中恢复后期 C/N(20.01)小于恢复中期(24.03)和前期(25.22),恢复前期,植被丰富度、多样性低,C/N 较高,土壤微生物活性弱,对凋落物及根系残留物的分解转换速率较慢,易氧化碳的含量较低,导致有机碳库对微生物量碳及易氧化碳的分配低,而恢复后期,植被组成逐渐稳定、丰富度、多样性显著增加,C/N 逐渐降低,刺激了土壤微生物的生长、繁殖活动,进而促进了土壤碳库对微生物量碳及易氧化碳分配^[60]。

本研究中,土壤容重、pH 对热带森林土壤碳库储量及组分分配具有负向调控作用,对 ROC% 具有正向调控作用。这与贾御夫^[60]、张静静等^[61]研究结果相似。一般而言,土壤容重小,肥力高、透气性好、土质疏松,有利于水分渗蓄,而随径流冲刷的碳氮养分为植被根系的生长发育提供了养分,进一步促进了植被的生长发育,有利于土壤微生物的生长繁殖,从而提高土壤有机碳库的积累及分配^[62]。土壤 pH 过高过低都会影响土壤性质及养分有效性,抑制植物生长发育和土壤微生物活动,进而影响土壤碳库积累及组分的分配过程^[63]。在恢复初期,土壤容重相对较高,其黏粒含量高,土体较为紧实,土壤水热循环水平低,有机质含量低,微生物活性低,不利于易氧化有机碳的积累及惰性有机碳的分解,所以初期微生物量碳及易氧化碳分配低,而惰性碳分配高。随着热带森林恢复的进程,森林的生长发育,为土壤提供了大量有机质,土壤容重逐渐降低,提高了土壤保肥能力,为大量微生物的生长繁殖提供了保障,土壤微生物量的积累促进稳态碳转化为活性碳,即促进

了惰性有机碳的分解及易氧化有机碳的形成,致使土壤有机碳库对微生物量碳及易氧化碳分配的提高,对惰性有机碳分配的降低。

4 结论

热带森林次生恢复进程,通过引起林下物种丰富度和乔木香农多样性的增加以及土壤物理环境(温湿度、容重)及氮库(水解氮)含量的变化,从而刺激热带土壤有机碳库组分积累与分配。研究结果有助于理解热带森林恢复过程中土壤有机碳积累与分配特征及其调控机制,能为正确评估热带森林恢复中土壤碳库变化在全球碳平衡和温室效应缓解中的地位与作用提供关键数据参考。

致谢:感谢中国科学院西双版纳热带植物园园林园艺中心及杨效东研究员、周文君副研究员、李少辉博士生为该研究土壤样品采集和测定提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] 邱思慧,林少颖,王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述. 中国水土保持科学, 2022, 20(3): 142-150.
- [2] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [3] Chang E H, Chen T H, Tian G L, Chiu C Y. The effect of altitudinal gradient on soil microbial community activity and structure in moso bamboo plantations. *Applied Soil Ecology*, 2016, 98: 213-220.
- [4] Konisky D M, Hughes L, Kaylor C H. Extreme weather events and climate change concern. *Climatic Change*, 2016, 134(4): 533-547.
- [5] 霍莲杰,纪雄辉,吴家梅,朱坚. 土壤有机碳分类研究进展. 湖南农业科学, 2012(1): 65-69.
- [6] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317-331.
- [7] 曹润,王邵军,陈闽昆,左倩倩,王平,曹乾斌. 西双版纳热带森林不同恢复阶段土壤微生物生物量碳的变化. 生态环境学报, 2019, 28(10): 1982-1990.
- [8] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学报, 1999, 18(3): 32-38.
- [9] 张玲,张东来,毛子军,丁一阳. 不同群落类型土壤惰性碳含量特征与维持机制. 森林工程, 2019, 35(06): 16-25.
- [10] 秦海龙,贾重建,卢瑛,郭彦彪,姜坤,李先霞,杨奇青,温志滔. 广东罗浮山土壤有机碳储量与组分垂直分布特征. 西南林业大学学报: 自然科学, 2018, 38(3): 108-115.
- [11] 刘骞,张腾龙,杨成都,方震毅. 土地利用方式对城市草坪土壤活性有机碳组分及碳库活度的影响. 北方园艺, 2020(19): 94-101.
- [12] 刘晨. 松嫩平原西部土壤有机碳时空变化及其影响因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [13] 符雅盛,张利华,郑芸菁,朱志儒,马永明,崔越. 鄂西鄂南流域表层土壤有机碳时空变化及其影响因素. 水土保持通报, 2020, 40(5): 189-195.
- [14] 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. 生态学报, 2020, 39(1): 270-281.
- [15] 胥超,谢锦升,曾宏达,付林池,陈坦,杨玉盛. 自然恢复和人工促进恢复对侵蚀退化生态系统碳贮量的影响比较. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(01): 53-60.
- [16] 陈金磊,张仕吉,李雷达,辜翔,刘兆丹,王留芳,方晰. 亚热带不同植被恢复阶段林地凋落物层现存量 and 养分特征. 生态学报, 2020, 40(12): 4073-4086.
- [17] 张金,许明祥,王征,马昕昕,邱宇洁. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2721-2727.
- [18] 王卫霞,丁超,李策,包鹏程,龙海川. 重度火干扰下不同恢复年限对土壤有机碳的影响. 林业科技通讯, 2018(1): 15-18.
- [19] 魏媛,张金池,喻理飞. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物生物量碳的变化. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(5): 71-75.
- [20] 张仕吉,项文化,孙伟军,方晰. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响. 生态环境学报, 2016, 25(6): 911-919.
- [21] 杨万勤,冯瑞芳,张健,王开运. 中国西部3个亚高山森林土壤有机层和矿质层碳储量和生化特性(英文). 生态学报, 2007, 27(10): 4157-4165.
- [22] 王连晓,史正涛,刘新有,杨帆. 西双版纳橡胶林土壤有机碳分布特征研究. 浙江农业学报, 2016, 28(7): 1200-1205.
- [23] 张旭,牛艳萍. 油浴加热法测定土壤样品中有机碳. 黑龙江科技信息, 2014(10): 77, 189.
- [24] 周桦,宇万太,马强,张璐. 氯仿薰蒸浸提法测定土壤微生物量碳的改进. 土壤通报, 2009, 40(1): 154-157.
- [25] 周伟,吴红慧,张运龙,徐明岗, MUHAMMAD Aslam, 文石林. 土壤活性有机碳测定方法的改良. 土壤通报, 2019, 50(1): 70-75.
- [26] 江胜国. 国内土壤容重测定方法综述. 湖北农业科学, 2019, 58(S2): 82-86, 91.
- [27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [28] 张中瑞,赵志明,邓智文,谢镇东,邓泽伟,朱航勇. 梅州市林地土壤有机碳储量及空间分布特征. 林业与环境科学, 2022, 38(2): 153-158.
- [29] 王洪岩,王文杰,邱岭,苏冬雪,安静,郑广宇,祖元刚. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异. 生态学报, 2012, 32(3): 833-843.

- [30] 刘宝, 吴文峰, 林思祖, 林开敏. 中亚热带 4 种林分类型土壤微生物生物量碳氮特征及季节变化. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1901-1910.
- [31] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展. 水土保持研究, 2022, 29(2): 406-413.
- [32] 徐红伟. 黄土高原不同植被带植被恢复土壤有机碳稳定性及其与土壤性质相关性研究. 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2019.
- [33] 张仲胜, 李敏, 宋晓林, 薛振山, 吕宪国, 姜明, 武海涛, 王雪宏. 气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展. 土壤学报, 2018, 55(2): 273-282.
- [34] 李少辉, 王邵军, 张哲, 陈闽昆, 曹润, 曹乾斌, 左倩倩, 王平. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤易氧化有机碳时空动态的影响. 应用生态学报, 2019, 30(2): 413-419.
- [35] 左倩倩, 王邵军, 陈闽昆, 曹润, 王平, 曹乾斌, 赵爽, 杨波. 土壤碳矿化对西双版纳热带森林恢复演替的响应. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1318-1325.
- [36] 张雨洁, 王斌, 李正才, 黄盛怡, 原雅楠, 秦一心. 不同树龄香榧土壤有机碳特征及其与土壤养分的关系. 西北植物学报, 2018, 38(8): 1517-1525.
- [37] 吴小刚, 王文平, 李斌, 梁跃龙, 刘以珍. 中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化. 土壤学报, 2020, 57(6): 1539-1547.
- [38] 王越, 栾亚宁, 王丹, 戴伟. 油松林土壤有机碳储量变化及其影响因素. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 1023-1032.
- [39] 王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 唐立涛, 所尔阿芝, 罗雪萍, 李洁, 王长庭. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征. 生态学报, 2019, 39(11): 4096-4105.
- [40] 陈小梅, 闫俊华, 林媚珍, 褚国伟, 吴建平, 张德强. 南亚热带森林植被恢复演替中土壤有机碳组分及其稳定性. 地球科学进展, 2016, 31(1): 86-93.
- [41] 党珍珍, 周正朝, 王凯博, 姚小萌. 黄土丘陵区不同恢复年限对天然草地土壤碳库动态的影响. 水土保持通报, 2015, 35(5): 49-54.
- [42] 张哲, 王邵军, 李霁航, 曹润, 陈闽昆, 李少辉. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应. 生态学报, 2019, 39(17): 6257-6263.
- [43] Sinsabaugh R L, Turner B L, Talbot J M, Waring B G, Powers J S, Kuske C R, Moorhead D L, Follstad Shah J J. Stoichiometry of microbial carbon use efficiency in soils. *Ecological Monographs*, 2016, 86(2): 172-189.
- [44] 习丹, 旷远文. 城市化梯度上亚热带常绿阔叶林土壤有机碳及其组分特征. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2149-2155.
- [45] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, Richter A. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling. *Ecology Letters*, 2013, 16(7): 930-939.
- [46] 韩琳, 张玉龙, 金烁, 王娇, 魏岩岩, 崔宁, 魏巍. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1625-1633.
- [47] 阎欣, 刘任涛, 安慧. 土壤易氧化有机碳与溶解性有机碳对荒漠草地沙漠化过程中土壤碳库变异的表征. 草业学报, 2018, 27(11): 15-25.
- [48] 胡靓达, 周海菊, 黄永珍, 姚贤宇, 叶绍明, 喻素芳. 不同杉木林分类型植物多样性及其土壤碳氮关系的研究. 生态环境学报, 2022, 31(3): 451-459.
- [49] Saleem M, Hu J, Jousset A. More than the sum of its parts: microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2019, 50: 145-168.
- [50] Shao P S, Liang C, Lynch L, Xie H T, Bao X L. Reforestation accelerates soil organic carbon accumulation: evidence from microbial biomarkers. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 131: 182-190.
- [51] 李晓娜, 王超, 张微微, 赵春桥, 史瑞双, 薛瑞彬, 樊冉冉. 京郊荒滩地短期植被恢复对土壤理化性质及微生物群落结构的影响. 水土保持学报, 2019, 33(5): 343-348, 357.
- [52] 杨贵森, 张志山, 赵洋, 石亚飞, 虎瑞. 沙坡头地区凋落物分解及其对土壤微生物群落的影响. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1810-1818.
- [53] Zhou G Y, Xu S, Ciais P, Manzoni S, Fang J Y, Yu G R, Tang X L, Zhou P, Wang W T, Yan J H, Wang G X, Ma K P, Li S G, Du S, Han S J, Ma Y X, Zhang D Q, Liu J X, Liu S Z, Chu G W, Zhang Q M, Li Y L, Huang W J, Ren H, Lu X K, Chen X Z. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation. *National Science Review*, 2019, 6(4): 746-757.
- [54] 陈梦蝶, 崔晓阳. 土壤有机碳矿物固持机制及其影响因素. 中国生态农业学报: 中英文, 2022, 30(2): 175-183.
- [55] 李昌珍. 黄土丘陵区人工林土壤氮素积累、转化对土壤碳库的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [56] Huang Y Y, Ma Y L, Zhao K, Niklaus P A, Schmid B, He J S. Positive effects of tree species diversity on litterfall quantity and quality along a secondary successional chronosequence in a subtropical forest. *Journal of Plant Ecology*, 2017, 10(1): 28-35.
- [57] 许宇星, 王志超, 张丽丽, 竹万宽, 杜阿朋. 不同种植年限尾巨桉人工林叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. 林业科学研究, 2018, 31(6): 168-174.
- [58] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 张俊, 黄春燕, 刘云梅. 生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响. 水土保持通报, 2018, 38(5): 70-76.
- [59] Xiong X, Zhou G Y, Zhang D Q. Soil organic carbon accumulation modes between pioneer and old-growth forest ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(12): 2419-2428.
- [60] 贾御夫. 利用放射性碳同位素和生物标志物技术研究温度对土壤有机碳动态的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [61] 张静静, 刘尊驰, 鄢创, 王云霞, 刘凯, 时新荣, 袁志友. 土壤 pH 值变化对 3 种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响. 草业学报, 2021, 30(2): 69-81.
- [62] 王瑞, 武威, 刘涛, 孙成明. 耕地土壤容重作用及其调控途径研究进展. 北方园艺, 2020(4): 135-141.
- [63] 于秀丽. 内陆盐碱湿地土壤 pH 对土壤有机碳含量的影响. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 203-208.