

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202111063

肖纳, 莫雪青, 谭许脉, 等. 异龄复层混交对马尾松人工林土壤团聚体碳组分和转化的影响 [J]. 广西植物, 2022, 42(4): 595–607.

XIAO N, MO XQ, TAN XM, et al. Effects of multi-layer and mixed-age forest management of *Pinus massoniana* plantations on carbon components and transformation of soil aggregates [J]. Guihaia, 2022, 42(4): 595–607.



异龄复层混交对马尾松人工林土壤 团聚体碳组分和转化的影响

肖 纳¹, 莫雪青¹, 谭许脉¹, 苏小艳¹, 颜金柳¹, 高冠女¹,
张 文¹, 黄雪蔓^{1,2}, 尤业明^{1,2*}

(1. 广西大学 林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 南宁 530004; 2. 广西友谊关森林
生态系统国家定位观测研究站, 广西 凭祥 532600)

摘 要: 复层混交种植的近自然化经营是我国亚热带地区最常用的营林模式之一,但目前其对土壤有机碳 (SOC) 的积累及其稳定性的影响仍不明确。为探讨该营林模式对土壤碳组分及其转化的影响,该文选取南亚热带复层混交经营的马尾松近自然林 (CP) 作为研究对象,并以相邻未改造的马尾松纯林 (PP) 作为对照 (CK),重点探究异龄复层混交后原土和不同粒径土壤团聚体的稳定性、有机碳组分、微生物生物量和酶活性等的变化规律及其之间的关系。结果表明:(1) 复层混交后表征土壤团聚体稳定性的平均重量直径 (MWD) 显著提高;与 PP 相比,CP 原土和不同粒径土壤团聚体的 SOC、高度不稳定有机碳 (LOC)、中度不稳定有机碳 (IOC)、惰性有机碳 (ROC)、土壤碳氮比 (C/N)、微生物生物量碳和氮 (MBC 和 MBN)、微生物呼吸 (MR)、 β -葡萄糖苷酶 (BG)、纤维二糖水解酶 (CB)、N-乙酰-葡萄糖苷酶 (NAG) 和酚氧化酶 (PO) 均显著提高,而其 MBC/MBN 和微生物代谢熵 (qCO_2) 却显著降低。(2) 几乎所有原土和土壤团聚体的 SOC、总活性有机碳 (LOC+IOC)、ROC 和 ROC 数 (RCI) 均与 MWD 呈显著或极显著正相关。(3) SOC 及其组分的变化主要来自于土壤理化性质、微生物性质和植物性质三者之间的交互作用,而复层混交后导致的凋落物碳氮比 (C/N_{lf}) 和土壤全氮 (TN) 的显著变化是驱动 SOC 及其组分发生改变的最关键因子。研究认为,复层混交是一种有效促进马尾松人工林 SOC 及其稳定性组分形成的近自然经营模式,该研究结果为提高马尾松人工林的土壤质量和稳定性提供了科学依据。

关键词: 马尾松人工林, 土壤团聚体, 有机碳组分, 土壤酶活性, 近自然化经营

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2022)04-0595-13

Effects of multi-layer and mixed-age forest management of *Pinus massoniana* plantations on carbon components and transformation of soil aggregates

收稿日期: 2022-01-28

基金项目: 国家自然科学基金 (31960240, 32171755, 31560201); 广西自然科学基金 (2019GXNSFAA185023, 2017GXNSFAA198207, 2016GXNSFBA380222) [Supported by National Natural Science Foundation of China (31960240, 32171755, 31560201); Guangxi Natural Science Foundation (2019GXNSFAA185023, 2017GXNSFAA198207, 2016GXNSFBA380222)]。

第一作者: 肖纳 (1995-), 硕士研究生, 主要从事人工林土壤养分循环研究, (E-mail) 634316082@qq.com。

*通信作者: 尤业明, 博士, 副教授, 主要从事森林土壤养分循环的调控机制研究, (E-mail) youyeming@163.com。

XIAO Na¹, MO Xueqing¹, TAN Xumai¹, SU Xiaoyan¹, YAN Jinliu¹, GAO Guannü¹,
ZHANG Wen¹, HUANG Xueman^{1,2}, YOU Yeming^{1,2*}

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College of Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Youyiguang Forest Ecosystem National Research Station, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

Abstract: Close-to-nature forest management of multi-layer mixing is one of the most common forest conversion patterns in subtropical regions of China, but its effects on soil organic carbon (SOC) accumulation and stability are still unclear. In this study, the close-to-nature plantations of masson pine (*Pinus massoniana*) (CP) by multi-layer mixed management in the southern subtropical region were selected as the research object, and the adjacent pure plantations of masson pine (PP) without modification were taken as the control (CK). And then we investigated the stability, organic carbon component, microbial biomass and enzyme activity of soil aggregates with different particle sizes and their relationships. The results were as follows: (1) Mean weight diameter (MWD), which was used to characterize the stability of soil aggregates, increased significantly after near-natural modification. Compared to PP, SOC, labile organic carbon (LOC), intermediate organic carbon (IOC), recalcitrant organic carbon (ROC), soil C/N, microbial biomass carbon and nitrogen (MBC and MBN), microbial respiration (MR), β -glucosidase (BG), cellobiohydrolase (CB), N-acetyl-glucosaminidase (NAG) and phenol oxidase (PO) were significantly increased, but the MBC/MBN and microbial metabolic quotient (qCO_2) were significantly decreased. (2) The SOC, total organic carbon (LOC+IOC), ROC and ROC index (RCI) of in soils or most soil aggregates were significantly positively correlated with MWD. (3) The change of SOC content and its components mainly resulted from the interaction among soil physical and chemical, microbial and plant properties. Furthermore, the significant changes of litter carbon to nitrogen ratio (C/N_{LF}) and soil total nitrogen (TN) caused by masson pine with multi-layer mixed forest management were the primary drivers of differences in SOC content and its components. Our findings indicate that the close-to-natural forest management model of multi-layer mixing is an effective management measure to improve SOC and its stability components, and so as to promote masson pine plantations to sequester more and more stabilized SOC in the subtropical region of China.

Key words: masson pine (*Pinus massoniana*) plantations, soil aggregates, organic carbon components, soil enzyme activities, close-to-nature forest management

增加森林碳汇,是实现“碳达峰、碳中和”的一个重要途径,而森林土壤碳库由于具有巨大的碳固持潜力,其在减缓大气 CO_2 浓度快速升高和调控全球生态系统的碳平衡方面发挥着极其关键的作用,因此成为目前世界各国应对全球气候变化重点探索的领域 (Bossio et al., 2020)。我国人工林面积位居世界第一,约 7 954.28 万 hm^2 ,具有巨大的碳汇功能,但其土壤碳扣押潜力受树种、种植模式和管理措施等方面的影响。因此,如何才能增加人工林土壤碳的储量和稳定性,已成为当前国内外许多科学家关注的焦点和亟需解决的问题。

“近自然森林经营”是一种最早源于德国的兼容林业生产和生态保护的森林经营模式,长期实践证明该模式能在保持森林自然环境健康稳定发展的前提下达到不同的收获目标,从而使得森林综合效益达到最大化 (Moradi et al., 2012; 牟耀杰等, 2019)。针叶纯林间伐后套种多种阔叶树是

一种快速形成针阔混交、异龄、复层结构人工林群落的重要方法,是近自然改造经营的一项主要技术措施 (陆元昌和甘敬, 2002)。针叶纯林经复层混交的近自然化经营后,其树种组成和林分结构发生了明显改变,影响了人工林群落的生产力、凋落物的数量和质量、根系及其分泌物以及物种多样性。前人的研究表明,经近自然化改造的针叶纯林可达到优化林分结构,增加物种多样性,改变土壤理化性质,提升人工林生产力等目的 (孙冬婧等, 2015; 明安刚等, 2017; Ming et al., 2018)。因此,人工针叶纯林经过近自然化改造形成针/阔异龄混交林后,通过改变林分微环境、凋落物的数量和质量、根系及其分泌物等,势必会对土壤的物理结构 (尤其是团聚体结构)、土壤微生物群落组成和功能以及其他土壤理化性质产生更为复杂的影响,最终影响到土壤碳的积累和稳定性。

马尾松 (*Pinus massoniana*) 作为重要的用材林

树种及荒山造林的先锋树种之一,因其具有耐干旱瘠薄、速生丰产、适应性强等特性而在我国亚热带地区被广泛种植,并给人们带来了巨大的经济价值与社会效益(Fu et al., 2011; 杨予静等, 2018)。但是,早期马尾松的营林措施主要关注地上木材产量,而忽视了地下土壤质量的提升,造成马尾松人工林经营结构单一,从而导致其生产力低下、土壤的团粒结构失去稳定性、养分流失严重和固碳潜力受限等(You et al., 2018; 梁艳等, 2021)。利用引入阔叶树种,如:红锥(*Castanopsis hystrix*)、香梓楠(*Michelia hedyosperma*)和格木(*Erythrophleum fordii*)等对马尾松进行混交改造,建立系统生产力更高和生态系统服务功能更强的针/阔异龄混交林替代原有大面积分布的低质低效马尾松纯林,这一做法已成为我国亚热带地区最常用的营林改造模式之一,也是目前林学、生态学研究的热点问题之一(刘世荣等, 2018)。然而,马尾松人工纯林通过引入阔叶树种异龄复层混交后,其凋落物数量和质量、根系生物量和分泌物等均发生了不同程度的改变,这些改变将对土壤团聚体的碳组分和碳转化速率产生哪些影响,是否有利于提高土壤碳的固持和稳定性,与土壤团聚体稳定性存在何种关系等。对这些问题仍缺乏深入的探究和理解。因此,本研究选择南亚热带的马尾松纯林间伐后套种阔叶树种形成的异龄复层近自然林为试验对象,并以相邻的马尾松纯林(未改造)作为对照(CK),重点探究异龄复层混交后土壤团聚体稳定性的变化特征;原土和不同径级土壤团聚体碳组分和土壤酶活性的有关变化;土壤碳组分与土壤酶活性、环境因子和土壤团聚体稳定性之间的关系,以期为提高低效马尾松人工林的土壤碳固持及稳定性等方面提供有效的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区和试验地概况

本试验区域位于广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站内的中国林科院热带林业实验中心的人工林试验示范基地(106°51'—106°53'E, 22°02'—22°04'N)。该区域地处亚热带,具有亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温暖少雨,土壤类型以花岗岩风化后形成的红壤为主,年均温 21℃,年均降雨量 1 400 mm。其典型的人工针

叶林以马尾松和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)为主,人工阔叶林主要有红锥、格木、大叶栎(*Quercus griffithii*)、日本厚朴(*Magnolia obotava*)和铁力木(*Mesua ferrea*)等(莫雪青等, 2022)。

本研究选择的马尾松近自然林(close-to-nature plantations of masson pine, CP)的改造过程如下:选择立地条件、经营历史和生长状况基本一致的马尾松纯林(1993 种植,初植密度为 2 500 株·hm⁻²),分别在 2000 年、2004 年和 2007 年对其进行间伐,最终保留的密度为 450 株·hm⁻²。于 2008 年春季,对间伐后的马尾松林均匀补植红锥和香梓楠 1 年生幼苗(实生苗),补植的红锥和香梓楠密度均为 375 株·hm⁻²,最终经过异龄复层混交后的近自然林的密度为 1 200 株·hm⁻²(马尾松:红锥:香梓楠=6:5:5),同时选择邻近未进行改造的马尾松纯林(pure plantations of masson pine, PP)(林分密度与近自然林总密度一致,1 200 株·hm⁻²)作为对照(CK)。

根据随机区组设计原则,于 2020 年 7 月在试验区随机选择了 4 个试验区组,其中每个区组均包含 CP 和 PP 2 种林分类型,区组内的 CP 和 PP 各设置一个 20 m × 20 m 的样方,整个实验共设置了 8 个 400 m²的样方,并采用传统的样地调查法对每个实验样方进行调查。其中,在每个样方中随机布设 6 个的尼龙网收集框(1 m × 1 m)用于监测其年凋落物的量(litter fallmass, LF, kg·hm⁻²·yr⁻¹),每个样方的细根生物量(fine root mass, FR)采用土钻法获得,所有的植物样品烘干(65℃)至恒重,经粉碎后测定其碳和氮的含量(陈永康等, 2021)。样地的基本信息详见表 1。

1.2 土壤样品的采集和处理

于 2020 年 8 月分别对每个实验样方进行土壤样品采集。考虑混交后的马尾松人工林树木具有随机分布的特点,本研究采用系统样点布设法来确定土壤采样点,即把每个样方(20 m × 20 m)分成 16 个 5 m × 5 m 大小相等的网格,网格线的交点即为采样点(9 个)。在采用点去除表面凋落物和杂质后在进行原状土(0~10 cm 土层)的采集,其规格(长×宽×高)为 15 cm × 10 cm × 10 cm。为防止原状土结构遭到破坏,特将采集好的土壤块放入硬质 PVC 塑料盒后置于保温箱中低温保存。把所有土壤带回实验室后将同一样方的 9 个采样点土块混合均匀,剔除杂质后将其分成两份。一

表 1 样地的基本信息 (平均值±标准误)
Table 1 Main characteristics in plantations ($\bar{x} \pm s_x$)

林分类型 Forest type	坡度 Slope (°)	坡位 SP	树高 TH (m)	胸径 DBH (cm)	凋落物量 LF (kg·hm ⁻² ·yr ⁻¹)	细根生物量 FR (g·kg ⁻¹)	凋落物 碳氮比 (C/N _{LF})	郁闭度 Canopy density
马尾松纯林 PP	20.33± 0.88a	中坡 Mesoslope	20.04± 0.83	25.99± 1.37	8 252.53± 328.46b	8.07± 0.40b	47.38± 0.32a	0.76± 0.02b
马尾松近自然林 CP	21.50± 0.87a	中坡 Mesoslope	—	—	10 664.63± 448.22a	11.10± 0.62a	39.71± 0.55b	0.85± 0.01a
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	—	—	22.83± 0.63	37.55± 1.00	—	—	—	—
阔叶树 Broad-leaved tree	—	—	11.58± 0.20	12.75± 0.55	—	—	—	—

注: SP. 坡位; TH. 树高; DBH. 胸径; LF. 凋落物量; FR. 细根生物量; C/N_{LF}. 凋落物碳氮比。
Note: SP. Slope position; TH. Tree height; DBH. Diameter at breast height; LF. Litterfall mass; FR. Fine root biomass; C/N_{LF}. Litter carbon to nitrogen ratio.

份土壤过 2 mm 土筛作为原土,另一过 2 mm 和 0.25 mm 的套筛,得到粒级为>2 mm、0.25~2 mm 和<0.25 mm 的 3 种不同粒径土壤团聚体。将处理后的土壤样品保存在-20 ℃的冰箱中,以用于测定酶活性、有机碳组分、微生物呼吸和其他土壤理化性质等指标。

1.3 土壤样品的理化性质分析

土壤容重 (bulk density, BD) 指标采用环刀法测定;土壤含水量 (soil water content, SWC, %) 指标是将新鲜土壤于 105 ℃烘干至恒重后测定;土壤 pH 值是利用 pH 计测定(土:水=1:2.5, w:v);土壤总氮 (total nitrogen, TN) 依照凯氏定氮法进行测定;土壤铵态氮 (ammonia nitrogen, NH₄⁺-N) 和硝态氮 (nitrate nitrogen, NO₃⁻-N) 含量在 KCl (2 mol·L⁻¹) 溶液浸提后,将浸提液置于连续流动分析仪 (SEAL Auto Analyzer 3) 上分析测定 (鲍士旦, 2000)。

土壤碳化学组分采用酸解法进行测定 (Guo et al., 2021): 称取风干的土壤样品 (0.50 g) 置于 100 mL 离心管中, ①加入 20 mL 1.25 (2.5N) H₂SO₄ 溶液, 在 105 ℃下水解 0.5 h, 离心 (5 000 r·min⁻¹, 10 min) 取其上清液, 稀释后测定的上清液碳含量即为高度不稳定有机碳 (labile organic carbon, LOC); ②加入 2 mL 6.5 (13N) H₂SO₄ 溶液, 振荡 (25 ℃摇床) 充分水解 (12 h) 后加入 24 mL 超纯水, 使其溶液的浓度降至 0.5 (1N), 在 105 ℃下水解 3 h 后离心 (5 000 r·min⁻¹, 10 min) 取上清液, 稀释后测定的上清液碳含量即为中度不稳定有机碳 (intermediate organic carbon, IOC), 高度不稳定的碳与中度不稳

定的碳之和统称总活性碳 (总活性碳=LOC+IOC); ③剩余土壤残渣烘干 (50 ℃) 至恒重后称重, 测定其惰性有机碳含量 (recalcitrant organic carbon, ROC)。

1.4 土壤酶活性、微生物生物量和呼吸的测定

采用 96 孔微孔板法测定 6 种土壤酶活性, 包括 4 种水解酶, 分别为参与土壤 C 循环的 β-葡萄糖苷酶 (β-glucosidase, BG) 和纤维二糖水解酶 (cellobiohydrolase, CB)、参与 N 循环的 N-乙酰-葡萄糖苷酶 (N-acetyl-glucosaminidase, NAG) 和亮氨酸氨基肽酶 (leucine-amino-peptidase, LAP); 2 种氧化酶, 分别为酚氧化酶 (phenol oxidase, PO) 和过氧化物酶 (peroxidase, PER)。其中, 水解酶活性的测定是基于甲基伞形酮 (MUB) 为底物的荧光法, 置于酶标仪 (Thermo Multiskan Spectrum) 在波长 365~450 nm 下进行测定, 每个样品 8 个重复 (Steinauer et al., 2015; You et al., 2020)。氧化酶以 1-3,4-二羟基苯丙氨酸 (L-DOPA) 作为底物的比色法进行测定, 其中, L-DOPA 加 0.3% H₂O₂ 用于测定过氧化物酶活性, 两种氧化酶的活性均置于酶标仪在波长 460 nm 下进行测定, 每个样品 8 个重复 (Saiya-Cork et al., 2002)。水解酶和氧化酶的活性单位均统一为 nmol·h⁻¹·g⁻¹ soil。

土壤微生物生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 和微生物量氮 (microbial biomass nitrogen, MBN) 采用氯仿熏蒸浸提法进行测定 (Vance et al., 1987), 而可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 和可溶性有机氮 (dissolved nitrogen, DON) 为未经过氯仿熏蒸处理的新鲜土

壤用硫酸钾 (K_2SO_4 , $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 浸提出的有机碳和氮含量 (You et al., 2014)。土壤微生物呼吸 (microbial respiration, MR) 采用室内培养法进行测定,其分析过程主要参照 (Jin et al., 2010) 描述的测定方法进行。微生物代谢熵 (microbial metabolic quotient, qCO_2) 为 MR 和 MBC 的比值。

1.5 数据处理

平均重量直径 (mean weight diameter, MWD) 根据 Castro 提出的公式计算获得 (Castro et al., 2002), 主要用于土壤团聚体稳定性的评价, 其计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \tag{1}$$

式中: n 表示团聚体个数; X_i 为第 i 粒径团聚体直径的平均值 (mm); W_i 为第 i 粒径团聚体的重量百分含量 (%)。

利用 SPSS 19.0 的独立样本 t 检验 (independent sample t test) 对 PP 和 CP 之间土壤理化性质、土壤酶活性、有机碳组分和微生物呼吸等进行显著性检验, 显著性水平设置为 $P < 0.05$; 采用 Pearson 相关性分析土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 及其组分与 MWD 之间的相关性, 显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

基于野外监测和室内分析, 一共得到 22 个生物和非生物因子纳入影响 SOC 及其组分的多元统计分析, 包括土壤理化性质: BD、MWD、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、pH、DOC、DON; 微生物性质: MBC、MBN、MBC/MBN、BG、CB、NAG、LAP、PO、PER、MR、 qCO_2 ; 植物性质: FR、LF、 C/N_{LF} 。

采用“Vegan”数据包的“Varpart”程序对影响 SOC 及其组分的环境因子进行方差分解分析, 其分析过程是在 R 3.01 上运行完成的。不同类型环境因子的纯效应及其之间的相互效应采用韦恩图进行显示, 图中的数字代表各类环境因子对 SOC 及其组分的解释率, 其中解释率为负值时, 在图中不作显示, 但其解释率等同于“0” (Sattler et al., 2010)。最后运用冗余分析 (RDA) 的蒙特卡洛检验 (Monte Carlo, 499 iterations) 对基于野外监测和室内分析得到的 22 个环境因子进行预选, 并把具有显著性影响 ($P < 0.05$) 的环境因子作为最终的环境变量纳入 RDA 模型分析, 并通过模型的排序确定影响 SOC 及其组分的最主要环境因子 ($P < 0.05$) 及其解释率。RDA 程序是在多元统计分析软

件 Canoco for Windows 4.5 上运行完成, 所有数据在分析之前均经过对数转换 (You et al., 2014)。运用软件 Sigma Plot 14.0 完成所有的作图。

2 结果与分析

2.1 复层混交对马尾松人工林土壤团聚体粒径分布和理化性质的影响

研究结果表明, 相对于 PP, CP 的不同粒径土壤团聚体重量百分比发生了不同程度的变化, 其中, CP 的 $>2 \text{ mm}$ 团聚体重量百分比显著高于 PP ($P < 0.05$), 而 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 和 $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体在两种林分中无显著差异 ($P > 0.05$)。本研究, CP 土壤团聚体的 MWD 显著高于 PP, 表明马尾松人工纯林经复层混交后其土壤团聚体的稳定性显著提高 (表 2)。

表 2 PP 和 CP 土壤团聚体的重量 (百分比) 及 MWD (平均值 $\pm$ 标准误)

Table 2 Proportion of soil aggregates in PP and CP ($\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$)				
样地类型 Stand type	各径级土壤团聚体 重量分布 (百分比) Distribution of soil aggregate fractions (%)			平均重量 直径 MWD (mm)
	>2 mm	0.25~2 mm	<0.25 mm	
马尾松纯林 PP	31.52± 0.38b	49.82± 0.67a	18.65± 0.51a	1.69± 0.01b
马尾松近自然林 CP	35.69± 0.85a	47.43± 0.90a	16.88± 0.70a	1.80± 0.02a

相比于 PP, CP 的 SOC、 C/N 、MBC 和 MBN 在原土和各个径级的土壤团聚体中均显著提高 ($P < 0.05$), CP 的 TN 和 NH_4^+-N 在原土和大团聚体 ($>2 \text{ mm}$) 中显著提高 ($P < 0.05$); 而 CP 的 MBC/MBN、DOC 和 DON 在原土和大多数径级土壤团聚体中却显著降低 ($P < 0.05$), NO_3^--N 和 pH 值在原土和各个径级的土壤团聚体中均无显著变化 ($P > 0.05$) (表 3)。

2.2 复层混交对马尾松人工林原土和土壤团聚体碳组分的影响

CP 的 LOC、IOC、ROC 含量在原土及所有粒径团聚体均与 PP 存在显著或极显著差异。其中, LOC 在原土、 $>2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 和 $<0.25 \text{ mm}$ 粒

表 3 PP 和 CP 原土及不同粒径土壤团聚体的理化性质

Table 3 Soil physical and chemical properties in PP and CP bulk soils and soil aggregates with different particle sizes

团聚体分类 Aggregate size	样地类型 Stand type	SOC (g· kg ⁻¹)	TN (g· kg ⁻¹)	C/N	MBC (mg· kg ⁻¹)	MBN (mg· kg ⁻¹)	MBC/ MBN	DOC (mg· kg ⁻¹)	DON (mg· kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N (mg· kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N (mg· kg ⁻¹)	pH
原土 Bulk soil	PP	36.25± 2.31b	3.89± 0.12b	9.33± 0.69b	450.46± 33.20b	41.21± 1.36b	10.91± 0.64a	997.02± 17.43a	59.74± 2.51a	45.60± 3.39b	38.17± 2.46a	4.13± 0.04a
	CP	52.83± 3.11a	4.42± 0.02a	11.94± 0.71a	595.32± 5.79a	70.68± 1.36a	8.43± 0.09b	883.90± 12.66b	50.28± 2.50b	74.48± 10.80a	35.81± 3.95a	4.15± 0.03a
>2 mm	PP	30.68± 1.12b	3.98± 0.17b	7.76± 0.48b	418.98± 44.49b	41.02± 3.66b	10.26± 0.25a	942.04± 41.33a	62.13± 2.21a	64.99± 6.15b	35.82± 2.15a	4.08± 0.02a
	CP	51.86± 2.53a	4.49± 0.05a	11.58± 0.69a	537.80± 13.78a	73.16± 4.99a	7.44± 0.44b	890.81± 20.10b	51.09± 1.12b	100.02± 9.26a	37.66± 3.36a	4.12± 0.01a
0.25~2 mm	PP	39.12± 2.63b	4.49± 0.21a	8.70± 0.27b	483.75± 57.35b	47.76± 2.15b	10.11± 0.36a	1000.72± 24.51a	63.89± 1.56a	83.61± 3.70b	46.58± 10.27a	4.11± 0.02a
	CP	57.00± 2.50a	4.75± 0.14a	12.01± 0.41a	606.26± 21.86a	89.06± 3.29a	6.84± 0.38b	951.11± 26.64a	47.56± 3.19b	104.94± 3.47a	34.51± 2.19a	4.09± 0.01a
<0.25 mm	PP	39.53± 4.00b	4.71± 0.13a	8.36± 0.71b	487.75± 21.04b	45.34± 1.55b	10.78± 0.38a	1096.88± 39.60a	63.69± 5.11a	76.73± 12.58a	36.04± 1.39a	4.10± 0.02a
	CP	68.62± 4.20a	5.08± 0.18a	13.55± 0.95a	634.15± 31.89a	77.86± 1.87a	8.17± 0.50b	897.24± 20.21b	50.31± 1.53b	86.95± 7.15a	32.10± 2.69a	4.07± 0.01a

注: SOC. 土壤有机碳; TN. 全氮; C/N. 碳氮比; MBC. 微生物生物量碳; MBN. 微生物生物量氮; MBC/MBN. 微生物生物量碳氮比; DOC. 可溶性碳; DON. 可溶性氮; NH₄⁺-N. 铵态氮; NO₃⁻-N. 硝态氮。

Note: SOC. Soil organic carbon; TN. Total nitrogen; C/N. Carbon nitrogen ratio; MBC. Microbial biomass carbon; MBN. Microbial biomass nitrogen; MBC/MBN. C/N ratio of microbial biomass; DOC. Dissolved organic carbon; DON. Dissolved nitrogen; NH₄⁺-N. Ammonium nitrogen; NO₃⁻-N. Nitrate nitrogen.

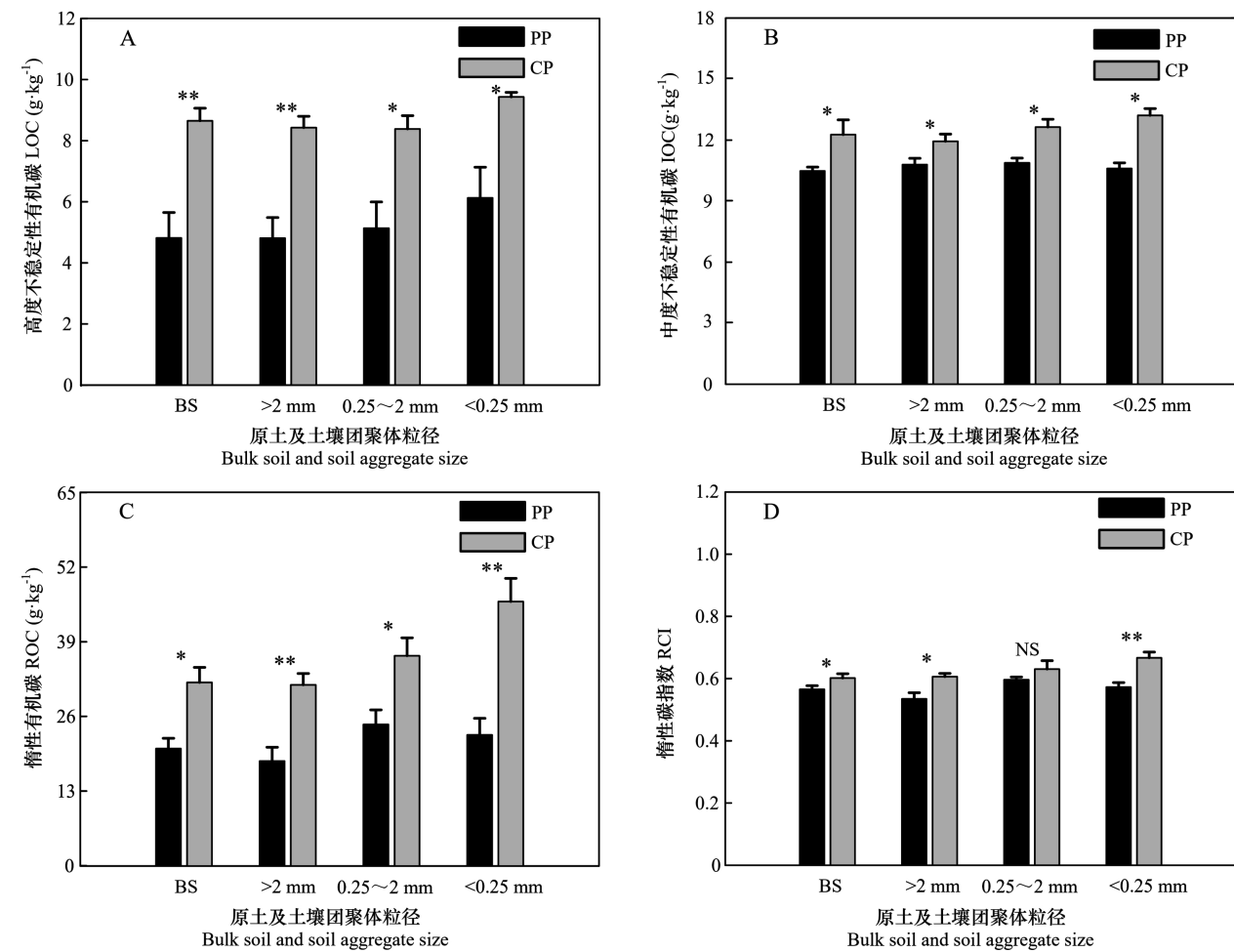
径土壤团聚体分别增加了 79.59%、75.22%、63.22%和 53.95%(图 1:A);IOC 在原土、>2 mm、0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒径土壤团聚体分别增加了 18.29%、12.91%、16.18%和 24.62%(图 1:B);ROC 在原土、>2 mm、0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒径土壤团聚体分别增加了 56.33%、72.67%、48.55%和 101.67%(图 1:C),但 CP 的 RCI 与 PP 只在原土、>2 mm 和<0.25 mm 粒径存在显著和极显著差异,并分别增加了 10.17%、13.42% 和 16.71%,而在 0.25~2 mm 粒径土壤团聚体无显著差异($P>0.05$)(图 1:D)。

MWD 是一种表示土壤物理结构稳定性的指标。如图 2 所示,SOC 在原土、0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒径土壤团聚体中与 MWD 呈显著线性正相关($P<0.05$),而在>2 mm 粒径土壤团聚体中与 MWD 呈极显著线性正相关($P<0.01$)(图 2:A);总活性有机碳(LOC+IOC)在原土、0.25~2 mm 和<0.25 mm 与 MWD 呈显著或极显著线性正相关,但在>2 mm 粒径土壤团聚体中与 MWD 的关系不显著($P>0.05$)(图 2:B);ROC 在原土、>2 mm 和 0.25~2 mm 粒径土壤团聚体中与 MWD 呈显著

线性正相关($P<0.05$),但在<0.25 mm 粒径土壤团聚体中与 MWD 的关系不显著($P>0.05$)(图 2:C);RCI 只在>2 mm 粒径土壤团聚体中与 MWD 呈显著线性正相关($P<0.05$),而在原土、0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒径土壤团聚体中均与 MWD 的关系不显著($P>0.05$)(图 2:D)。

2.3 复层混交对马尾松人工林原土和土壤团聚体酶活性和微生物呼吸的影响

数据分析结果表明,CP 的 BG、CB、NAG、PO 在原土及所有粒径团聚体均与 PP 存在显著或极显著差异。其中,BG 在原土、>2 mm、0.25~2 mm 和<0.25 mm 径级团聚体分别增加了 237.34%、264.66%、152.42%和 227.29%(图 3:A);CB 在原土、>2 mm、0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒径的团聚体中分别增加了 109.67%、124.89%、154.57%和 82.88%(图 3:B);NAG 在原土、>2 mm、0.25~2 mm 及<0.25 mm 团聚体中分别极显著增长了 71.63%、74.36%、57.81%和 81.26%(图 3:C);PO 在原土、>2 mm、0.25~2 mm 及<0.25 mm 团聚体分别增加了 40.59%、44.67%、78.12%和 34.96%(图 3:E);CP 的 LAP 仅在原土和 0.25~2 mm 土



BS. 原土; * 表示在 $P<0.05$ 水平上的显著性差异; ** 表示在 $P<0.01$ 水平上的显著性差异; *** 表示在 $P<0.001$ 水平上的显著性差异; NS 表示无显著性差异。下同。
BS. Bulk soil; * indicates significant differences at 0.05 level; ** indicates significant differences at 0.01 level; *** indicates significant differences at 0.001 level; NS indicates no significant differences. The same below.

图 1 PP 和 CP 原土和不同粒径土壤团聚体的碳组分变化

Fig. 1 Changes of carbon components in PP and CP bulk soils and soil aggregates with different particle sizes

壤小团聚体与 PP 存在极显著差异,分别增加了 33.47%和 56.16%,在>2 mm 及<0.25 mm 团聚体中均无显著差异(图 3:D),但 PER 不管在原土还是团聚体中均无显著变化(图 3:F)。

CP 的 MR 在原土及>2 mm、0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒径的团聚体中与 PP 存在极显著差异,并分别提升了 14.24%、17.90%、17.33%和 20.66%(图 4:A),但 CP 的 qCO_2 不仅在原土、0.25~2 mm 和<0.25 mm 粒径土壤团聚体中与 PP 存在显著或极显著差异,且分别降低了 23.49%、34.51%和 19.47%,而在>2 mm 粒径的大团聚体中不存在显著差异(图 4:B)。

2.4 土壤碳组分的影响因素

如图 5 所示,本研究所调查的 3 类环境因子(土壤理化性质、微生物性质和植物性质)的总叠加效应解释了 SOC 及其组分变异的 69.5%。其中,影响 SOC 及其组分的因素主要来自于土壤理化性质、微生物性质和植物性质三类因子之间的交互作用,解释了其变化的 55.0%(图 5:g);其次是土壤理化性质和微生物性质两类因子之间的交互作用(12.6%)(图 5:d);而微生物性质和植物性质两类因子之间的交换作用对 SOC 及其组分变化的解释率较小(1.4%)(图 5:e)。植物性质的独立效应解释了 7.8%的 SOC 及其组分变化(图 5:c),

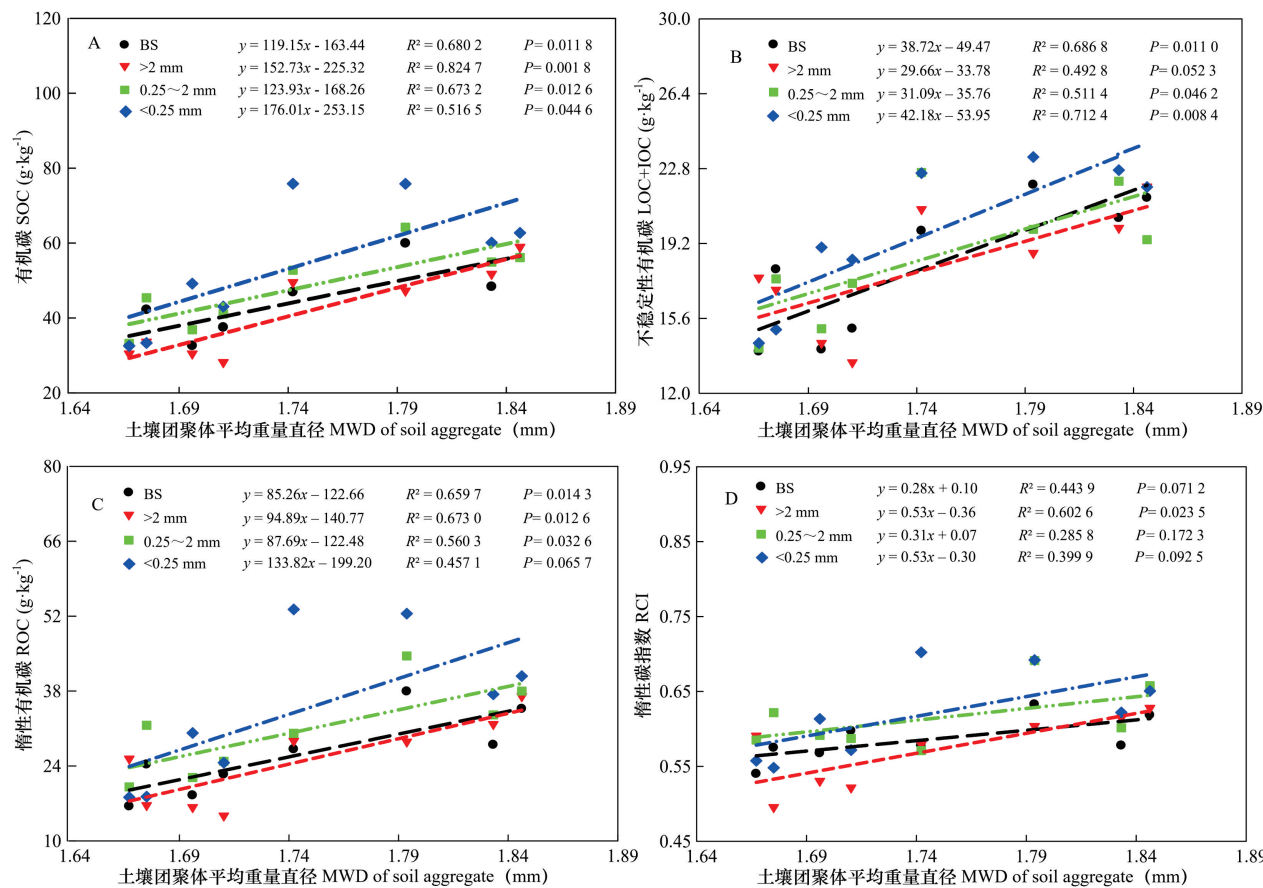


图 2 PP 和 CP 原土和土壤团聚体 SOC、(LOC+IOC)、ROC、RCI 与土壤平均重量直径(MWD)之间的关系
Fig. 2 Relationship between SOC, (LOC+IOC), ROC, RCI and MWD in PP and CP bulk soils and soil aggregates

而单独的土壤理化性质、微生物性质以及土壤理化性质和微生物性质两类因子之间的交互作用没有对 SOC 及其组分变化产生影响(图 5:a, b, f)。

在所调查的土壤理化性质、微生物性质和植物性质因子 3 类环境因子中,先通过 RDA 程序对其单一环境因子进行蒙特卡洛检验预选后得到 17 个环境因子与 SOC 及其组分显著相关并被选入作为模型分析的环境变量,再通过 RDA 排序确定 C/N_{LF} 和 TN 是驱动马尾松人工林 SOC 及其组分发生变化的最主要环境因子 ($P<0.05$) (图 6)。

3 讨论

对森林 SOC 的起源及其组分的探索,将有助于确保森林 SOC 能够成为减缓全球大气 CO_2 快速上升的一个可靠的碳汇。土壤中的 SOC 主要来源于植物的光合作用,地表凋落物、根系及根系分泌

物等的合成转化,因此,地上和地下有机碳输入的数量和质量将影响 SOC 的储量和稳定性(Huang et al.,2017)。Wang 等(2018)研究发现马尾松与红锥混交种植可加速顽固针叶凋落物的分解,减少不稳定阔叶凋落物的碳排放,从而有效促进碳固存;而卢立华等(2019)的研究结果表明马尾松与红锥混交种植可显著提升生态系统碳储量(乔木层、地被层和土壤层的碳储量之和);此外,还有研究表明,马尾松经复层混交套种两种乡土阔叶树种后均能促进林分空间结构的优化,可明显提升林分的生物量和植被的固碳能力(刘志龙等,2017;明安刚等,2017)。在本研究中,马尾松纯林经间伐后套种乡土阔叶树种的复层混交后,SOC 在原土和各个粒径土壤团聚体中均显著提高,这与 Schütz 等(2011)的研究结果基本一致,经复层混交后林分的凋落物产量和细根生物量均显著提高,为 SOC 的积累提供了丰富的有机物输入源,有

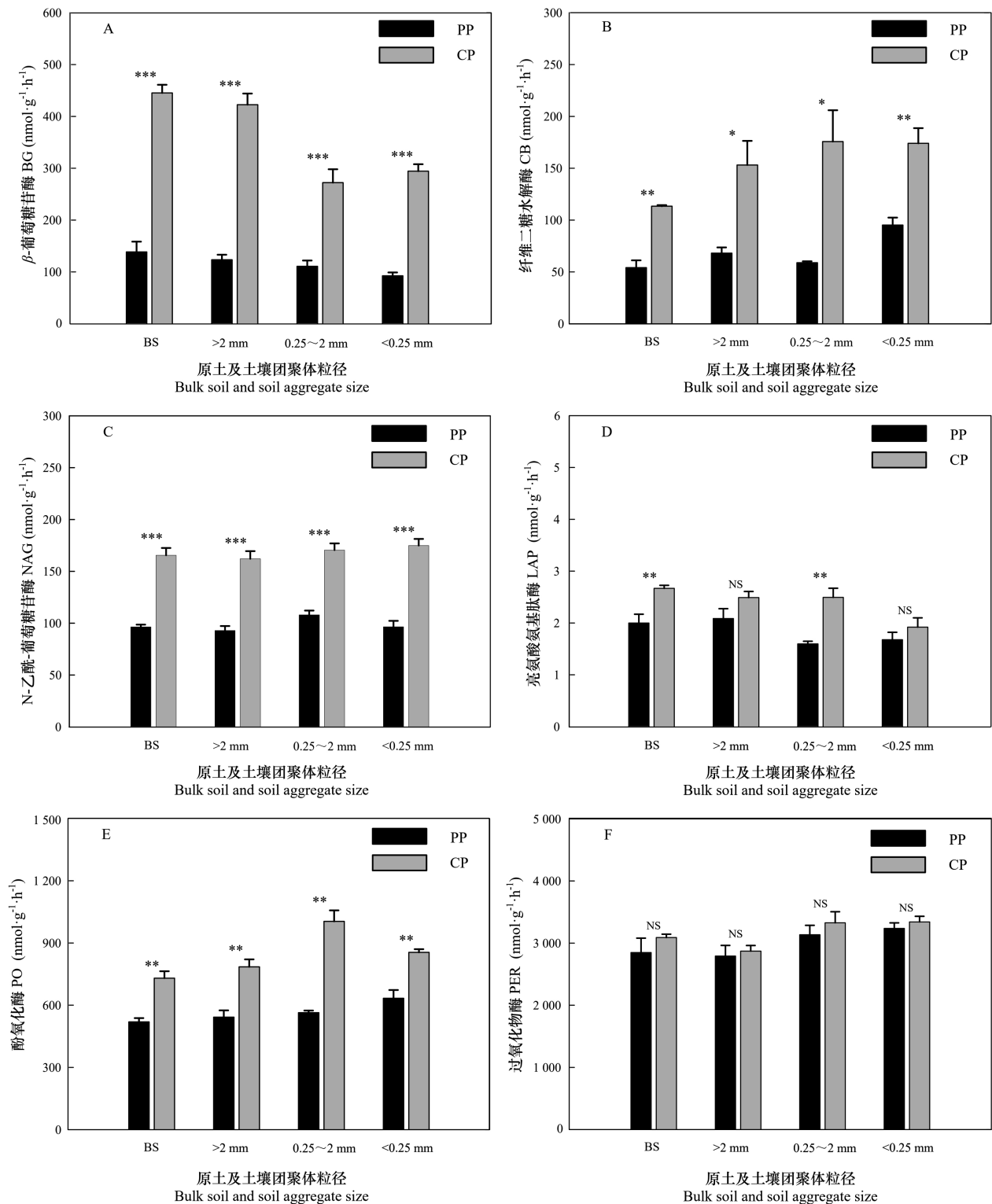


图 3 PP 和 CP 原土和不同粒径土壤团聚体的土壤酶活性变化

Fig. 3 Changes of enzyme activities in PP and CP bulk soils and soil aggregates with different particle sizes

效提高 SOC 含量。根据 SOC 的稳定性差异及其在土壤中周转速率的快慢,可将其划分为活性碳组分(LOC 和 IOC)和惰性碳组分(ROC)两大类。在森林生态系统中,活性碳对维持其土壤肥力和碳

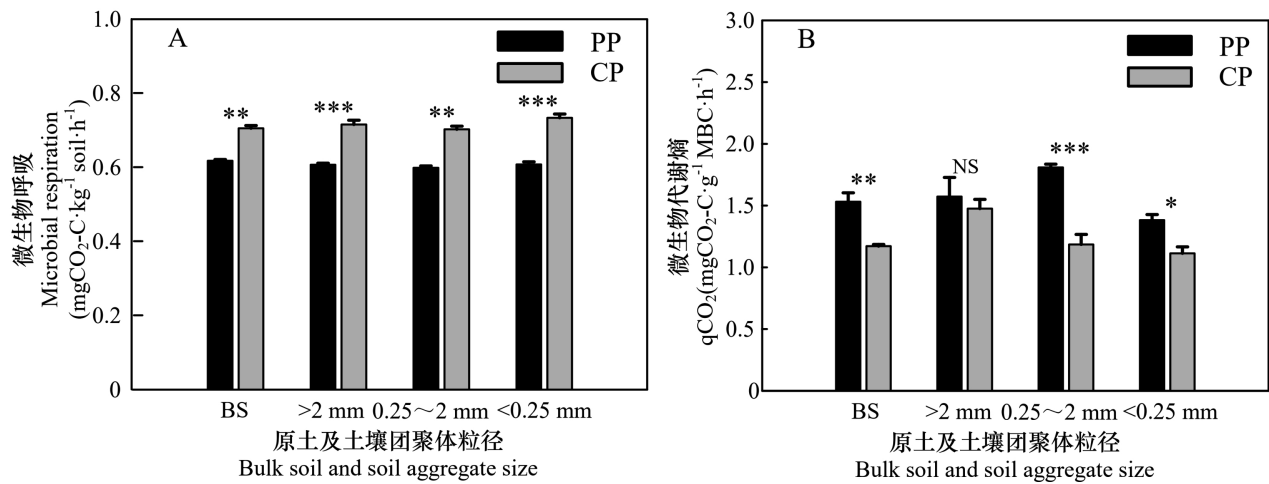


图 4 PP 和 CP 原土和不同粒径土壤团聚体微生物呼吸 (MR) 和微生物代谢熵 ($q\text{CO}_2$) 的变化

Fig. 4 Changes of microbial respiration and microbial metabolic quotient ($q\text{CO}_2$) in PP and CP bulk soils and soil aggregates with different particle sizes

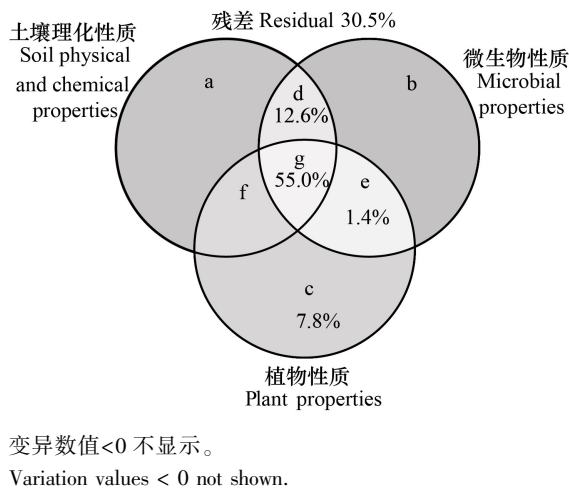


图 5 方差分解分析土壤理化性质、微生物性质、植物性质分别对 SOC 及其组分的纯效应 (a-c) 和交互效应 (d-g)

Fig. 5 Individual (a-c) and shared (d-g) effects of soil physical and chemical properties, microbial properties and plant characteristics on SOC content and its components as derived from variation partitioning analysis

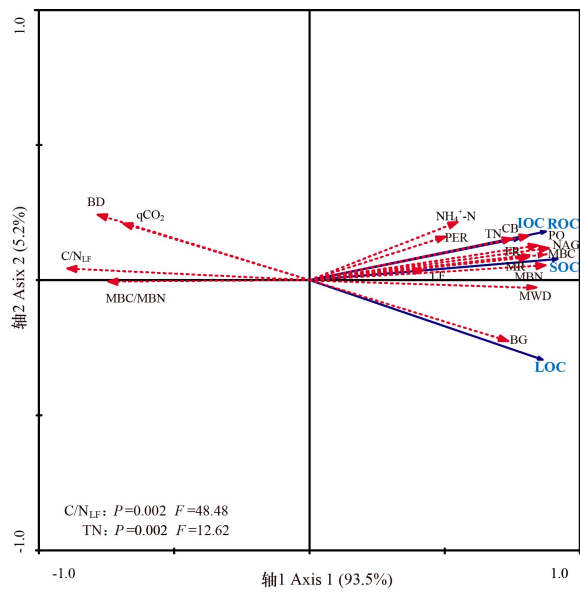


图 6 环境因子与 SOC 含量及其组分关系的冗余分析 (RDA)

Fig. 6 Redundancy analysis (RDA) of relationship between environmental factors and SOC content and its components

平衡具有重要的积极作用,而 ROC 有利于土壤 SOC 的积累和长期固持,在减缓全球气候变化中扮演重要角色 (Jandl et al., 2007; Kooch et al., 2019)。鲍勇等 (2018) 的研究发现, SOC 的组分特别是活性组分主要来源于新近的叶凋落物、根系分泌物、土壤腐殖质和微生物残体等;而根据 Fan

等 (2004) 和 Simpson 等 (2007) 的研究表明,不同植物凋落物的理化性质存在较大差异将影响其分解速率和进入土壤的化学组分,最终影响 SOC 及其组分。此外,越来越多的研究表明 MBC 不仅是形成 SOC 的最重要前体,还是形成 SOC 中复杂稳

定性组分的重要组成部分,输入土壤的有机物经微生物转化后将可能形成更加复杂的聚合物(Simpson et al., 2007; Miltner et al., 2012)。本研究结果印证了前人的研究观点,复层混交的近自然营林模式不但可改善林分结构,提高土壤肥力和生产力,而且可有效提高原土和不同径级土壤团聚体的 MBC、SOC 含量及其稳定性组分。

MWD 是评价团聚体稳定性高低的重要指标,而团聚体的稳定性又直接关系到土壤碳含量及其组分稳定性(Dungait et al., 2012)。有研究表明,团聚体储存着超过 90% 的土壤碳,其组成和稳定性与土壤碳固持和养分的有效性具有密切关系(Six et al., 2000; 钱婧等, 2018)。本研究发现,原土和大部分土壤团聚体中的 SOC 及其组分均与 MWD 呈显著或极显著正相关关系,而近自然化改造也显著促进了 MWD,这可能与近自然化经营提高 C 源输入在促进土壤团聚体形成的同时也增加了土壤 SOC 及其组分的积累有关。这与顾伟等(2007)的研究相似,认为随着土壤团聚体稳定性的提高,可以显著影响土壤中的不同类型碳组分含量,从而改变原有的碳固持甚至碳循环,并最终有效地改善土壤质量。

土壤胞外酶是森林土壤的重要组成部分,其大部分由土壤微生物代谢产生,只有少数一部分由土壤动物、根系分泌及其残体的分解释放。然而,一些胞外酶由特定的微生物类群分泌用于降解某些特定的化合物,不同的酶活性在参与土壤生物地球化学循环过程具有不同作用(Allison et al., 2010)。因此,林分结构、物种组成、凋落物数量和质量、根系及其分泌物等能够影响土壤微生物物种多样性和群落组成的环境要素均可能改变土壤酶活性,影响土壤碳的循环过程(You et al., 2014; Lucas-Borja & Delgado-Baquerizo, 2019)。本研究发现,马尾松纯林经复层混交后原土及各粒径团聚体中参与土壤碳和氮循环有关的酶活性(BG、CB、NAG 和 PO)均有显著提高,这可能与改造后近自然林的微生物生物量(采用 MBC 和 MBN 表征)显著提高有关,Brockett 等(2012)研究也发现土壤酶活性的提高与土壤微生物生物量增加密切相关。但是,PER 的活性在未改造的纯林和改造后的近自然林之间并未发生明显的变化,这与 Sinsabaugh 等(2008)的研究结论相似,发现 PER 的活性与土壤 SOC 无显著的相关性,而是随着 pH

的增加而呈现增加的趋势,而本研究的近自然林 SOC 虽有显著提高,但其 pH 值与未改造的马尾松纯林并无明显差异。此外,本研究中不同的土壤酶活性对团聚体粒径大小的响应无特定规律,这也暗示了土壤团聚体粒径大小对土壤酶活性的影响过程和机制仍较为复杂,尚需开展更加长期和科学的研究。

本研究通过方差分解分析得到所调查的 3 类环境因子(土壤理化性质、微生物性质和植物特性)的总叠加效应解释了 SOC 及其组分变化的 69.5%,这表明了所调查的环境因子能够解释土壤 SOC 及其组分的大部分变化,但也暗示一些未调查的因子(如:凋落物的木质素含量、土壤动物种类和土壤微生物多样性等)仍可能是驱动土壤 SOC 及其组分发生变化的重要因素(Prescott et al., 2010; Zhang et al., 2013)。本研究也发现了土壤 SOC 及其组分的大部分变化主要来自于土壤理化性质、微生物性质和植物特性三者之间交互作用的解释,而三者中的单独效应或两者之间的交互作用对土壤 SOC 及其组分变化的解释率较低甚至没有,这与 Schmidt 等(2011)的观点一致,认为土壤 SOC 的固持及其组分的形成主要取决于生物和非生物环境复杂的综合作用。而通过 RDA 进一步分析的结果揭示了马尾松近自然化改造后导致的凋落物碳氮比(C/N_{LF})和土壤 TN 的显著变化是驱动 SOC 及其组分发生改变的最主要因子。这与前人的研究结论一致,高的凋落物质量(低的 C/N)和土壤氮含量更有利于提高土壤碳的输入、土壤微生物生物量和土壤腐殖质的形成,更有利于土壤碳的积累和稳定性组分的形成,促使森林固持更多更稳定的 SOC(Prescott et al., 2010; Huang et al., 2017; Chen et al., 2018)。

4 结论

马尾松人工纯林经异龄复层混交改造后改变了林分结构,显著增加了凋落物产量和细根生物量,并显著提高了土壤团聚体的稳定性、MBC、MBN、MR、参与土壤碳和氮循环有关的酶活性(BG、CB、NAG 和 PO)、SOC 及其活性和惰性组分,但显著降低了 MBC/MBN 和 qCO_2 ;而几乎所有原土和土壤团聚体的 SOC、总活性有机碳、ROC 和 RCI 均与表征土壤团聚体稳定性的 MWD 呈显著

或极显著正相关关系。本研究揭示了近自然化经营后导致的林分 C/N_{lf} 和土壤 TN 的显著变化是驱动 SOC 及其组分发生改变的最关键因子,近自然化改造是一种有效提高低质低效马尾松人工林土壤团聚体稳定性,促使森林固持更多更稳定的 SOC 的经营管理措施。

参考文献:

- ALLISON SD, WEINTRAUB MN, GARTNER TB, et al., 2010. Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function [M]//Soil enzymology. Heidelberg: Springer: 229-243.
- BAO SD, 2000. Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press: 1-120. [鲍士旦, 2000. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社: 1-120.]
- BAO Y, GAO Y, ZENG XM, et al., 2018. Relationships between carbon and nitrogen contents and enzyme activities in soil of three typical subtropical forests in China [J]. Chin J Plant Ecol, 42(4): 508-516. [鲍勇, 高颖, 曾晓敏, 等, 2018. 中亚热带 3 种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系 [J]. 植物生态学报, 42(4): 508-516.]
- BOSSIO DA, COOK-PATTON SC, ELLIS PW, et al., 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions [J]. Nat Sustain, 3(5): 391-398.
- BROCKETT BFT, PRESCOTT CE, GRAYSTON SJ, 2012. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada [J]. Soil Soil Biochem, 44(1): 9-20.
- CASTRO FILHO C, LOURENÇO A, GUIMARÃES MF et al., 2002. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil [J]. Soil Till Res, 65(1): 45-51.
- CHEN H, LI DJ, ZHAO J, et al., 2018. Effects of nitrogen addition on activities of soil nitrogen acquisition enzymes: A meta-analysis [J]. Agric Ecosyst Environ: 126-131.
- CHEN YK, TAN XM, LI M, et al., 2021. The effects of the mixture of the valuable nitrogen-fixing tree species *Dalbergia odorifera* and second-generation *Eucalyptus urophylla* on the structure and function of soil microbial community in subtropical China [J]. Guihaia, 41(9): 1476-1485. [陈永康, 谭许脉, 李萌, 等, 2021. 珍贵固氮树种降香黄檀与二代巨尾桉混交种植对土壤微生物群落结构和功能的影响 [J]. 广西植物, 41(9): 1476-1485.]
- DUNGAIT JAJ, HOPKINS DW, GREGORY AS, et al., 2012. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance [J]. Global Change Biol, 18(6): 1781-1796.
- FAN TWM, LANE AN, CHEKMENEV E, et al., 2004. Synthesis and physico-chemical properties of peptides in soil humic substances [J]. J Pept Res, 63(3): 253-264.
- FU LY, ZENG WS, TANG SZ, XIA ZS, et al., 2011. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales-A case study for masson pine in Southern China [J]. J For Sci, 41(7): 1547-1554.
- GU W, LI ZA, ZOU B, et al., 2007. Carbon sequestration in soils of rehabilitated plantations on severely eroded lands in tropical China [J]. J Trop Subtrop Bot, 15(5): 369-376. [顾伟, 李志安, 邹碧, 等, 2007. 华南热带人工林土壤有机碳含量及其稳定性特征 [J]. 热带亚热带植物学报, 15(5): 369-376.]
- GUO X, LUO Z, SUN OJ, 2021. Long-term litter type treatments alter soil carbon composition but not microbial carbon utilization in a mixed pine-oak forest [J]. Biogeochemistry, 152(2): 327-343.
- HUANG XM, LIU SR, YOU YM, et al., 2017. Microbial community and associated enzymes activity influence soil carbon chemical composition in *Eucalyptus urophylla* plantation with mixing N_2 -fixing species in subtropical China [J]. Plant Soil, 414(1-2): 199-212.
- JANDL R, LINDNER M, VESTERDAL L, et al., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? [J]. Geoderma, 137(3-4): 253-268.
- JIN H, SUN OJ, LIU J, 2010. Changes in soil microbial biomass and community structure with addition of contrasting types of plant litter in a semiarid grassland ecosystem [J]. J Plant Ecol, 3(3): 209-217.
- KOOCH Y, SANJI R, TABARI M, 2019. The effect of vegetation change in C and N contents in litter and soil organic fractions of a Northern Iran temperate forest [J]. Catena, 178: 32-39.
- LIANG Y, MING AG, HE YJ, et al., 2021. Structure and function of soil bacterial communities in the monoculture and mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* in southern subtropical China [J]. Chin J Appl Ecol, 32(3): 878-886. [梁艳, 明安刚, 何友均, 等, 2021. 南亚热带马尾松-红椎混交林及其纯林土壤细菌群落结构与功能 [J]. 应用生态学报, 32(3): 878-886.]
- LIU SR, YANG YJ, WANG H, 2018. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services [J]. Acta Ecol Sin, 38(1): 1-10. [刘世荣, 杨予静, 王晖, 2018. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营 [J]. 生态学报, 38(1): 1-10.]
- LIU ZL, MING AG, JIA HY, et al., 2017. Effects of close-to-nature transformation on structure characteristics of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 41(4): 101-107. [刘志龙, 明安刚, 贾宏炎, 等, 2017. 近自然化改造对桂南马尾松和杉木人工林结构特征的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 41(4): 101-107.]
- LU LH, GUO WF, CAI DX, et al., 2019. Study on carbon storage of monoculture and mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* [J]. J Cent S Univ For Technol, 39(7): 78-84. [卢立华, 郭文福, 蔡道雄, 等, 2019. 马尾松与红椎纯林及混交林生态系统碳储量研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 39(7): 78-84.]
- LU YC, GAN J, 2002. The development trend of forest management in the 21st century [J]. World For Res, 15

- (1): 1–11. [陆元昌, 甘敬, 2002. 21 世纪的森林经理发展动态 [J]. 世界林业研究, 15(1): 1–11.]
- LUCAS-BORJA ME, DELGADO-BAQUERIZO M, 2019. Plant diversity and soil stoichiometry regulates the changes in multifunctionality during pine temperate forest secondary succession [J]. *Sci Total Environ*, 697: 134204.
- MO XQ, XIAO N, TAN XM, et al., 2022. Effects of nitrogen-fixing tree species on soil aggregate-associated enzyme activities and ecoenzymatic stoichiometry in *Eucalyptus* plantation [J/OL]. Gujiaia, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.q.20211231.1215.002.html>. [莫雪青, 肖纳, 谭许脉, 等, 2022. 固氮树种对桉树人工林土壤团聚体酶活性及其化学计量比的影响 [J/OL]. 广西植物, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.q.20211231.1215.002.html>.]
- MILTNER A, BOMBACH P, SCHMIDT-BRÜCKEN B, et al., 2012. SOM genesis: microbial biomass as a significant source [J]. *Biogeochemistry*, 111(1): 41–55.
- MING AG, LIU SR, LI H, et al., 2017. Effects of close-to-nature transformation on biomass and its allocation in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 37(23): 7833–7842. [明安刚, 刘世荣, 李华, 等, 2017. 近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响 [J]. 生态学报, 37(23): 7833–7842.]
- MING AG, YANG YJ, LIU SR, et al., 2018. Effects of near natural forest management on soil greenhouse gas flux in *Pinus massoniana* (Lamb.) and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. Plantation [J]. *Forests*, 9(5): 229.
- MORADI M, MOHADJER MR, SEFIDI K, et al., 2012. Over-mature beech trees (*Fagus orientalis* Lipsky) and close-to-nature forestry in northern Iran [J]. *J For Res*, 23(2): 289–294.
- MOU YJ, SHAO JA, GUO Y et al., 2019. The outlook of researches on forest based health and wellness environment construction under the concept of near-nature management [J]. *For Econ*, 41(8): 49–55. [牟耀杰, 邵景安, 郭跃, 等, 2019. 近自然经营理念下森林康养环境营造研究展望 [J]. 林业经济, 41(8): 49–55.]
- PRESCOTT CE, 2010. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? [J]. *Biogeochemistry*, 101(1): 133–149.
- QIAN J, ZHANG LP, WANG WY, 2018. The relationship between soil aggregates and eroded sediments from sloping vegetated red soils of South China [J]. *Acta Ecol Sin*, 38(5): 1590–1599. [钱婧, 张丽萍, 王文艳, 2018. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性 [J]. 生态学报, 38(5): 1590–1599.]
- SAIYA-CORK KR, SINSABAUGH RL, ZAK DR, 2002. The effects of long-term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil [J]. *Soil Boil Biochem*, 34(9): 1309–1315.
- SATTLER T, BORCARD D, ARLETTAZ R, et al., 2010. Spider, bee, and bird communities in cities are shaped by environmental control and high stochasticity [J]. *Ecology*, 91(11): 3343–3353.
- SCHMIDT MWI, TORN MS, ABIVEN S, et al., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 478(7367): 49–56.
- SCHÜTZ JP, 2011. Development of close to nature forestry and the role of ProSilva Europe [J]. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*, 94: 39–42.
- SIMPSON AJ, SIMPSON MJ, SMITH E, et al., 2007. Microbially derived inputs to soil organic matter: are current estimates too low? [J]. *Environ Sci Technol*, 41(23): 8070–8076.
- SINSABAUGH RL, LAUBER CL, WEINTRAUB MN, et al., 2008. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale [J]. *Ecol Lett*, 11(11): 1252–1264.
- SIX J, ELLIOTT ET, PAUSTIAN K, 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Boil Biochem*, 32(14): 2099–2103.
- STEINAUER K, TILMAN D, WRAGG PD, et al., 2015. Plant diversity effects on soil microbial functions and enzymes are stronger than warming in a grassland experiment [J]. *Ecology*, 96(1): 99–112.
- SUN DJ, WEN YG, LUO YH, et al., 2015. Effect of close-to-nature management on species diversity in a *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *For Res*, 28(2): 202–208. [孙冬婧, 温远光, 罗应华, 等, 2015. 近自然化改造对杉木人工林物种多样性的影响 [J]. 林业科学研究, 28(2): 202–208.]
- VANCE ED, BROOKES PC, JENKINSON DS, 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Boil Biochem*, 19(6): 703–707.
- WANG H, LIU SR, WANG JX, et al., 2018. Mixed-species plantation with *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* accelerates C loss in recalcitrant coniferous litter but slows C loss in labile broadleaf litter in southern China [J]. *For Ecol Manag*, 422: 207–213.
- YANG YJ, LIU SR, CHEN L, et al., 2018. Responses of soil and aggregate-associated organic carbon mineralization to throughfall reduction in a *Pinus massoniana* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 29(6): 1779–1786. [杨予静, 刘世荣, 陈琳, 等, 2018. 马尾松人工林土壤和团聚体有机碳矿化对穿透雨减少的响应 [J]. 应用生态学报, 29(6): 1779–1786.]
- YOU YM, HUANG XM, ZHU HG, et al., 2018. Positive interactions between *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* species in the uneven-aged mixed plantations can produce more ecosystem carbon in subtropical China [J]. *For Ecol Manag*, 410: 193–200.
- YOU YM, WANG J, HUANG XM, et al., 2014. Relating microbial community structure to functioning in forest soil organic carbon transformation and turnover [J]. *Ecol Evol*, 4(5): 633–647.
- YOU YM, XU HC, WU XP, et al., 2020. Native broadleaf tree species stimulate topsoil nutrient transformation by changing microbial community composition and physiological function, but not biomass in subtropical plantations with low P status [J]. *For Ecol Manag*, 477: 118491.
- ZHANG W, HENDRIX PF, DAME LE, et al., 2013. Earthworms facilitate carbon sequestration through unequal amplification of carbon stabilization compared with mineralization [J]. *Nat Comm*, 4(1): 1–9.