

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.031

姜永孟, 苏浩浩, 陆宇明, 等. 针阔混交措施对红壤侵蚀区马尾松林土壤有机碳稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 323-331.

JIANG Yongmeng, SU Haohao, LU Yuming, et al. Effect of coniferous and broadleaf mixture measures on soil organic carbon stability of *Pinus massoniana* plantation in red soil erosion area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 323-331.

针阔混交措施对红壤侵蚀区马尾松林土壤有机碳稳定性的影响

姜永孟, 苏浩浩, 陆宇明, 邓 薇, 刘珏伶, 吕茂奎, 谢锦升

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

摘 要: [目的] 为了探究针阔混交改造措施对红壤侵蚀区恢复马尾松林土壤碳库稳定性的影响。[方法] 以福建长汀不同恢复年限(Y10、Y20、Y41)马尾松林(CF)和相对应的针阔改造林(MF)作为研究对象, 通过物理分组方法将土壤有机碳分为颗粒态有机碳(POC)和矿质结合态有机碳(MAOC), 分析林分改造过程对不同土壤剖面土壤有机碳组分的影响。[结果] (1) 相比于马尾松纯林, 混交林显著增加 MAOC 和 0—10 cm 土层 SOC、POC 含量, 并避免长期恢复马尾松林 MAOC 的消耗; (2) 林分改造显著降低 Y20-MF 中 10—20, 40—60 cm 土层及 Y41-MF 中 0—20 cm 土层 POC/SOC, 但显著增加 Y10-MF 中 20—60 cm 土层及 Y41-MF 中 0—10 cm 土层 MAOC/SOC; (3) 随着年限的增加, 混交林中 0—10 cm 土层 MAOC/SOC 持续增加, POC/SOC 显著降低, 而马尾松林则相反; (4) 线性拟合发现, POC、MAOC 均与 SOC 呈显著正相关, 但混交林土壤 SOC 增加更多依赖 MAOC 的增加, 而马尾松土壤 SOC 的增加更多的以非稳定性碳组分(POC)为主; (5) 冗余分析表明, DOC、TN、TP、NH₄⁺ 共同解释碳组分变化的 66.2%, 表明林分改造后土壤养分有效性的增加是混交林 MAOC 积累的关键。[结论] 亚热带红壤侵蚀区林分改造通过提升土壤养分有效性, 增加稳定碳库的积累从而避免长期恢复过程中土壤碳库流失。

关键词: 碳稳定性; 颗粒态有机碳; 矿质结合态有机碳; 针阔混交

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0323-09

Effect of Coniferous and Broadleaf Mixture Measures on Soil Organic Carbon Stability of *Pinus massoniana* Plantation in Red Soil Erosion Area

JIANG Yongmeng, SU Haohao, LU Yuming, DENG Wei, LIU Jueling, LÜ Maokui, XIE Jinsheng

(College of Geographical Science, Key Laboratory of Humid Subtropical Ec-Geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of coniferous and broadleaf mixture measures on the stability of soil carbon pools in *Pinus Massoniana* Plantation in red soil erosion areas. [Methods] In this study, we examined the impact of forest restoration on soil organic carbon fractions in the *Pinus massoniana* pure forest (CF) and *Pinus massoniana* and *Schima superba* mixed forest (MF) in Changting, Fujian Province. We analyzed soil profiles from different years (Y10, Y20, and Y41) by categorizing soil organic carbon into particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC). [Results] (1) Compared with CF, the contents of MAOC, SOC, and POC in the 0—10 cm soil layer in mixed forest significantly increased. The long-term stand mixing effectively avoided the depletion of MAOC in long-term restoration of pine forest. (2) POC/SOC in the 10—20 cm and 40—60 cm and 0—20 cm soil layers in Y20-MF and Y41-MF decreased significantly after coniferous and broadleaf mixture, but MAOC/SOC in the 20—60 cm and 0—10 cm soil layers in Y10-MF and Y41-MF increased significantly; (3) MAOC/SOC was observed in the 20—60 cm soil layer, while in Y41-MF, it was found in the 0—10 cm soil layer. Additionally, in mixed forests,

收稿日期: 2024-05-23

修回日期: 2024-06-11

录用日期: 2024-06-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-09-19

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(32030073); 国家自然科学基金面上项目(31870604)

第一作者: 姜永孟(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事退化地土壤碳固存过程研究。E-mail: ym_jiang123@163.com

通信作者: 吕茂奎(1986—), 男, 副研究员, 自然地理学/生态学硕士, 生态学博士后导师, 主要从事森林生态系统过程与全球变化及亚热带森林恢复过程中土壤有机质形成与稳定机制相关研究。E-mail: maokui.lyu@fjnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

MAOC/SOC in the 0—10 cm soil layer continued to increase with age, whereas POC/SOC decreased significantly. The opposite trend was observed in the masson pine forests. (4) Linear fitting revealed that POC and MAOC were both significantly and positively correlated with SOC, but the increase in SOC in mixed forest soils were more dependent on the increase in MAOC, whereas the masson pine forests soil was more dominated by the non-stable carbon component (POC); (5) Redundancy analysis indicated that DOC, TN, TP, and NH_4^+ collectively explained 66.2% of the variation in carbon fractions. This suggests that the enhancement of soil nutrient effectiveness following the forest conversion is crucial for MAOC accumulation in mixed forests. **[Conclusion]** This study demonstrates that forest conversion in subtropical red soil erosion areas could increase the accumulation of stabilized carbon pools by enhancing soil nutrient effectiveness. This process helps avoid the loss of soil carbon pools during long-term restoration efforts.

Keywords: carbon stability; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon; coniferous and broadleaf tree mixture

Received: 2024-05-23

Revised: 2024-06-11

Accepted: 2024-06-26

Online(www.cnki.net): 2024-09-19

土壤碳汇功能发挥是决定全球碳循环平衡的重要环节^[1]。森林恢复在重建退化土壤碳汇功能中扮演重要角色^[2-5],据估算^[2]全球尺度上约有 9 亿 hm^2 的潜在森林恢复区,潜在碳固定量超过 205 Gt ^[3]。然而,由于恢复森林生物多样性低、生态系统稳定性差、地力衰退和逆行演替现象突出^[4-5],恢复森林碳固存水平远低于其自然潜力^[2],并且随着林龄增加,恢复森林土壤固碳能力将进一步规律性下降^[4-5]。针阔混交改造可作为提升恢复森林生物多样性、生态系统服务能力的重要方式^[6-7]。相关研究^[6-8]表明,混交林中物种丰富度、资源丰度、生境多样性和资源利用率与纯林相比具有显著差异,例如,WARDLE 等^[9]研究发现,随着混交林树种叶片功能性状多样化水平的提高,凋落物混合效应显著增加植物对土壤的养分归还;温纯等^[7]也证实植物功能多样性的增加有助于提升林分生产力。混交林和纯林物种多样性的差异同样主导土壤微生物生态网络的分化及菌根-共生关系的改变^[10-15],因而,混交林和纯林土壤有机碳循环呈现出巨大差异^[11,16],然而目前不同时间尺度上混交改造后土壤碳动态尚无统一论。

不同土壤碳组分稳定性差异是决定土壤循环过程的关键^[13-15]。根据土壤颗粒尺度的差异,土壤有机碳分为颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)^[16],不同碳组分外源碳输入变化和气候变化响应存在显著差异^[17-21]。其中,颗粒态有机碳的形成与地上凋落物输入和真菌、菌丝体作用密切相关^[19],并对环境变化高度敏感^[17],相比之下,矿物结合态有机碳更多地受到根系碳输入、微生物来源碳和土壤矿物的调控^[20-23],并具有较高的环境稳定性。然而,目前对不同时间尺度下混交改造对土壤有机碳稳定性影响如何,长时间尺度下混交改造林和原有林分

土壤碳稳定性特征等一系列问题仍有待探讨,严重制约着对混交改造后林下土壤碳动态的准确把握。基于此,本研究以亚热带侵蚀红壤区不同恢复年限马尾松林和针阔混交林作为研究对象,通过揭示长期混交过程中不同稳定性土壤有机碳组分的变化,探讨林分改造对侵蚀红壤区碳固存的潜在影响,分析制约马尾松林土壤稳定性碳积累的关键环节,以期科学提升退化红壤区马尾松碳固存提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处福建省长汀县($25^{\circ}33'—25^{\circ}48' \text{N}$, $116^{\circ}18'—116^{\circ}31' \text{E}$),位于亚热带季风气候区,年平均气温 $17.0 \sim 19.5^{\circ}\text{C}$,年无霜期 265 天,年降水量约 1 700 mm,其中,超过 50%集中于 4—6 月,年蒸发量约 1 400 mm。土壤类型为中粗粒花岗岩发育形成的红壤,抗蚀抗冲性差、稳定性弱,极易发生侵蚀,加之其他自然因素及人为因素综合作用,导致区域内发生严重的水土流失。区域地带性植被主要为壳斗科(*Fagaceae*)、樟科(*Lauraceae*)、山茶科(*Theaceae*)和蔷薇科(*Rosaceae*)等多种植物构成的亚热带常绿阔叶林,但由于人类活动及长期水土流失,原生植被基本消耗殆尽,现有植被类型主要以马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba* Gardner)人工林及其他经济林为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 于 2022 年 3 月在长汀县河田镇选取相似的 3 处不同恢复年限马尾松林和对应的混交林作为项目依托样地,分别为恢复 10 年-马尾松纯林/混交林(Y10-CF/MF)、恢复 20 年-马尾松纯林/混交林(Y20-CF/MF)、恢复 41 年-马尾松纯林/混交林(Y41-CF/MF),每个处理分别设置 4 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 标

准样方,共 24 个。所有样地土壤均为红壤,由中粗粒花岗岩发育形成的,坡度为 8°~15°。试验开始前对各样地基本概况进行调查,通过林业局相关资料获取各样地治理措施和林木生长状况,具体为:

Y10 位于来油坑地区,Y10-CF 为自然生长状态下的退化马尾松林,马尾松密度 1 741 株/hm²,平均树高 2.00 m,平均胸径 3.10 cm;Y10-MF 为 2012 年在退化马尾松林基础上,种植荷、枫香等阔叶树种形成的混交林,现阶段马尾松密度 1 982 株/hm²,平均胸径 10.91 cm,平均树高 9.80 m;木荷密度为 731 株/hm²,平均树高 6.16 m,平均胸径 6.70 cm;枫香密度为 524 株/hm²,平均树高 5.39 m,平均胸径 6.19 cm。

Y20 位于石壁下区域,Y20-CF 为 2002 年通过穴状整地和播种灌木相结合措施治理形成的马尾松林,现阶段马尾松密度 3 341 株/hm²,平均树高 7.00 m,平均胸径 7.40 cm;Y20-MF 是 2002 年在马尾松林中栽种木荷、枫香等阔叶树和林下灌木树种形成的混交林,现阶段马尾松密度 1 966 株/hm²,平均树高 9.32 m,平均胸径为 11.43 cm;枫香密度 672 株/hm²,平均树高 7.53 m,平均胸径 7.31 cm;木荷密度 406 株/hm²,平均树高 6.49 m,平均胸径 5.24 cm。

Y41 位于八十里河区域,Y41-CF 治理于 1981 年,其后再未进行管理,马尾松退化比较严重,调查时马尾松密度 910 株/hm²,平均树高 6.63 m,平均胸径 10.84 cm;Y41-MF 为 1981 年进行林地植被恢复措施,实施乔灌草混合栽种修复,现阶段乔木主要为马尾松和木荷,马尾松密度 1 105 株/hm²,平均树高 14.60 m,平均胸径 13.74 cm;木荷密度为 439 株/hm²,平均树高 12.70 m,平均胸径 14.10 cm。

1.2.2 样品采集与试验分析 于 2022 年 3 月下旬进行土壤样品采集,利用内径 5 cm 土钻按照“S”形多点取样原则,对 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 土层土壤样品进行分层采集,每一标准样方内同一土层样品采集后充分混合成 1 个复合样品,标记后装入保温箱后带回实验室。然后去除砾石、细根及枯枝落叶等,并根据其目的进行过筛、风干、研磨等处理。同时,收集地表凋落物带回实验室,分类烘干测定凋落物叶碳氮比(表 1)。

采用碳氮元素分析仪(Elementar Vario MAX, 德国)测定土壤有机碳(SOC)和全氮(TN);土壤可溶性有机碳/氮(DOC/DON)利用去离子水浸提后,分别使用总有机碳分析仪(TOC-VCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan)和连续流动分析仪(Skalar San++, Holland)测定;土壤矿质氮(NH₄⁺、NO₃⁻)和土壤全磷(TP),分别采用 KCl 溶液提取和 HClO₄—H₂SO₄

消煮法提取后,用连续流动分析仪(Skala San++, Holland)测定。

表 1 地面凋落物碳氮质量分数

Table 1 Carbon and nitrogen content of ground litter

样地	凋落物	碳/(g·kg ⁻¹)	氮/(g·kg ⁻¹)	碳氮比
Y10-CF	马尾松	492.83±0.77a	5.58±1.16a	91.08±20.52b
	芒萁	341.32±2.41b	4.12±0.41a	82.80±0.63a
	马尾松	502.21±5.61a	5.77±0.23a	87.00±3.63b
Y10-MF	木荷	460.39±0.79a	9.12±1.36b	51.27±8.05a
	芒萁	357.12±4.12b	5.24±0.76a	68.15±1.52b
	马尾松	415.27±33.68b	2.61±0.42b	161.21±17.95a
Y20-CF	芒萁	349.36±3.31b	4.20±0.76a	85.21±15.23a
	马尾松	458.79±22.90b	3.34±0.08b	137.38±10.24a
	木荷	436.84±16.41a	8.54±1.12b	51.92±7.79a
Y20-MF	芒萁	376.62±11.01b	5.95±1.14a	64.98±12.23b
	马尾松	521.13±33.65a	3.34±1.04b	164.32±37.44a
	芒萁	441.62±15.99a	5.87±1.46a	75.23±56.22a
Y41-CF	马尾松	485.37±23.21a	5.30±1.68a	96.54±20.82b
	木荷	478.00±7.08a	12.19±1.35a	39.80±5.25a
	芒萁	428.68±11.55a	6.97±1.38a	63.02±10.60b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一树种不同样地之间存在显著差异($p<0.05$)。

土壤有机碳分组基于物理分组方法^[24]:称量过 2 mm 筛风干土样 30.0 g 放于 250 mL 的振荡瓶中,加入 150 mL 新鲜配制的 0.5% 的六偏磷酸钠溶液,置于振荡机中连续振荡 18 h。振荡完成后将悬浊液通过 53 μm 的土壤筛进行手动筛分,其中留在 53 μm 筛上的为土壤颗粒有机质(particulate organic matter, POM),而通过 53 μm 筛的部分属于土壤矿物结合有机质(mineral-associated organic matter, MAOM)。将 2 个组分在 40 °C 烘箱中烘干至恒重,分别称重,计算 2 个组分的比重。分组烘干的土壤研磨过 100 目筛,用于测定 2 个组分中土壤有机碳(SOC)和总氮(TN),并分别计算颗粒态有机碳(POC)和矿质结合态有机碳(MAOC)。

1.3 数据分析

本研究所有初始数据均在 Excel 2020 软件进行初步处理,采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,采用配对样本 *T* 检验和多因素方差分析方法,分析不同处理间土壤环境因子、不同碳组分的差异,并用最小显著差异法(LSD)进行显著性比较;用 Pearson 相关性分析环境因子与不同碳组分之间的相关性;使用冗余分析探讨环境因子对土壤碳库稳定的影响。所有的图标绘制均通过 Origin 2021 和 Canoco 5.0 软件实现。

2 结果与分析

2.1 针阔混交对土壤理化性质的影响

从表 2 可以看出,针阔混交对土壤理化性质具有

显著影响。与马尾松林相比,针阔混交后 Y10-MF 样地 0—40 cm 土层和 Y41-MF 样地 0—10 cm 土层 pH 显著降低($p<0.05$),Y10-CF 和 Y41-CF 样地 SOC 在混交改造后显著增加 0.15~11.13 g/kg($p<0.05$),而 Y20-CF 与 Y20-MF 样地 pH、SOC 无显著差异($p>$

0.05)。同时,针阔混交显著增加 Y10-MF 和 Y41-MF 样地 0—40 cm 土层 TN 和 Y10-MF 样地 TP($p<0.05$),但对各土层 DON、 NH_4^+ 、 NO_3^- 没有显著影响($p>0.05$)。针阔混交改造后 Y41-MF 0—10,20—40 cm 土层 DOC 较 Y41-CF 显著增加($p<0.05$)。

表 2 土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties

样地	土层 深度/cm	pH	SOC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	DOC/ (mg·kg ⁻¹)	DON/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ / (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ / (mg·kg ⁻¹)
Y10-CF	0—10	4.52±0.03Ac	9.77±0.83Ba	0.60±0.04Ba	0.04±0.01Ba	11.86±1.30Aa	1.61±0.17Aa	7.38±2.02Aa	0.05±0.02Aa
	10—20	4.60±0.04Ac	4.87±0.75Ab	0.41±0.06Ab	0.04±0.01Aa	6.34±0.70Ab	1.41±0.19Aa	4.45±1.87Aa	0.05±0.03Ba
	20—40	4.79±0.02Ab	2.38±0.28Ac	0.24±0.05Bb	0.03±0.01Ba	6.07±0.73Ab	1.24±0.05Aa	4.96±2.41Aa	0.05±0.03Aa
	40—60	4.93±0.17Aa	1.80±0.23Ac	0.23±0.06Ab	0.02±0.01Ba	6.24±0.79Ab	1.44±0.12Aa	3.90±1.88Aa	0.06±0.04Aa
Y10-MF	0—10	4.24±0.03Bc	19.13±2.12Aa	1.11±0.10Aa	0.11±0.01Aa	21.60±4.78Aa	1.17±0.24Aa	13.35±2.05Aa	0.06±0.02Aa
	10—20	4.37±0.05Bc	7.86±1.13Ab	0.58±0.07Ab	0.08±0.01Ab	6.99±2.632Ab	0.79±0.31Ba	8.52±0.81Ab	0.09±0.02Aa
	20—40	4.59±0.05Bb	3.78±0.29Ac	0.38±0.04Ab	0.06±0.01Ab	8.38±0.90Ab	1.34±0.28Aa	7.95±0.97Ab	0.21±0.08Aa
	40—60	4.75±0.07Aa	2.77±0.34Ac	0.35±0.02Ab	0.05±0.01Ab	6.12±1.52Ab	0.89±0.11Aa	7.10±0.72Ab	0.36±0.18Aa
Y20-CF	0—10	4.14±0.01Ad	20.49±2.09Aa	0.83±0.07Aa	0.06±0.01Aa	44.05±3.96Aa	2.00±0.22Aa	6.50±1.19Ba	0.11±0.01Aa
	10—20	4.35±0.04Ac	7.33±1.12Ab	0.47±0.06Ab	0.04±0.02Ab	13.96±0.92Ab	1.56±0.28Aa	6.26±0.93Aa	0.11±0.03Aa
	20—40	4.66±0.05Ab	3.13±0.25Abc	0.27±0.04Abc	0.03±0.01Ab	9.87±1.58Ab	1.51±0.25Aa	1.24±0.04Ab	0.24±0.07Aa
	40—60	4.87±0.05Aa	2.04±0.11Bc	0.18±0Bc	0.03±0.01Ab	7.44±1.96Ab	1.27±0.11Aa	1.60±0.40Ab	0.16±0.06Aa
Y20-MF	0—10	4.14±0.01Ac	23.76±2.09Aa	1.26±0.14Aa	0.11±0.02Aa	36.80±4.05Aa	1.94±0.30Aa	18.55±1.32Aa	0.11±0.02Aa
	10—20	4.47±0.09Ab	8.13±0.77Ab	0.55±0.06Ab	0.07±0.01Ab	14.00±1.14Ab	1.33±0.13Aa	6.42±1.00Ab	0.26±0.12Aa
	20—40	4.86±0.10Aa	4.00±0.44Ac	0.36±0.03Ac	0.06±0.01Ab	7.47±1.64Ab	1.24±0.06Aa	3.89±0.98Ab	0.20±0.08Aa
	40—60	5.01±0.08Aa	3.03±0.19Ac	0.38±0.02Ac	0.06±0.01Ab	6.64±1.17Ab	1.23±0.21Aa	4.21±0.12Ab	0.25±0.05Aa
Y41-CF	0—10	4.31±0.02Ac	11.36±1.67Ba	0.54±0.10Ba	0.07±0.02Aa	30.27±3.15Ba	1.71±0.33Aa	6.90±0.65Ba	0.02±0Aa
	10—20	4.52±0.08Ab	5.09±0.47Bb	0.31±0.03Bb	0.04±0.01Aa	13.28±2.01Ab	1.23±0.27Aa	7.08±0.40Aa	0.05±0.01Aa
	20—40	4.64±0.10Ab	2.16±0.22Bb	0.17±0.01Bb	0.04±0.02Aa	5.61±0.94Bb	1.23±0.17Aa	6.59±0.58Aa	0.02±0Aa
	40—60	4.84±0.11Aa	2.50±0.65Ab	0.21±0.03Ab	0.04±0.01Aa	5.42±1.59Ab	0.99±0.11Aa	6.85±0.18Aa	0.07±0.02Aa
Y41-MF	0—10	4.09±0.04Bb	22.49±2.65Aa	1.16±0.11Aa	0.11±0.01Aa	64.82±6.24Aa	2.63±0.23Aa	11.25±1.17Aa	0.27±0.11Aa
	10—20	4.26±0.05Aab	8.29±0.83Ab	0.49±0.02Ab	0.04±0.01Ac	14.42±0.68Ab	1.31±0.15Ab	6.30±0.54Ab	0.24±0.13Aa
	20—40	4.38±0.05Aa	4.60±0.44Abc	0.30±0.04Abc	0.08±0.01Ab	9.31±0.3 9Ab	1.05±0.19Ab	4.31±1.38Ab	0.11±0.04Aa
	40—60	4.53±0.04Aa	2.65±0.31Ac	0.21±0.04Ab	0.06±0.01Ab	7.61±1.40Ab	1.02±0.01Ab	3.02±0.69Ab	0.04±0.02Aa

注:表中数据为平均值±标准差;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($p<0.05$)。下同。

2.2 针阔混交对不同土壤碳组分质量占比的影响

从图 1 可以看出,不同林分土壤碳组分构成存在显著差异。Y10 样地 MAOM 质量占比(55.50%~65.47%)显著高于 POM(31.32%~40.18%),而 Y20,Y41 样地不同组分质量占比则相反。针阔混交后 Y20 样地和 Y41 中的 POM 质量占比显著降低 2.79%~18.45%,MAOM 组分质量占比显著增加 7.34%~17.62%,而针阔混交对 Y10 各组分质量占比无显著影响。除 Y20-MF 样地 POM 组分,其他各样地碳组分质量构成无显著土层差异($p>0.05$),且 POM 质量占比在马尾松林和混交林中均随林龄的增加而增加。

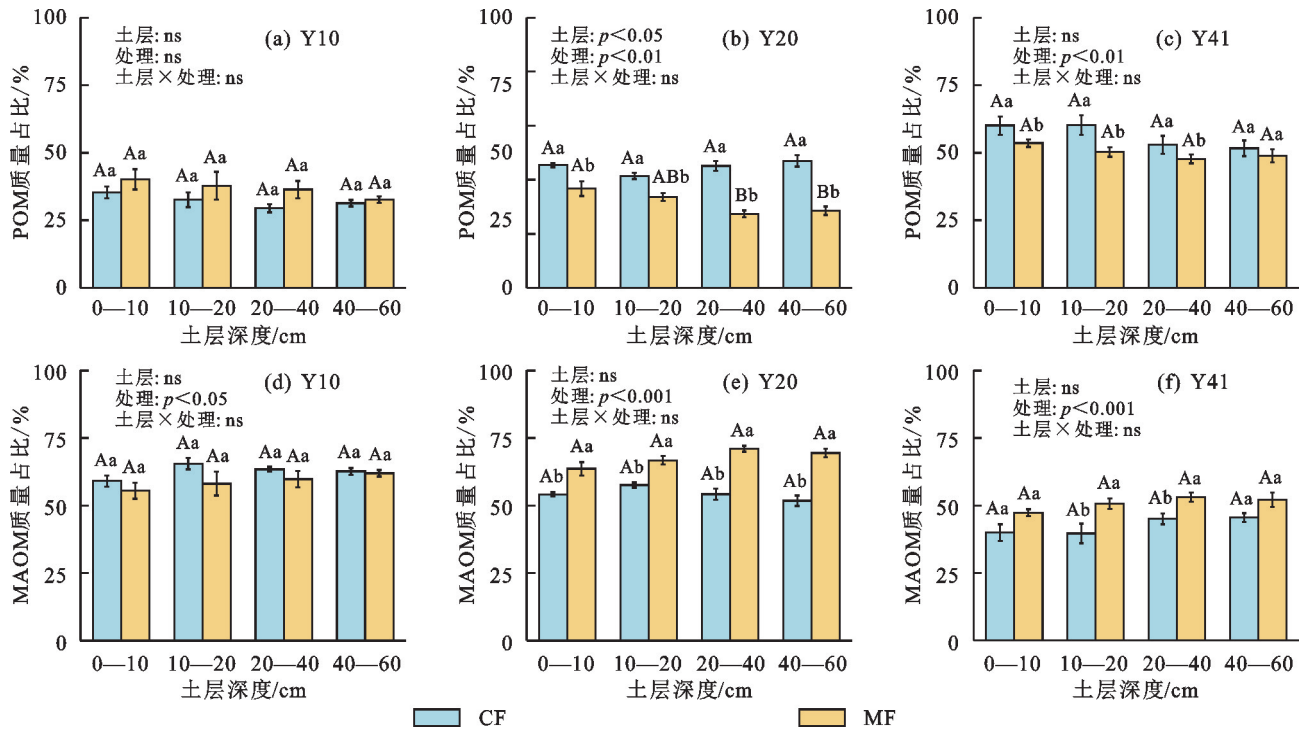
2.3 针阔混交对不同组分土壤有机碳和分配比例的影响

由图 2 可知,针阔混交后 0—10 cm 土层 POC 显

著增加 12.26%~90.16%。相比于 POC,MAOC 对林分管理措施的响应更敏感,针阔混交后 Y10-MF 样地 0—20 cm 土层 MAOC 显著增加 62.28%~79.36% ($p<0.05$),而 Y20-MF 和 Y41-MF 样地中 MAOC 分别增加 20.14%~65.65%和 50.34%~103.10% ($p<0.05$)。各样地 POC、MAOC 均随土层深度的增加而显著降低,而土层和针阔混交改造对 POC 和 MAOC 无交互作用。

进一步分析不同碳组分相对贡献(图 3)发现,MAOC 对 SOC 相对贡献达到 39.51%~74.82%,POC 对 SOC 的贡献为 24.57%~65.11%。针阔混交后 Y20-MF 样地 10—20,40—60 cm 土层和 Y41-MF 样地 0—20 cm 土层 POC/SOC 显著降低 2.22%~24.63% ($p<0.05$),而 Y10 样地 20—60 cm 土层和 Y41-MF 样地 0—10 cm 土

层 MAOC/SOC 显著增加 7.47%~9.70% ($p<0.05$)。与 Y10-CF 相比, Y41-CF 样地 0—20 cm 土层 POC/SOC 显著增加,但同一林分中不同恢复年限土壤 MAOC/SOC 无显著差异。



注:图中不同大写字母表示土层间差异显著,不同小写字母表示不同混交改造处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图1 不同林分中 POM、MAOM 组分质量占比

Fig.1 Proportion of POM and MAOM mass in different forest stands

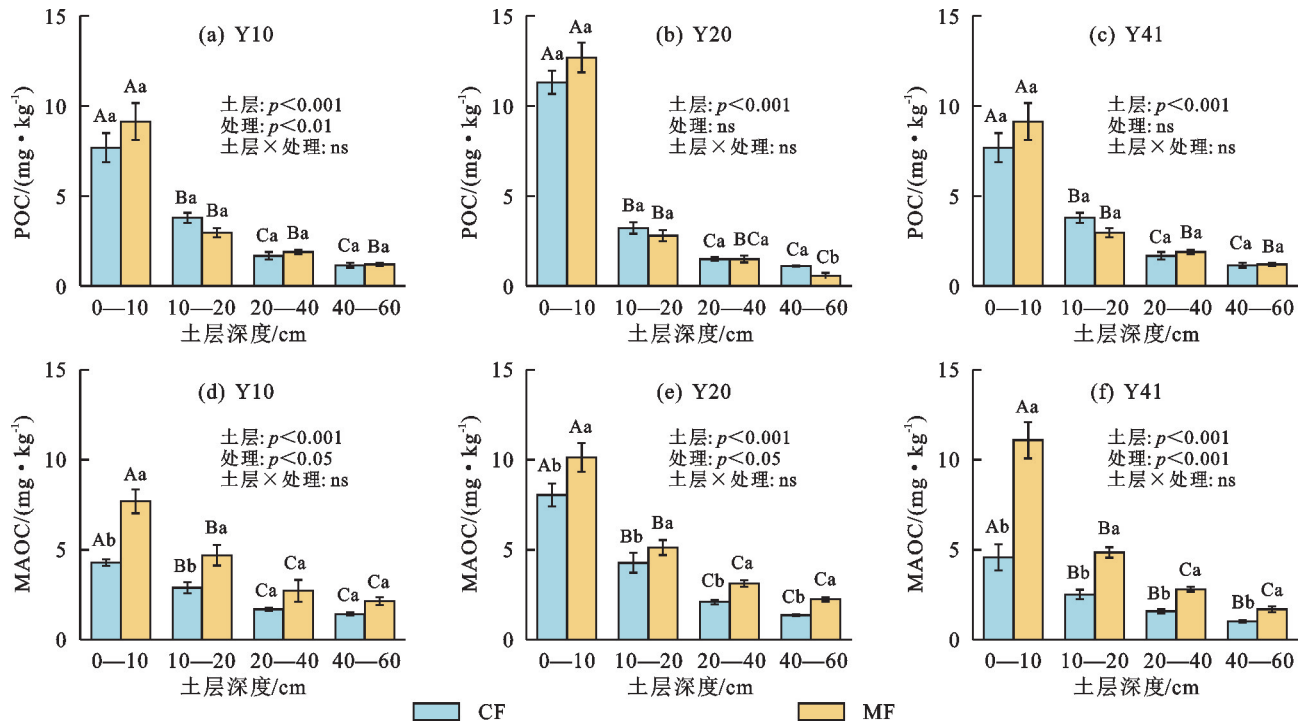


图2 不同林分中土壤碳组分差异

Fig.2 Differences in soil carbon fractions in different forest

2.4 不同组分土壤有机碳与环境因子的关系

对马尾松纯林和针阔混交林不同粒径土壤有机碳和 SOC 进行线性拟合(图 4)表明,2 种林分下 POC、MAOC 与 SOC 均呈显著正相关。在马尾松林,POC 与

SOC 之间的线性关系直线斜率为 0.56,高于混交林的 0.51,而 MAOC 与 SOC 之间的线性关系的直线斜率分别为 0.36,低于混交林的 0.39,表明在混交林中 SOC 的增加更多地以 MAOC 的形式在土壤中固存。

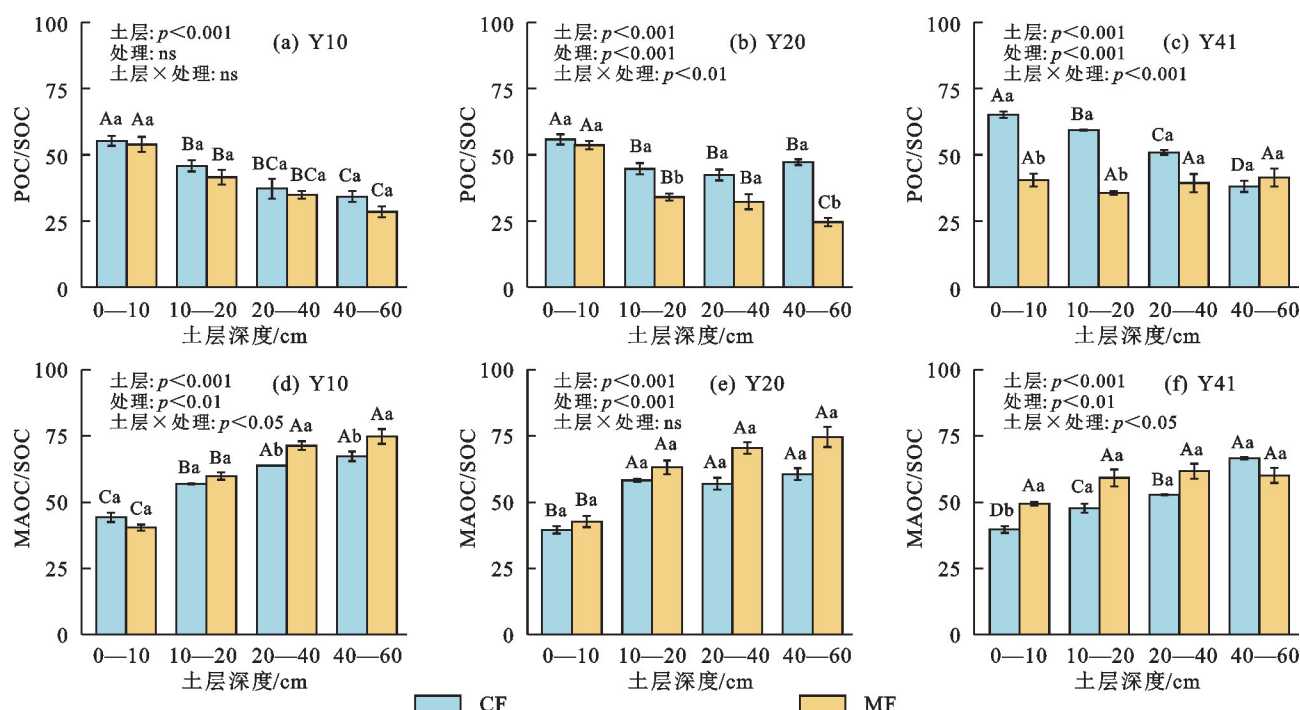


图 3 不同林分各土壤组分有机碳对土壤有机碳的贡献

Fig.3 Contributions of organic carbon from various soil fractions in different forest stands

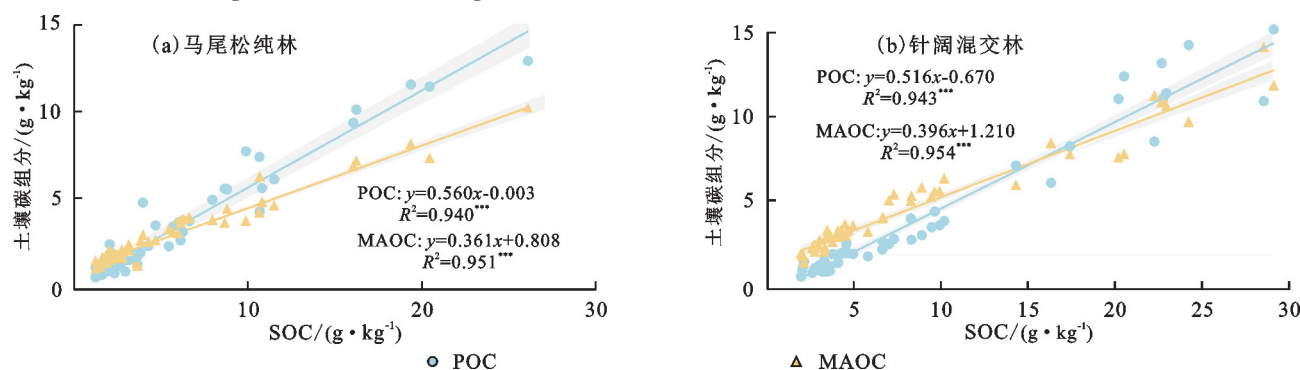


图 4 POC、MAOC 与 SOC 相关性

Fig.4 Correlation between POC、MAOC and SOC

以不同碳组分为响应变量,土壤理化因子作为解释因子,对马尾松纯林和混交林样地不同碳组分进行冗余分析(图 5)。环境变量共解释碳组分变化的 95.40%,其中第 1 轴能够解释碳组分变化的 81.95%,第 2 轴解释碳组分变化的 13.66%。其中,DOC、TN、TP、 NH_4^+ 影响 MAOC、POC 变化的主要因子,两轴 DOC、TN、TP、 NH_4^+ 共同解释不同碳组分变化的 66.20%。

3 讨论

3.1 针阔混交过程中土壤养分有效性的变化

林分有效性作为评价土壤生产力的关键指标,不同林分中植物源物质输入和微生物过程的差异调控土壤养分的积累,进而决定不同林分生产力的改变及对气候变化的潜在响应^[22,25]。本研究中,林分混交显著提升 Y10 和 Y41 样地 SOC、TN 质量分数、Y10 样地 TP 质量分数及 Y41 样地 DOC 质量分数(表 2),并且相比马尾松,混交林中 SOC 并未随着林龄的

增加而降低,表明混交林更有利于土壤养分长期积累,与相关研究^[10,26]结果一致,即森林混交显著提升土壤肥力,导致这种变化的原因主要与林分生产力和凋落物输入变化有关^[10,26]。基于相关研究 Meta 分析,焦秋燕^[10]研究发现,与纯林相比,混交林总生物量显著提升 21%,尤其是在针阔混交改造模式下。对此,相关学者^[27]研究表明,混交林生产力的提升与垂直空间结构分化有关。相比马尾松林,针阔混交林中,由于不同树种叶片结构和形态特征的差异,针阔混交林中生境多样性和资源多样性显著高于单一针叶林^[27],从而促进不同植物对垂直空间的充分利用和林分生产力的显著提高^[27]。黄超等^[26]研究表明,在马尾松林改造中,林下植物的生长、发育和扩散受到林下光照资源的影响,并在长时间的生物竞争中逐渐表现为物种种类、多度和空间分布格局的变化,最终影响林分生产力的变化。本研究发现,相比马尾松

纯林, Y10-MF 和 Y41-MF 样地中林分密度、树高、胸径均显著增加, 进而促进植物凋落物归还, 而植物碳源输入的变化特别是高质量凋落物输入^[18-19], 加快凋落物混合分解过程, 间接促进植物凋落物对土壤养分的归还过程^[9]。

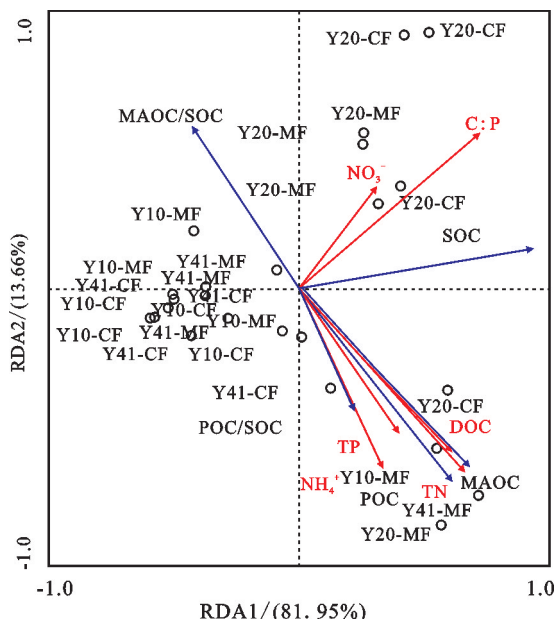


图5 不同土壤碳组分与土壤理化性质的冗余分析(RDA)

Fig.5 Redundancy analysis (RDA) of different soil carbon fractions with soil physical and chemical properties

高度养分异质性的凋落物混合物加速微生物群落生态网络的分化, 促进微生物群落功能的恢复^[12], 并促进异养型微生物的代谢过程, 从而加速微生物残体碳的形成过程^[19, 22-23], 进一步促进土壤养分有效性的提升(表2)。树种多样性的变化同样影响植物-菌根真菌的共生关系^[13-14], NGUYEN 等^[15]研究发现, 树种多样性的增加显著提升菌根真菌多样性, 从而加速外生菌根真菌对土壤有机氮的降解及菌根真菌的磷酸酶释放过程^[28], 影响土壤氮磷有效性和生态系统生产力, 而这一过程也可以解释林分改造后 Y10 和 Y41 样地土壤氮磷有效性的提升。本研究中混交措施对 Y20 样地土壤养分有效性影响较小, 与前期研究相似, 主要是与林分密度的变化有关。受马尾松林生长阶段影响^[29], 在这一阶段马尾松处于快速生长期, 养分供应充足, 同时, YANG 等^[30]研究指出, 相比于树种多样性变化, 植被数量对林分生产力的影响更重要。因此, 由于恢复 Y20-CF 样地马尾松密度更高, 混交改造对土壤有效性的提升远不如 Y10 和 Y41 样地显著(表2)。

3.2 针阔混交过程中不同稳定性碳组分的变化

土壤有机碳稳定性的变化决定土壤有机碳的长期固存^[13-16]。本研究发现, 与马尾松纯林相比, 0—10 cm 土层 POC 和 0—60 cm 土层 MAOC 在混交改造后显著

增加, 并且在持续的森林恢复过程中, 混交林 MAOC 随林龄的增加而增加, 而马尾松纯林中 MAOC 则在长期恢复过程中呈现下降趋势, 表明森林混交措施促进土壤稳定碳库的积累(图1)。进一步分析不同碳组分比例发现, 马尾松纯林 POC/SOC(34.22%~65.11%)显著高于同纬度其他林型^[30], 并且随森林恢复过程而持续增加, 而 POC 比例越高, 土壤有机碳稳定性越低, 矿化潜力越高, 更容易在微生物作用下分解矿化导致更强的碳排放^[16, 21]。因此, 在长期马尾松林恢复过程中 SOC 显著下降(表2), 可能与长期土壤侵蚀下土壤黏土矿物流失和有机碳浓度变化导致矿物吸附点位减少有关, 进而限制 MAOC 的形成^[20]。相比之下, 混交林中表层土壤 MAOC/SOC 显著增加, 并在长期恢复过程中持续增加, 从而增加表层土壤有机碳的物理保护, 减缓其矿化分解潜力^[16, 21], 因而更有利于土壤有机碳固持。

土壤养分有效性的变化是决定土壤碳库积累的关键因子^[22-23]。本研究中, 土壤 POC 和 MAOC 的积累与 TN、NH₄⁺、TP、DOC 密切相关(图5)。氮元素作为微生物代谢活动的关键元素, 在早期研究中, 由于恢复马尾松林土壤氮限制^[29], 土壤微生物通过“氮挖掘效应”分解更多 SOC 以获取充足氮元素^[20, 29], 导致外源碳输入后产生更强的激发效应^[29], 限制长期恢复马尾松林中土壤 POC 和 MAOC 的积累(图2), 而在引入阔叶树种后, 高质量凋落物输入缓解土壤 N 限制(表1、表2), 从而减少土壤微生物对 SOC 的分解, 促进土壤中易变碳源物质向稳定性碳源转换。同时, 相关研究^[31]发现, 在表层土壤中地上凋落物主导 SOC 的形成, 地上凋落物输入的增加直接促进 POC 的形成, 因而, 林分混交后不同质量凋落物混合加速凋落物分解过程^[9], 从而促进 POC 形成, 并且来源于凋落物的低分子量碳底物淋溶析出^[23], 在土壤中直接被土壤矿物吸附直接参与形成 MAOC。相比于低质量凋落物, 微生物对高质量凋落物具有更高的分解和转化速率, 而来源于植物凋落物 DOC 析出进一步促进“微生物碳泵效应”主导 MAOC 的形成过程^[22-23]。

4 结论

(1) 针阔混交显著增加 Y10-MF 和 Y41-MF 样地土壤养分有效性, 但对 Y20-MF 样地土壤养分有效性提升无显著影响, 表明针阔混交对土壤养分有效性的影响与树种生长阶段有关。

(2) 与马尾松纯林相比, 针阔混交显著增加土壤 POC、MAOC, 并在长期恢复过程中降低表层土壤 POC/SOC, 增加 MOC/SOC, 并扭转长期恢复马尾松林土壤有机质退化现象, 表明林分混交更有利于退化红壤区稳定有机碳的长期积累。

(3) TN、NH₄⁺、DOC 和 TP 是决定 MAOC 和

POC 积累的主要因子,而针阔混交改造后林分生产力增加对土壤养分有效性的提升是促进退化红壤区有机碳稳定性提高的关键。因此,在红壤侵蚀区针阔树种混交可以作为提升马尾松林土壤碳固存和马尾松固碳效益的有效方式。

参考文献:

- [1] PIERRE F, JONES M W, MICHAEL O, et al. Global carbon budget 2021 [J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(4): 1917-2005.
- [2] MO L D, ZOHNER C M, REICH P B, et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential[J]. *Nature*, 2023, 624(7990): 92-101.
- [3] BASTIN J F, FINEGOLD Y, GARCIA C, et al. The global tree restoration potential[J]. *Science*, 2019, 365(6448): 76-79.
- [4] FANG J Y, YU G R, LIU L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [5] CAI W X, HE N P, LI M X, et al. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: Spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(8): 836-843.
- [6] BRISTOW M, VANCLAY J K, BROOKS L, et al. Growth and species interactions of *Eucalyptus pellita* in a mixed and monoculture plantation in the humid tropics of North Queensland[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(2/3): 285-294.
- [7] 温纯, 金光泽. 功能多样性对典型阔叶红松林生产力的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(2): 94-106.
WEN C, JIN G Z. Effects of functional diversity on productivity in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(2): 94-106.
- [8] XIE H T, TANG Y, YU M K, et al. The effects of afforestation tree species mixing on soil organic carbon stock, nutrients accumulation, and understory vegetation diversity on reclaimed coastal lands in Eastern China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01478.
- [9] WARDLE D A, JONSSON M, BANSAL S, et al. Linking vegetation change, carbon sequestration and biodiversity: Insights from island ecosystems in a long-term natural experiment[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(1): 16-30.
- [10] 焦秋燕. 中国混交林与纯林生物量差异的整合分析[D]. 北京: 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), 2022.
JIAO Q Y. Biomass difference between mixed forests and pure forests in China: A meta-analysis[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [11] BLAŠKO R, FORSMARK B, GUNDALE M J, et al. Impacts of tree species identity and species mixing on ecosystem carbon and nitrogen stocks in a boreal forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 458: e117783.
- [12] CHAPMAN S K, NEWMAN G S. Biodiversity at the plant-soil interface: Microbial abundance and community structure respond to litter mixing [J]. *Oecologia*, 2010, 162(3): 763-769.
- [13] SCHROEDER J W, MARTIN J T, ANGULO D F, et al. Host plant phylogeny and abundance predict root-associated fungal community composition and diversity of mutualists and pathogens [J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(4): 1557-1566.
- [14] WANG Z H, JIANG Y, DEANE D C, et al. Effects of host phylogeny, habitat and spatial proximity on host specificity and diversity of pathogenic and mycorrhizal fungi in a subtropical forest[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(1): 462-474.
- [15] NGUYEN N H, WILLIAMS L J, VINCENT J B, et al. Ectomycorrhizal fungal diversity and saprotrophic fungal diversity are linked to different tree community attributes in a field-based tree experiment[J]. *Molecular Ecology*, 2016, 25(16): 4032-4046.
- [16] LAVALLEE J M, SOONG J L, COTRUFO M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261-273.
- [17] GEORGIOU K, KOVEN C D, WIEDER W R, et al. Emergent temperature sensitivity of soil organic carbon driven by mineral associations[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17: 205-212.
- [18] LYU M K, XIE J S, GIARDINA C P, et al. Understory ferns alter soil carbon chemistry and increase carbon storage during reforestation with native pine on previously degraded sites[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 132: 80-92.
- [19] RIDGEWAY J R, MORRISSEY E M, BRZOSTEK E R. Plant litter traits control microbial decomposition and drive soil carbon stabilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 175: e108857.
- [20] WANG B R, HUANG Y M, LI N, et al. Initial soil formation by biocrusts: Nitrogen demand and clay protection control microbial necromass accrual and recycling [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 167: e108607.
- [21] ANGST G, NIEROP K G J, ANGST Š, et al. Abundance of lipids in differently sized aggregates depends on their chemical composition[J]. *Biogeochemistry*, 2018, 140(1): 111-125.
- [22] LIANG C, AMELUNG W, LEHMANN J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3578-3590.

- [23] SOKOL N W, SANDERMAN J, BRADFORD M A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 12-24.
- [24] COTRUFO M F, RANALLI M G, HADDIX M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 989-994.
- [25] ZHANG H L, DENG Q, HUI D F, et al. Recovery in soil carbon stock but reduction in carbon stabilization after 56-year forest restoration in degraded tropical lands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 441: 1-8.
- [26] 黄超, 魏虹, 吴科君, 等. 马尾松林向香樟林改造林下植物功能多样性研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4573-4584.
- HUANG C, WEI H, WU K J, et al. The functional diversity of understory plants during the transformation from *Pinus massoniana* to *Cinnamomum Camphora* forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4573-4584.
- [27] NONGHULOO I M, KHARBHIIH S, SUCHIANG B R, et al. Production, decomposition and nutrient contents of litter in subtropical broadleaved forest surpass those in coniferous forest, Meghalaya[J]. *Tropical Ecology*, 2020, 61(1): 5-12.
- [28] BERGKEMPER F, SCHÖLER A, ENGEL M, et al. Phosphorus depletion in forest soils shapes bacterial communities towards phosphorus recycling systems[J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(8): e2767.
- [29] 姜永孟, 邓翠, 吕茂奎, 等. 红壤侵蚀区马尾松林恢复过程中土壤异养呼吸及微生物多样性的变化特征[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1156-1168.
- JIANG Y M, DENG C, LYU M K, et al. Changes in soil heterotrophic respiration and its microbial diversity during restoration of *pinus massoniana* plantations in eroded red soil area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 1156-1168.
- [30] YANG Y S, GUO J F, CHEN G S, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 323(1): 153-162.
- [31] FENG J G, HE K Y, ZHANG Q F, et al. Changes in plant inputs alter soil carbon and microbial communities in forest ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(10): 3426-3440.
- (上接第 322 页)
- [37] 凡国华, 韩城, 孙永涛, 等. 长三角地区马尾松林降雨再分配特征[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(2): 422-428.
- FAN G H, HAN C, SUN Y T, et al. Rainfall redistribution in *Pinus massoniana* forest of Yangtze River Delta[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(2): 422-428.
- [38] 张雪. 祁连山东段典型灌丛降雨再分配特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- ZHANG X. Study on rainfall redistribution characteristics of typical shrubs in the eastern section of Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [39] 黄承标, 梁宏温. 广西亚热带主要林型的树干茎流[J]. *植物资源与环境*, 1994, 3(4): 10-17.
- HUANG C B, LIANG H W. Stemflow of main forest types in Guangxi Subtropics [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1994, 3(4): 10-17.
- [40] 李向富. 三峡库区不同林地降雨再分配过程研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2019.
- LI X F. Study on rainfall redistribution process of different woodlands in Three Gorges Reservoir Area [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2019.
- [41] 汪水前. 南方水土流失区马尾松对降雨再分配的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(2): 99-105.
- WANG S Q. Effects of *Pinus massoniana* in soil erosion area in South China on rainfall redistribution[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(2): 99-105.
- [42] 刘建立, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山叠叠沟小流域华北落叶松人工林的冠层降水再分配特征[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 76-81.
- LIU J L, WANG Y H, YU P T, et al. Characteristics of rainfall redistribution under the canopy of *Larix Principis-rupprechtii* forest in Diediegou watershed of Liupanshan Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 76-81.
- [43] 马昌坤. 黄土高原人工刺槐林地生态水文过程研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- MA C K. Study on the ecohydrological processes of black locust forest land on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [44] 张勇波, 谢江, 陈国云, 等. 西双版纳不同树龄橡胶林对降雨的再分配特征[J]. *热带生物学报*, 2022, 13(1): 57-63.
- ZHANG Y B, XIE J, CHEN G Y, et al. Characteristics of rainfall redistribution of rubber plantations at different ages in Xishuangbanna[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2022, 13(1): 57-63.
- [45] 田娜, 古君龙, 杨新国, 等. 中间锦鸡儿冠层降雨再分配特征[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(4): 854-862.
- TIAN N, GU J L, YANG X G, et al. Redistribution of rainfall in canopy of *Caragana intermedia* [J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 854-862.