浙 江 农 林 大 学 学 报，2024，**41**(6)：1189–1200
Journal of Zhejiang A&F University
doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20240264

采伐后植被自然恢复对马尾松次生林土壤有机碳及其活性组分的影响

胡　澳[1,2,3]，赵毅辉[1,2,3,4]，吴继来[5]，吴艳萍[1,2,3]，李同欣[1,2,3]，
严一博[1,2,3]，叶建丰[6]，王懿祥[1,2,3]

（1. 浙江农林大学 环境与资源学院，浙江 杭州 311300；2. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室，浙江 杭州 311300；3. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室，浙江 杭州 311300；4. 浙江农林大学 林业与生物技术学院，浙江 杭州 311300；5. 杭州市临安区农业农村局，浙江 杭州 311300；6. 杭州市临安区天目山林场，浙江 杭州 311311）

摘要：【目的】研究遭受松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 病危害的马尾松 *Pinus massoniana* 林土壤有机碳及其活性组分分布特征，揭示采伐后自然恢复对马尾松次生林土壤碳汇的影响机制，为有机碳库管理提供科学支撑。**【方法】**2023 年 3—6 月在浙江省杭州市余杭区与临安区，采用空间替代时间调查法，以未遭受危害的马尾松林为对照 (ck)，设置 4 种植被恢复类型：中度采伐恢复 5 a (ML_5)、中度采伐恢复 15 a (ML_{15})、重度采伐恢复 5 a (HL_5) 和重度采伐恢复 15 a (HL_{15})，比较不同采伐强度采伐后自然恢复下马尾松次生林各土层 (0~10、10~20、20~40 cm) 土壤有机碳、易氧化碳、颗粒有机碳、微生物生物量碳、水溶性有机碳的变化特征，分析其与土壤理化性质的关系，探究其机制。**【结果】**①各处理不同土层土壤有机碳及其活性组分质量分数从大到小依次均为土壤有机碳、易氧化碳、颗粒有机碳、微生物生物量碳、水溶性有机碳，且随着土层加深其质量分数相应降低，ML_{15} 的 0~10 cm 土层中土壤有机碳质量分数最高，为 33.53 $g\cdot kg^{-1}$，ck 的 20~40 cm 土层中水溶性有机碳质量分数最低，为 136.55 $mg\cdot kg^{-1}$。②相同采伐强度下的马尾松次生林土壤各活性有机碳质量分数均表现为随着其自然恢复年限增加而提高，其中各土层间颗粒有机碳质量分数变化最大，15 a 的各土层高于 5 a 各土层的 2.6 倍以上；③ML_{15} 的 0~10 cm 土层中各活性有机碳组分质量分数均表现为最高，且均显著高于 ck ($P<0.05$)；④相关性分析表明：土壤中各活性有机碳组分之间及其与硝态氮、铵态氮均呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。**【结论】**中度采伐对马尾松次生林土壤有机碳及其活性组分具有更显著的促进作用，随自然恢复时间越长越有利于土壤活性有机碳组分质量分数增加，适度采伐马尾松纯林并让其自然恢复可促进土壤碳库积累。图 3 表 3 参 46

关键词：土壤有机碳；马尾松次生林；采伐；植被自然恢复；松材线虫病
中图分类号：S714.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2024)06-1189-12

Effects of natural vegetation restoration after logging on soil organic carbon and its active components in *Pinus massoniana* secondary forests

HU Ao[1,2,3], ZHAO Yihui[1,2,3,4], WU Jilai[5], WU Yanping[1,2,3], LI Tongxin[1,2,3],
YAN Yibo[1,2,3], YE Jianfeng[6], WANG Yixiang[1,2,3]

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 4. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University,

---

收稿日期：2024-03-26；修回日期：2024-07-09
基金项目：国家重点研发计划项目 (2022YFD2200504)
作者简介：胡澳 (ORCID: 0009-0006-6465-6297)，从事林业碳汇、森林经营管理研究。E-mail: huaowx95@163.com。通信作者：王懿祥 (ORCID: 0000-0003-0642-195X)，教授，博士，博士生导师，从事森林多功能经营和森林生态学等研究。E-mail: wangyixiang@zafu.edu.cn

Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 5. Agriculture and Rural Bureau of Lin' an District, Hangzhou City, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 6. Mount Tianmu Forest Farm of Lin' an District, Hangzhou City, Hangzhou 311311, Zhejiang, China)

Abstract: [**Objective**] The objective is to study the distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) and its active components in *Pinus massoniana* forest affected by pine wilt disease, so as to reveal the influence mechanism of natural vegetation restoration after logging on soil carbon sink in *P. massoniana* secondary forest and provide scientific support for organic carbon pool management. [**Method**] From March to June 2023, in Yuhang District and Lin' an District of Hangzhou City, the undamaged *P. massoniana* forest was used as the control (ck), four vegetation restoration types were set up by using the space substitution time survey method: moderate logging restoration for 5 a (ML_5), moderate logging restoration for 15 a (ML_{15}), heavy logging restoration for 5 a (HL_5) and heavy logging restoration for 15 a (HL_{15}) to compare the variation characteristics of SOC, readily oxidizable carbon (ROC), particulate organic carbon (POC), microbial biomass carbon (MBC) and water-soluble organic carbon (WSOC) in different soil layers (0−10, 10−20, 20−40 cm) of *P. massoniana* secondary forest under natural recovery after different logging intensities, and their relationship with soil physicochemical properties was analyzed to explore their mechanisms. [**Result**] (1) The content of SOC and its active components in each soil layer ranking from high to low were SOC, ROC, POC, MBC and WSOC, and the content decreased accordingly with the deepening of soil layer. The highest SOC content was 33.53 $g \cdot kg^{-1}$ in 0−10 cm soil layer of ML_{15}, and the lowest WSOC content was 136.55 $mg \cdot kg^{-1}$ in 20−40 cm soil layer of ck. (2) Under the same logging intensity, the content of active organic carbon in soil of *P. massoniana* secondary forest increased with the increase of natural recovery years, among which the content of POC in each soil layer changed the most, and the content of POC in each soil layer of 15 a was over 2.6 times higher than that in each soil layer of 5 a. (3) The content of active organic carbon component in 0−10 cm soil layer of ML_{15} was the highest, and was significantly higher than that in ck ($P<0.05$). (4) The results of correlation analysis showed that there were significant positive correlations among active organic carbon components in soil and between active organic carbon components and NO_3^--N and NH_4^+-N ($P<0.05$). [**Conclusion**] Moderate logging has a significant promoting effect on SOC and its active components in *P. massoniana* secondary forest. The longer the natural recovery time of vegetation, the more favorable it is to increase the content of soil active organic carbon components. Moderate logging of *P. massoniana* pure forests and their natural recovery can promote soil carbon pool accumulation. [Ch, 3 fig. 3 tab. 46 ref.]

Key words: soil organic carbon; *Pinus massoniana* secondary forest; logging; natural restoration of vegetation; pine wilt disease

森林是陆地生态系统的重要组分部分，土壤有机碳 (SOC) 储量远高于植被和大气总碳，是全球生态系统碳循环中的活跃碳库，对维持全球碳平衡发挥着不可忽视的作用[1]。全球森林土壤有机碳的微小变化亦会对大气二氧化碳 (CO_2) 变化产生实质影响[2]。根据有机碳的稳定性和分解速率差异可将土壤有机碳分为惰性有机碳、缓效性有机碳和活性有机碳[3]。土壤活性有机碳如易氧化碳 (ROC)、颗粒有机碳 (POC) 等，具有活跃性较高、易被微生物氧化和分解、移动快等特点[4]，能显著影响土壤中化学物质的溶解、吸附、吸收、解吸、迁移等，对植物养分供应有最直接的作用[5]。活性有机碳库中，微生物生物量碳 (MBC) 等对土壤管理、森林经营措施的响应更敏感，是土壤质量的重要指示指标[6]。森林生态系统复杂性高，不同森林类型及同一类型中的不同树种组成、不同演替阶段的土壤有机碳及其活性组分特征亦有明显差异，同时也存在同一林分土壤有机碳随土层深度增加有效性降低的规律[7]。值得注意的是土壤有机碳各组分间能够相互转化，不同组分间又共同调控土壤碳库平衡、碳循环过程，影响和指示森林

土壤质量[8]。因此，厘清同一优势树种下不同演替阶段林分或管理措施对森林土壤有机碳活性组分分布积累的影响及其内在机制，对于准确评估土壤质量及碳库动态变化具有重要意义。

松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 病是一种主要危害马尾松 *Pinus massoniana* 林分的毁灭性森林病害。中国感染该病的松林面积已超过 180 万hm²[9]。马尾松林为南方低山丘陵区群落演替的主要先锋林分，浙江省的松林面积约占全省森林总面积的 54.87%。2023 年浙江省秋季普查发现：已遭受松材线虫病危害的松林面积约 28.72 万hm²，病死木达 153.2 万株[10−11]。当前松材线虫病病害林分的主要清理方式为卫生伐疫木，采伐后出现的林窗空地则让其自然恢复形成马尾松次生林[12]。由于对不同病害程度马尾松林分采伐强度不一致，所以不同采伐强度下自然恢复后的植被类型、组成及林分格局会有很大差异[13]。究其原因为不同采伐强度会导致不同大小的林木生长空间，缓解被伐疫木周围活立木对光照和养分的竞争[14]，且自然恢复还使林分中的物种组成发生变化，改善了土壤的理化性质和林分微环境[15]。MA 等[16] 和 DON 等[17] 研究表明：森林土壤中的碳循环对林业经营管理措施极为敏感，植被恢复能有效提高退化生态系统的土壤有机碳质量分数。然而，由于不同植被恢复措施下的林分物种种类、地上地下生物量、凋落物量均差异显著，因此其对土壤有机碳库的影响亦显著不同[18]，且适度采伐可提升森林的土壤有机碳质量分数[16]。因此，系统研究马尾松松材线虫病林分土壤活性有机碳对采伐强度、植被自然恢复的响应规律，有利于深入了解采伐及植被自然修复对土壤活性有机碳的影响以及与林分间的互作机制。

土壤活性有机碳主要由林分中鲜有机质与腐殖质间的过渡性物质分解而成，林分结构、土壤理化性质以及微环境的变化均会对土壤有机碳的空间变异产生影响，增加它的不稳定性，从而快速表征土壤的碳库变化。王晓荣等[19] 发现：抚育间伐 1 a 后，马尾松林土壤活性有机碳空间异质性增加，总有机碳与微生物生物量碳显著降低。翟凯燕等[20] 则发现：中度间伐 9 a 后的马尾松林土壤总有机碳、颗粒有机碳、易氧化有机碳质量分数提升，而重度间伐林分表现为下降。另有学者研究发现：不同植被恢复措施作用后土壤活性有机碳库出现以下 3 种情况：显著增加[21]、无显著变化[22]、有所减少[23]。可见，采伐调节林分密度对土壤有机碳的影响以及与林分间的互作机制[24]，以及植被恢复后不同演替阶段的森林土壤有机碳变化规律须进一步探索[25]。本研究以中度采伐、重度采伐等 2 种强度采伐后自然恢复 5、15 a 的马尾松松材线虫病次生林为研究对象，探讨其土壤有机碳及其活性组分的累积变化特征，旨在深入理解森林经营管理对马尾松次生林土壤有机碳及其活性组分的变异特性，探明采伐后自然恢复对土壤活性有机碳的长期效应，准确评估和调控松材线虫病危害后的马尾松次生林土壤碳库情况，为遭受松材线虫病危害的马尾松林经营管理提供科学依据。

1　研究区与方法

1.1　研究区概况

研究区位于亚热带地区的浙江省杭州市余杭区与临安区内 (29°56′14″~30°34′17″N，118°50′22″~120°20′21″E)。该地属亚热带季风气候，四季分明，海拔为 90~243 m，年平均气温为 15.4~18.4 ℃，平均相对湿度为 70%~81%，年降水量为 1 454.0~1 882.0 mm，年无霜期为 240.0 d，年日照时数为 1 352.0~1 765.0 h。

研究林分为马尾松健康林及遭受松材线虫病危害后的马尾松次生林。林分优势层以马尾松为主，另有木荷 *Schima superba*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、青冈 *Quercus glauca*、朴树 *Celtis sinensis*、樟树 *Camphora officinarum*、漆树 *Toxicodendron vernicifluum* 等树种。亚优势层主要有檵木 *Loropetalum chinense*、枫香 *Liquidambar formosana* 等。灌木层有赤楠 *Syzygium buxifolium*、山矾 *Symplocos sumuntia*、栀子 *Gardenia jasminoides*、小蜡 *Ligustrum sinense*、柃木 *Eurya japonica*、总序桂 *Phillyrea latifolia*、映山红 *Rhododendron simsii* 等。草本层有芒萁 *Dicranopteris pedata*、狗脊 *Woodwardia japonica*、红盖鳞毛蕨 *Dryopteris erythrosora*、阔鳞鳞毛蕨 *Dryopteris championii*、蹄盖蕨 *Athyrium filix-femina*、菝葜 *Smilax china*、欧洲蕨 *Pteridium aquilinum*、青绿薹草 *Carex breviculmis*、蓝眼庭菖蒲 *Sisyrinchium angustifolium*、马银花 *Rhododendron ovatum*、土茯苓 *Smilax glabra*、六月雪 *Serissa japonica*、络石 *Trachelospermum jasminoides*、金樱子 *Rosa laevigata* 等。林分土壤类型为红壤，土层深度为 45~55 cm。

1.2　样地选设、调查及样品采集

采用空间替代时间法，于 2023 年春季选取地形、海拔、土壤类型、坡向、坡位等立地条件相近的马尾松林为研究对象。设置 5 个处理：未遭受松材线虫病危害且未采伐的马尾松林为对照 (ck)；多年累计采伐株数强度为 30%~40%(中度采伐)，经自然恢复 5 a 的马尾松次生林 (ML_5)；多年累计采伐株数强度为 60%~80%(重度采伐)，经自然恢复 5 a 的马尾松次生林 (HL_5)；多年累计采伐株数强度为 30%~40%(中度采伐)，经自然恢复 15 a 的马尾松次生林 (ML_{15})；多年累计采伐株数强度为 60%~80%(重度采伐)，经自然恢复 15 a 的马尾松次生林 (HL_{15})。上述林分均为 20 世纪 80 年代荒山飞播造林培育而成。被采伐的林木均为疫木。采伐后均未对林地开展补植，自然恢复期间林木均未遭受病虫危害，且无其他经营管理措施。

2023 年 3—5 月，进行林地踏查后在每个林分设置 3 个 625 m^2(25 m×25 m) 的标准样地，共 15 块样地，进行样地植物种类调查 (表 1)，并于 2023 年 6 月进行土壤物理性质调查及样品采集。具体方法：采用对角线法在每个样地的对角线上设置 3 个土壤采样点，挖取 1 m 宽的土壤剖面，按照 0~10、10~20、20~40 cm 的分层方式进行环刀和土壤样品采样，将土壤样品装入自封袋中混匀后，放于低温保温箱中带回实验室测理化性质。共挖取 45 个土壤剖面，采集 135 个环刀及 135 份土壤样品。环刀用于测定土壤容重、孔隙度、含水率等物理性质。土壤样品剔除石粒、根系、凋落物后过 2 mm 孔径土筛，将样品分为 2 份，一份新鲜土样置于 4 ℃ 冰箱中用于测定微生物生物量碳 (MBN)、水溶性有机碳 (WSOC)、硝态氮 (NO_3^--N)、铵态氮 (NH_4^+-N)，另一份置于通风处自然风干后用于测定土壤有机碳 (SOC)、颗粒有机碳 (POC)、易氧化碳 (ROC)。

表 1　不同采伐强度及自然恢复年限下林分基本概况

Table 1　Basic overview of forests under different logging intensities and natural restoration years

处理	采伐强度	马:阔数量比	恢复年限/a	主要植物	
				乔木层	灌草层
ck	未采伐	—	—	马尾松、檵木、青冈等	蹄盖蕨、菝葜、欧洲蕨、青绿薹草、蓝眼庭菖蒲等
ML_5	中度	7∶3	5	马尾松、木荷、朴树等	芒萁、柃木、山矾、赤楠、马银花等
HL_5	重度	2∶8	5	木荷、青冈、马尾松等	赤楠、马银花、山矾、土茯苓、总序桂等
ML_{15}	中度	6∶4	15	马尾松、青冈、樟树、漆树等	栀子、总序桂、映山红、六月雪、络石、金樱子等
HL_{15}	重度	6∶4	15	枫香、漆树、樟树、檵木等	山矾、金樱子、总序桂、菝葜、阔鳞鳞毛蕨等

说明：马指马尾松，阔指阔叶树。−表示无此项。林龄均为40 a。

1.3　土壤理化性质、有机碳及其活性组分测定方法

土壤容重、pH、含水率、孔隙度等参照《土壤农化分析》中的方法测定[26]；土壤有机碳质量分数采用 $K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4 消煮法测定[27]；土壤易氧化碳质量分数采用高锰酸钾氧化法测定[28]；土壤水溶性有机碳质量分数采用水浸提法测定[29]；土壤微生物生物量碳质量分数采用氯仿熏蒸浸提法测定[30]；土壤硝态氮质量分数采用紫外分光光度法测定[31]；土壤铵态氮质量分数采用靛酚兰比色法测定[32]；土壤颗粒有机碳质量分数采用六偏磷酸钠分散法测定[33]。

1.4　数据统计与分析

采用 Excel 2016、SPSS 27.0、Origin 2021 进行数据统计与分析。正态分布检验后，采用双因素方差分析法分析采伐强度与恢复年限对土壤有机碳及其活性组分的影响，并采用最小显著差异法 (LSD) 进行显著性检验。采用 Pearson 相关分析法分析有机碳及其组分与土壤理化性质的关系 (P<0.05)。

2　结果与分析

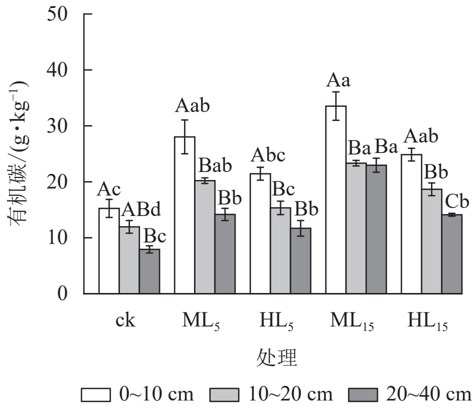
2.1　不同采伐强度与自然恢复年限对土壤有机碳的影响

由图 1 可知：不同采伐强度与恢复年限的马尾松次生林分土壤有机碳质量分数随土层加深而降低，且各处理 0~10 cm 土层土壤有机碳质量分数均高于 20~40 cm 土层 (P<0.05)。各林分不同土层土壤有机碳质量分数方面，0~10 与 20~40 cm 的 2 个土层中 HL_5 相差最小，为 9.75 g·kg^{-1}，ML_5 相差最大，为

13.86 g·kg^{-1}，各采伐林分均高于 ck 的 7.32 g·kg^{-1}。且各土层 ML_{15} 显著高于 HL_5 ($P<0.05$)。

不同采伐强度林分的土壤有机碳质量分数方面，与 ck 相比，采伐后各林分不同土层的土壤有机碳质量分数均有所增加，其中 ML_5、ML_{15}、HL_{15} 显著高于 ck ($P<0.05$)，且同一恢复年限下中度采伐的林分 (ML_5、ML_{15}) 均高于重度采伐林分 (HL_5、HL_{15})。

采伐后不同恢复年限的林分土壤有机碳质量分数方面，中度采伐与重度采伐林分各土层土壤有机碳质量分数均随着恢复年限的增加而上升。0~10 cm 土层的 ML_{15} 土壤有机碳质量分数最高，为 (33.53±7.86) g·kg^{-1}，ML_5、ML_{15} 、HL_{15} 均显著高于 ck ($P<0.05$)。20~40 cm 土层的 ML_{15} 土壤有机碳质量分数显著高于 ML_5 ($P<0.05$)，重度采伐的 HL_{15} 显著大于 ck。



不同大写字母表示相同采伐强度与自然恢复年限下不同土层土壤有机碳质量分数差异显著 ($P<0.05$)；不同小写字母表示不同采伐强度与自然恢复年限下同一土层土壤有机碳质量分数差异显著 ($P<0.05$)。

图 1　不同采伐强度及自然恢复年限下各土层中土壤有机碳变化

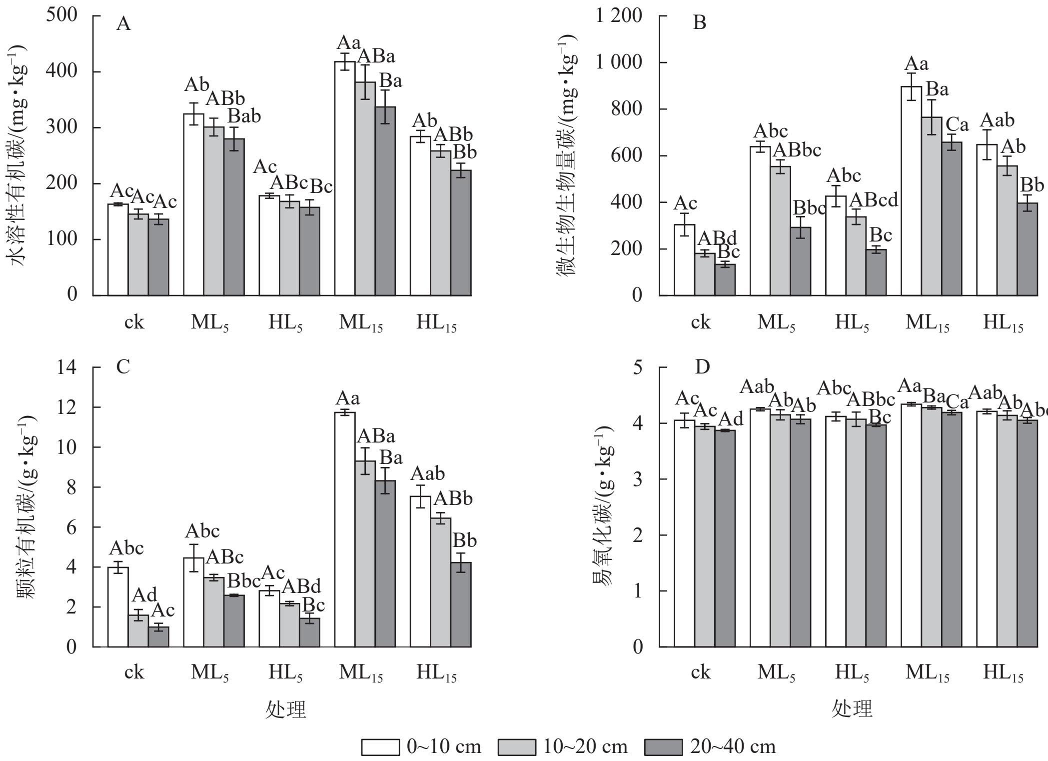
Figure 1　Changes of soil SOC content in different soil layers under different logging intensities and natural restoration years

2.2　不同采伐强度及自然恢复年限对土壤有机碳活性组分的影响

各处理土壤水溶性有机碳质量分数随土层加深而降低 (图 2A)，ML_{15}、HL_{15} 林分 0~10 cm 土层的水溶性有机碳质量分数均显著高于 20~40 cm ($P<0.05$)。同一土层深度下，ML_{15} 的水溶性有机碳质量分数最高，显著大于 ck、HL_5、HL_{15} ($P<0.05$)，0~10、10~20、20~40 cm 各土层的水溶性有机碳质量分数均为 ck 最低，分别为 (163.09±2.33)、(145.57±8.92)、(136.55±9.54) mg·kg^{-1}。不同采伐强度林分的土壤水溶性有机碳质量分数方面，采伐后各林分不同土层均有所增加，0~20 cm 土层，ML_{15}、HL_{15} 分别显著高于 ML_5、HL_5 及 ck ($P<0.05$)，且 ML_5、ML_{15}、HL_{15} 均显著高于 ck ($P<0.05$)。采伐后不同恢复年限的林分土壤水溶性有机碳质量分数方面，中度采伐与重度采伐林分各土层均随着恢复年限的增加而上升，最高为 0~10 cm 土层下 ML_{15}，为 (417.96±26.13) mg·kg^{-1}，是 ck 的 2.56 倍。

各处理土壤微生物生物量碳随土层加深而降低 (图 2B)，且各林分 0~10 cm 土层的微生物生物量碳质量分数均显著高于 20~40 cm ($P<0.05$)，ML_{15} 的各土层微生物生物量碳质量分数差异显著 ($P<0.05$)。各处理不同土层的微生物生物量碳质量分数方面，0~10 与 20~40 cm 土层中 HL_5 相差最小，为 229.13 mg·kg^{-1}，ML_5 相差最大，为 298.99 mg·kg^{-1}，各采伐林分均高于 ck 的 176.18 mg·kg^{-1}，且 ML_{15} 显著高于 HL_5 ($P<0.05$)。不同采伐强度林分的土壤微生物生物量碳质量分数方面，采伐后各林分不同土层均高于 ck，同一恢复年限下各土层的中度采伐林分 (ML_5、ML_{15}) 均高于重度采伐林分 (HL_5、HL_{15})。采伐后不同恢复年限的林分土壤微生物生物量碳质量分数方面，恢复年限为 15 a 的 2 种不同采伐林分 (ML_{15}、HL_{15}) 均分别显著高于 ML_5、HL_5 ($P<0.05$)，且中度采伐与重度采伐林分各土层微生物生物量碳质量分数均随着恢复年限的增加而上升，最高为 0~10 cm 土层下 ML_{15}，为 (895.87±158.71) mg·kg^{-1}，其中 ML_{15}、HL_{15} 均显著高于 ck ($P<0.05$)。

各处理土壤颗粒有机碳质量分数随土层加深而降低 (图 2C)，其中 ML_5、HL_5、ML_{15}、HL_{15} 的 0~10 cm 土层的颗粒有机碳质量分数显著高于 20~40 cm ($P<0.05$)。各林分不同土层颗粒有机碳质量分数方面，ML_{15} 均为最高，ck 均为最低，ML_{15} 显著高于 ck、ML_5、HL_5 ($P<0.05$)，为 0~10、10~20、20~40 cm 相同土层下 ck 的 3.0、7.4、11.8 倍。不同采伐强度林分的土壤颗粒有机碳质量分数方面，采伐后各林分不同土层均有所增加，其中 ML_{15}、HL_{15} 显著高于 ck ($P<0.05$)，且同一恢复年限下重度采伐林分 (HL_5、HL_{15}) 均低于中度采伐林分 (ML_5、ML_{15})，ML_{15} 与 HL_{15} 差异显著 ($P<0.05$)。采伐后不同恢复年限的林分土壤颗粒有机碳质量分数方面，中度采伐与重度采伐林分各土层颗粒有机碳质量分数均随着恢复年限的增加而上升，最高为 0~10 cm 土层下 ML_{15}，为 (11.74±0.26) g·kg^{-1}，15 a 恢复期的林分 (ML_{15}、HL_{15}) 分别显著高于 5 a 恢复期的林分 (ML_5、HL_5，$P<0.05$)，且 ML_{15}、HL_{15} 的颗粒有机碳质量分数至



不同大写字母表示相同采伐强度与自然恢复年限下不同土层土壤有机碳质量分数差异显著 (P<0.05)；不同小写字母表示不同采伐强度与自然恢复年限下同一土层土壤有机碳质量分数差异显著 (P<0.05)。

图 2　不同采伐强度及自然恢复年限下各土层土壤水溶性有机碳、微生物生物量碳、颗粒有机碳、易氧化碳变化

Figure 2　Changes of soil ROC, POC, MBC, and WSOC content in different soil layers under different logging intensities and natural restoration years

少为 0~10、10~20、20~40 cm 相同土层下 ML_5、HL_5 林分的 2.60 倍以上。

如图 2D 所示：各林分土壤易氧化碳质量分数随土层加深而降低，其中 HL_5、ML_{15} 的 0~10 cm 土层易氧化碳质量分数显著高于 20~40 cm (P<0.05)，ML_{15} 的各土层间差异显著 (P<0.05)。各林分不同土层的易氧化碳质量分数方面，ML_{15} 的 0~10 cm 最高，为 (4.34±0.03) g·kg^{-1}，且 10~20、20~40 cm 土层 ML_{15} 均显著高于其他林分 (P<0.05)。不同采伐强度林分的土壤易氧化碳质量分数方面，中度采伐与重度采伐林分各土层均随着恢复年限的增加而上升，其中 ML_5、ML_{15}、HL_{15} 显著高于 ck (P<0.05)，且同一恢复年限下重度采伐林分 (HL_5、HL_{15}) 均低于中度采伐的林分 (ML_5、ML_{15})。采伐后不同恢复年限的林分土壤易氧化碳质量分数方面，各采伐强度的林分土壤易氧化碳质量分数随恢复年限延长而显著增加 (P<0.05)。

2.3　不同采伐强度及自然恢复年限对土壤有机碳及其活性组分的影响分析

双因素方差检验结果 (表 2) 表明：采伐强度及植被自然恢复年限是土壤有机碳及其活性组分质量分数的显著影响因素 (P< 0.05)，其中，采伐强度对土壤活性有机碳组分质量分数的影响达极显著

表 2　采伐及自然恢复年限对土壤有机碳及其活性组分影响的双因素方差分析

Table 2　Two-way ANOVA of soil organic carbon and its active components under logging and natural restoration

影响因子	采伐强度		恢复年限		采伐强度×恢复年限	
	F	P	F	P	F	P
有机碳	11.440	<0.050	6.247	<0.050	0.647	0.426
微生物生物量碳	14.838	<0.001	29.273	<0.001	1.100	0.301
水溶性有机碳	133.725	<0.001	54.664	<0.001	0.223	0.640
易氧化碳	15.781	<0.001	9.498	<0.001	0.346	0.560
颗粒有机碳	18.922	<0.001	76.350	<0.001	4.111	<0.05

(P<0.001)，植被自然恢复年限则对土壤微生物生物量、水溶性有机碳、易氧化碳、颗粒有机碳有极显著影响 (P<0.001)。而采伐强度与植被自然恢复年限的交互作用仅对土壤颗粒有机碳有显著影响 (P<0.05)。

2.4　不同采伐强度及自然恢复年限下土壤理化性质差异

如表 3 所示：各林分土壤 pH 为 4.23~4.47，容重为 0.96~1.40 g·cm^{-3}，土壤含水率为 12.05%~20.00%，土壤孔隙度 41.05~52.40 mg·kg^{-1}。硝态氮与铵态氮质量分数呈现为随着土层加深而降低的趋势，且随植被恢复年限的延长而增加，最高均为 0~10 cm 土层 ML_{15} 林分。采伐强度对土壤 pH、容重、硝态氮有极显著影响 (P<0.01)，对土壤含水量、铵态氮有显著性影响 (P<0.05)；恢复年限仅对硝态氮有极显著影响 (P<0.01)，对土壤孔隙度、铵态氮有显著性影响 (P<0.05)；采伐强度及恢复年限的交互作用对 pH 和土壤容重有显著性影响 (P<0.05)。

表 3　不同采伐强度及自然恢复年限下林分土壤理化因子及双因素方差分析

Table 3　Soil physical and chemical factors and two-way ANOVA analysis in forest stands under different logging intensities and natural restoration years

处理	土层/cm	pH	容重/(g·cm^{-3})	含水量/%	孔隙度/%	硝态氮/(mg·kg^{-1})	铵态氮/(mg·kg^{-1})
ck	0~10	4.31±0.04 Aa	1.33±0.20 Aa	12.05±5.84 Aa	42.92±1.36 Ab	2.21±0.21 Ac	2.89±0.29 Ac
	10~20	4.30±0.06 Ab	1.40±0.18 Aa	14.63±5.27 Aa	42.53±1.25 Ab	1.52±0.23 Bc	2.33±0.78 Ad
	20~40	4.27±0.04 Aa	1.35±0.09 Aa	17.84±4.80 Aa	41.05±2.62 Ab	1.17±0.06 Bb	2.08±0.68 Aa
ML_5	0~10	4.32±0.06 Aa	0.96±0.10 Bc	20.00±1.53 Aa	52.40±2.72 Aa	3.84±0.54 Ab	5.52±1.41 Abc
	10~20	4.33±0.04 Ab	1.05±0.08 Bc	15.33±0.67 Ba	51.16±2.46 Aa	2.79±0.38 Bb	4.58±0.66 Abc
	20~40	4.24±0.03 Aa	1.15±0.05 Ab	16.00±0.58 Ba	49.28±0.19 Aa	2.05±0.40 Bab	4.02±0.47 Aa
HL_5	0~10	4.24±0.01 Aa	1.02±0.12 Ac	12.33±0.33 Aa	45.43±2.93 Aab	2.54±0.31 Ac	4.33±0.50 Abc
	10~20	4.34±0.03 Ab	1.10±0.12 Ac	15.67±1.45 Aa	48.65±1.36 Aab	2.14±0.48 ABbc	3.39±1.17 Acd
	20~40	4.30±0.09 Aab	1.16±0.08 Aab	10.67±2.60 Aa	43.95±2.49 Aab	1.57±0.25 Bb	2.46±0.99 Aa
ML_{15}	0~10	4.32±0.06 Aa	1.29±0.12 Aab	19.03±1.74 Aa	49.21±2.30 Aab	6.68±0.46 Aa	13.71±2.61 Aa
	10~20	4.31±0.09 Ab	1.29±0.13 Aab	18.01±1.51 Aa	47.48±1.15 Aab	4.87±0.41 ABa	6.33±0.93 Ba
	20~40	4.23±0.07 Aa	1.36±0.04 Aa	18.06±1.32 Aa	48.25±2.20 Aab	3.72±0.93 Ba	4.02±1.88 Ba
HL_{15}	0~10	4.31±0.17 Aa	1.07±0.06 Abc	19.11±2.21 Aa	49.92±0.75 Aab	4.53±0.47 Ab	6.27±0.66 Ab
	10~20	4.23±0.03 Aa	1.25±0.04 Aab	18.38±0.79 Aa	46.30±2.44 Aab	3.01±0.57 ABb	5.46±0.68 ABab
	20~40	4.47±0.09 Aa	1.20±0.19 Aab	17.83±0.48 Aa	45.35±2.98 Aab	2.10±0.50 Bab	3.77±0.71 Ba
L	—	**	**	*	—	**	*
Y	—	—	—	—	*	**	*
$L\times Y$	—	*	*	—	—	—	—

说明：不同大写字母表示相同采伐强度与自然恢复年限下不同土层土壤理化性质差异显著 (P<0.05)；不同小写字母表示不同采伐强度与自然恢复年限下同一土层土壤理化性质差异显著 (P<0.05)。L 表示采伐强度，Y 表示恢复年限。*表示 0.05 水平下差异显著，**表示 0.01 水平下差异极显著，—表示无显著影响。

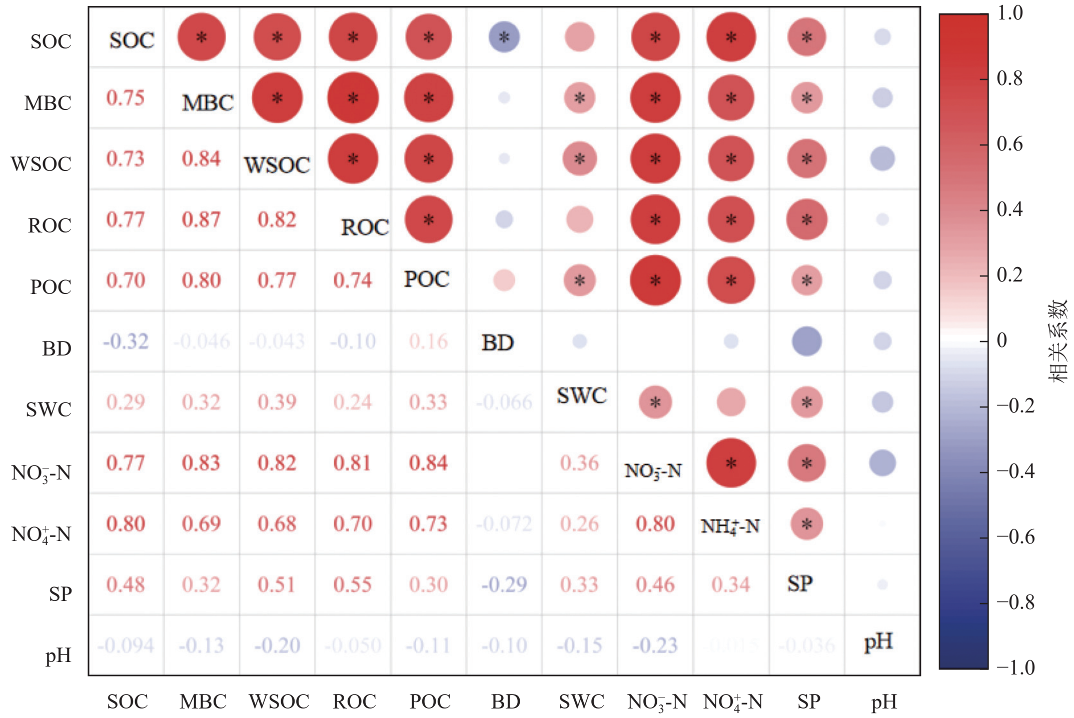
2.5　土壤理化性质与有机碳及活性组分间的相关性分析

相关分析可知 (图 3)：土壤有机碳及其活性组分之间均呈显著正相关关系 (P<0.05)，其中，土壤易氧化碳与与土壤微生物生物量碳相关系数最高，达 0.87。土壤容重与土壤有机碳显著负相关 (P<0.05)，土壤含水率与土壤微生物生物量碳、土壤水溶性碳、土壤颗粒有机碳间表现出显著正相关 (P<0.05)；土壤硝态氮、土壤铵态氮与土壤有机碳及其活性组分间亦为显著正相关 (P<0.05)。

3　讨论

3.1　不同强度采伐对林分土壤有机碳及其活性组分的影响

间伐等森林采伐管理措施对固存土壤有机碳影响较大[16]。本研究发现：适度采伐提高了土壤有机碳及其活性组分质量分数，这一结果与之前的研究结果类似。王昌亮等[34] 研究表明：40% 采伐强度的落



*. 显著相关 (P<0.05)。SOC. 土壤有机碳；MBC. 土壤微生物生物量碳；WSOC. 土壤水溶性有机碳；ROC. 土壤易氧化碳；POC. 土壤颗粒有机碳；BD. 土壤容重；SWC. 土壤含水量；NO_3^--N. 土壤硝态氮；NH_4^+-N. 土壤铵态氮；pH. 土壤酸碱度；SP. 土壤孔隙度。

图 3 土壤理化因子、有机碳及其活性组分间的皮尔逊相关性分析

Figure 3 Pearson correlation analysis between soil physicochemical factors, soil organic carbon and its active components under logging and natural restoration

叶松 *Larix gmelinii* 人工林 0~60 cm 土层中的土壤有机碳、土壤易氧化有机碳显著高于对照；MA 等[16] 研究表明：适度采伐 (30% 采伐强度) 的华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 林土壤有机碳和土壤易氧化有机碳明显高于重度采伐及低强度采伐林分。究其原因为中度采伐提高了林分的地上凋落物和地下植物细根量，而重度采伐下的林分一段时间内碳源不足，林分微环境的碳循环能力减弱，致使其土壤中的有机碳质量分数降低。同时，土壤易氧化有机碳、土壤颗粒有机碳、土壤微生物生物量碳、土壤水溶性有机碳质量分数从高到低均表现为中度采伐、重度采伐、ck，其原因可能在于中度采伐的林分植被覆盖更为完整，所提供的有机物质如凋落物等在土壤中分解后形成易氧化碳、颗粒有机碳等[19]，植被还可以通过根系分泌物和凋落物的形式向土壤中输入水溶性有机碳。从土壤微生物活性来说，中度采伐对于土壤扰动小于重度采伐，同时增加林地光照，改善通气状况，有利于植物细根的生长并促进土壤微生物的活动，加速地上与地下凋落物的分解，增加微生物生物量碳及颗粒有机碳来源[20]；中度采伐对林分的人为干扰小于重度采伐，对森林结构的完整性破坏较小，有利于土壤生态系统恢复和有机物质的积累，从而提高土壤碳的质量分数[34]。当表层土壤有机碳的黏结点达到饱和时，易氧化碳将其解析并以水溶性有机碳的形式向土壤深层移动。水溶性有机碳可以提高土壤中稳定性有机碳的分解，土壤活性有机碳质量分数随之升高[35]。

3.2 不同自然恢复年限下的土壤有机碳及其活性组分的变化规律

自然恢复年限对土壤有机碳及其活性组分变化产生显著影响，它们的质量分数均随恢复年限增长而增加。相同采伐强度下的马尾松次生林土壤有机碳、土壤易氧化碳、土壤微生物生物量碳、土壤颗粒有机碳、土壤水溶性有机碳质量分数均与其植被自然恢复年限成正比。活性有机碳组分是土壤中植物和微生物具有较高可利用性的化学活性组分，可作为土壤碳库稳定的指示因子，表征土壤碳库稳定性[35]，如混交林土壤活性有机碳与土壤有机碳的占比低于纯林，土壤碳库稳定性更强[36]，这与本研究结果一致。土壤颗粒有机碳主要是与砂砾结合的动植物半残体分解物组成，是有机碳中的非保护性部分[37]。本研究中土壤颗粒有机碳质量分数表现为 0~10 cm 土层大于 10~40 cm 土层，这与尚瑶等[38] 的研究结果相符。其原因可能是自然恢复过程中会增加动植物残体、凋落物等，这些物质的增加会促使易氧化碳和颗粒有

机碳的形成[27]，从而提高其质量分数。而土壤水溶性有机碳随恢复年限增加呈显著增加的原因在于土壤水溶性有机碳主要来源于凋落物、植物残体腐殖质等，恢复年限越长的林分中有机质越高[39]。植被的改善有利于土壤吸收更多的根系分泌物和凋落物[21]，促进微生物的发展和生长，提高微生物生物量碳的质量分数。同时，微生物的活动也有助于土壤有机质的分解和转化[23]，影响其他有机碳组分的质量分数。随着有机质的积累和微生物的作用，土壤结构得到改善，土壤中养分的有效循环提高植物生产力，增加土壤有机碳的输入，有利于土壤有机碳的累积。

3.3　土壤有机碳及其活性组分对采伐后植被自然恢复的响应机制

马尾松次生林经适度采伐后，出现大量林窗，增加了灌草生长空间，凋落物、细根生物量随之增加，土壤有机碳碳源得到补充；随着植被恢复，植物种类增加，群落组成结构趋于复杂，提高了土壤微生物底物的可利用性，促进土壤微生物生长和活性，有利于土壤碳的累积。马尾松次生林土壤有机碳质量分数随土层加深而降低，符合凋落物、根系等碳源集中在表层土的特征[39]。土壤颗粒有机碳、土壤微生物生物量碳等是土壤活性有机碳的重要组分[40]，因而各活性组分亦表现为随土层深度增加其有效性降低的规律[9, 41]。本研究中土壤颗粒有机碳、土壤水溶性有机碳、土壤易氧化碳、土壤微生物生物量碳均与土壤有机碳存在极显著的正相关关系。这与王斐等[42]、朱浩宇等[43] 的研究结果相符合，显示土壤有机碳是影响活性有机碳主要的决定性因素。活性有机碳组分之间也呈现极显著正相关关系，表明其关系密切，作为活性碳库的成分，共同影响土壤有机碳周转。土壤硝态氮、土壤铵态氮与有机碳及其组分均存在极显著正相关关系，表明氮素有效性也是影响有机碳及其组分的关键。本研究中，采伐后林分土壤硝态氮、铵态氮质量分数均高于未采伐林分，并随着恢复时限的增长而增加。氮素的增加会刺激植物生长，从而增加根系分泌物和凋落物的产生[3]，同时可能会促进微生物的生长和活性，加速其对有机质的分解，影响有机碳的稳定性和质量分数。本研究中，采伐后的马尾松次生林土壤含水率高于未采伐林分。土壤含水率的提高通常有利于土壤中有机物质的保持，减少矿化，这促使土壤有机碳和易氧化碳的积累[44]。良好的水分条件亦有益于微生物活动环境，促进微生物生物量碳的增加[45]。土壤容重的大小反映土壤结构、质地和腐殖质等的变化，从而影响有机碳的变化。本研究发现：土壤容重与土壤有机碳呈现显著负相关关系。这与袁星明等[46] 的研究结果相符合。相比 ck，马尾松次生林采伐后的土壤容重有所降低，意味着土壤质地变得更加疏松，有助于提高土壤的通气性和水分保持能力，为微生物活动提供更好的环境，促使其更有效地分解有机质，从而增加土壤有机碳、土壤易氧化碳、土壤颗粒有机碳质量分数[9]。采伐后的林分土壤孔隙度高于 ck，有利于改善土壤结构，增加空气和水的渗透性，为植物根系生长和微生物活动提供良好的环境，减少有机物质的干燥和氧化，有助于维护有土壤有机碳的稳定性，增加土壤有机碳及其活性组分的质量分数[9]。

4　结论

采伐对马尾松林分土壤有机碳及其活性组分质量分数具有显著的促进作用，形成的马尾松次生林微环境，加快了土壤活性有机碳组分的转化，尤其是 0~10 cm 土层的有机碳及其活性组分质量分数对采伐的响应更为敏感。30%~40% 中度采伐的改善作用强于 60%~80% 的重度采伐。

采伐后马尾松次生林土壤有机碳及其活性组分质量分数与植被自然恢复年限呈显著正相关。15 a 自然恢复年限的土壤有机碳库显著高于 5 a 的自然恢复年限及未采伐的马尾松林分，且各活性有机碳组分对自然恢复年限的响应趋势相同。

土壤中的有机碳及其活性组分间具有协同提升的作用。土壤不同活性有机碳组分对马尾松次生林采伐强度与自然恢复年限的响应是通过改变林下植物种类、改善林木生长空间和光温水热等复杂的生物与非生物因素驱动的。因此，在森林经营条件许可的情况下，可以针对马尾松纯林进行适当强度的采伐，选择适地树种人工促进更新，加快针叶纯林演替成混交林，促进森林土壤碳循环，增加土壤有机碳库。

5　参考文献

[1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, **304**(5677): 1623 − 1627.

[2] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报, 2011, **31**(19): 5437 − 5448.

LIU Shirong, WANG Hui, LUAN Junwei. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5437 − 5448.

[3] 武燕, 黄青, 刘讯, 等. 西南喀斯特地区马尾松人工林林龄对土壤理化性质的影响[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, **48**(3): 99 − 107.

WU Yan, HUANG Qing, LIU Xun, *et al*. Effects of *Pinus massoniana* plantation age on soil physical and chemical properties in karst area in southwest China[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (*Natural Sciences Edition*), 2023, **48**(3): 99 − 107.

[4] BONGIORNO G, BÜNEMANN E K, OGUEJIOFOR C U, *et al*. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe[J]. *Ecological Indicators*, 2019, **99**: 38 − 50.

[5] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(11): 1412 − 1417.

LIU Min, YU Wantai, JIANG Zishao, *et al*. A research review onsoil active organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(11): 1412 − 1417.

[6] YUAN Guoyin, HUAN Weiwei, SONG Hang, *et al*. Effects of straw incorporation and potassium fertilizer on crop yields, soil organic carbon, and active carbon in the rice-wheat system [J/OL]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **209**: 104958[2024-02-26]. doi: 10.1016/j.still.2021.104958.

[7] 张金硕, 李素艳, 孙向阳, 等. 山东省不同植被类型土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 土壤, 2024, **56**(2): 350 − 357.

ZHANG Jinshuo, LI Suyan, SUN Xiangyang, *et al*. Characteristics of soil organic carbon and its components under different vegetation types in Shandong Province[J]. *Soils*, 2024, **56**(2): 350 − 357.

[8] 窦艳星, 侯琳, 马红红, 等. 间伐对松栎混交林土壤活性有机碳的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, **35**(5): 64 − 69.

DOU Yanxing, HOU Lin, MA Honghong, *et al*. Effects of forest thinning on soil labile organic carbon in a pine-oak mixed forest[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, **35**(5): 64 − 69.

[9] 邓莉丽, 刘青华, 周志春, 等. 抗松材线虫病马尾松种质资源遗传多样性分析及核心种质构建[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(1): 67 − 78.

DENG Lili, LIU Qinghua, ZHOU Zhichun, *et al*. Genetic diversity analysis and core collection of pinewood nematodiasis-resistant *Pinus massoniana* germplasm resources[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(1): 67 − 78.

[10] 浙江省林业局. 浙江省林业局林业概况[EB/OL]. 2023-07-05[2024-02-28]. http://lyj.zj.gov.cn/col/col1275946/.

Department of Forestry of Zhejiang Province. *Forestry Overview of Zhejiang Forestry Bureau* [EB/OL]. 2023-07-05[2024-02-28]. http://lyj.zj.gov.cn/col/col1275946/.

[11] 浙江省林业局. 中国绿色时报: “数字森防”助力浙江高质量防控松材线虫病 [EB/OL]. 2024-01-16[2024-02-28]. http://lyj.zj.gov.cn/art/2024/1/16/art_1275964_59065639.html.

Department of Forestry of Zhejiang Province. *China Green Times*: “*Digital Forest Defense*” *Helps Zhejiang to Prevent and Control Pine Wilt Disease with High Quality* [EB/OL]. 2024-01-16[2024-02-28]. http://lyj.zj.gov.cn/art/2024/1/16/art_1275964_59065639.html.

[12] 吴敏娟, 尤誉杰, 张晓红, 等. 不同干扰模式对受害马尾松人工纯林林分结构的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(1): 58 − 66.

WU Minjuan, YOU Yujie, ZHANG Xiaohong, *et al*. Effects of different disturbance patterns on stand structure of infected pure *Pinus massoniana* plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(1): 58 − 66.

[13] 张华锋, 陈思宇, 刘刚, 等. 松材线虫病疫木卫生伐对马尾松纯林林分结构的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(4): 745 − 751.

ZHANG Huafeng, CHEN Siyu, LIU Gang, *et al*. Effects of sanitation cutting pine wilt diseased trees on the stand structure of pure *Pinus massoniana* plantation[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, **37**(4): 745 − 751.

[14] JANDL R, LINDNER M, VESTERDAL L, *et al*. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?[J]. *Geoderma*, 2007, **137**(3/4): 253 − 268.

[15] PARIONA W, FREDERICKSEN T S, LICONA J C. Natural regeneration and liberation of timber species in logging gaps in two Bolivian tropical forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, **181**(3): 313 − 322.

[16] MA Junyong, KANG Fengfeng, CHENG Xiaoqin, *et al*. Moderate thinning increases soil organic carbon in *Larix principis-rupprechtii* (Pinaceae) plantations[J]. *Geoderma*, 2018, **329**: 118 − 128.

[17] DON A, SCHUMACHER J, FREIBAUER A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: a meta-

analysis[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(4): 1658 − 1670.

[18] ZHANG Yaohua, XU Xianli, LI Zhenwei, *et al*. Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**(2): 2657 − 2665.

[19] 王晓荣, 雷蕾, 曾立雄, 等. 抚育间伐对马尾松林土壤活性有机碳的短期影响[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(4): 1049 − 1061.

WANG Xiaorong, LEI Lei, ZENG Lixiong, *et al*. Short-term effects of tending thinning on soil labile organic carbon in *Pinus massoniana* stands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(4): 1049 − 1061.

[20] 翟凯燕, 马婷瑶, 金雪梅, 等. 间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(3): 609 − 615.

ZHAI Kaiyan, MA Tingyao, JIN Xuemei, *et al*. Effects of thinning intensity on soil active organic carbon in *Pinus massoniana* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(3): 609 − 615.

[21] 赵元, 张伟, 胡培雷, 等. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(21): 8535 − 8544.

ZHAO Yuan, ZHANG Wei, HU Peilei, *et al*. Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in at typical karst depression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(21): 8535 − 8544.

[22] 李文杰, 张祯皎, 赵雅萍, 等. 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 1050 − 1058.

LI Wenjie, ZHANG Zhenjiao, ZHAO Yaping, *et al*. Changes in soil microbial carbon-degrading enzymes and their relationships with carbon pool components during the restoration process of *Robinia pseudoacacia*[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 1050 − 1058.

[23] 苏静, 赵世伟, 马继东, 等. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响[J]. 水土保持研究, 2005, **12**(3): 50 − 52, 179.

SU Jing, ZHAO Shiwei, MA Jidong, *et al*. Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia region in Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, **12**(3): 50 − 52, 179.

[24] DUVENECK M, SCHELLER R, WHITE M. Effects of alternative forest management on biomass and species diversity in the face of climate change in the northern Great Lakes region (USA)[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, **44**(7): 700 − 710.

[25] 王伟, 李占斌, 李鹏, 等. 生态建设对坡面土壤有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(2): 35 − 41.

WANG Wei, LI Zhanbin, LI Peng, *et al*. Effect of ecological construction on soil organic carbon distributionon slope land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(2): 35 − 41.

[26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.

BAO Shidan. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2005.

[27] 李鹏, 刘晓君, 刘苑秋, 等. 红壤侵蚀区不同植被恢复模式土壤碳储量特征及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(1): 12 − 21.

LI Peng, LIU Xiaojun, LIU Yuanqiu, *et al*. Characteristics and influencing factors of soil carbon stocks in different vegetation restoration models in red soil erosion areas[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(1): 12 − 21.

[28] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459 − 1466.

[29] 李伟成, 盛海燕, 蒋跃平, 等. 基塘系统不同竹林土壤 CO_2 通量特征及其影响因子[J]. 林业科学, 2018, **54**(8): 13 − 22.

LI Weicheng, SHENG Haiyan, JIANG Yueping, *et al*. Soil CO_2 flux and its influence factors of different bamboo plantations in the dike-pond ecosystem[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(8): 13 − 22.

[30] 胡婵娟, 刘国华, 吴雅琼. 土壤微生物生物量及多样性测定方法评述[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(6/7): 1161 − 1167.

HU Chanjuan, LIU Guohua, WU Yaqiong. A review of soil microbial biomass and diversity measurements[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(6/7): 1161 − 1167.

[31] 国家环境保护总局. 水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法: HJ/T 346—2007 [J]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

State Environmental Protection Administration. *Water Quality−Determination of Nitrate-nitrogen−ultraviolet Spectrophotometry*: *HJ/T* 346−2007 [J]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

[32] 陈希, 陈伏生, 叶素琼, 等. 丘陵红壤茶园根际氮磷转化对不同强度酸雨胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(1): 1 − 8.

CHEN Xi, CHEN Fusheng, YE Suqiong, *et al*. Responses of rhizosphere nitrogen and phosphorus transformations to different acid rain intensities in a hilly red soil tea plantation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 1 − 8.

[33] GARTEN, C T, POST, HANSON P J, *et al*. Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains[J]. *Biogeochemistry*, 1999, **45**(2): 115 − 145.

[34] 王昌亮, 王庆成, 张程, 等. 间伐强度对落叶松人工林土壤有机碳的影响[J]. 森林工程, 2015, **31**(1): 12 − 16.
WANG Changliang, WANG Qingcheng, ZHANG Cheng, *et al*. Effect of thinning intensity on soil organic carbon in *Larix gmelinii* plantation[J]. *Forest Engineering*, 2015, **31**(1): 12 − 16.

[35] 袁知洋, 邓邦良, 张学玲, 等. 武功山草甸植被小群落土壤活性有机碳与土壤养分的典型相关分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(2): 84 − 90.
YUAN Zhiyang, DENG Bangliang, ZHANG Xueling, *et al*. Canonical correlation analysis between soil active organic carbon and soil nutrient in different vegetation small communities of Wugong Mountain alpine meadow[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, **36**(2): 84 − 90.

[36] 林鑫宇, 惠昊, 王亚茹, 等. 不同林分类型下土壤活性有机碳含量和分布特征[J]. 安徽农业大学学报, 2021, **48**(3): 437 − 443.
LIN Xinyu, HUI Hao, WANG Yaru, *et al*. The content and distribution characteristics of soil active organic carbon under different stand types[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, **48**(3): 437 − 443.

[37] GREGORICH E G, CARTER M R, ANGERS D A, *et al*. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, **74**(4): 367 − 385.

[38] 尚瑶, 傅民杰, 孙宇贺, 等. 温带阔叶林土壤有机碳及其颗粒组分空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(5): 176 − 181, 301.
SHANG Yao, FU Minjie, SUN Yuhe, *et al*. Spatial distribution of soil organic carbon and particulate organic carbon in temperate broad-leaved forest in northeast of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(5): 176 − 181, 301.

[39] 韩海荣. 华北落叶松人工林根际与非根际土壤活性有机碳及酶活性对密度调控的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
HAN Hairong. *Response of Active Organic Carbon and Enzyme Activities to Density Adjustment in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil of Larix principis-rupprechtii Plantation* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[40] GEISEN S, HU Shenran, CRUZ T E E, *et al*. Protists as catalyzers of microbial litter breakdown and carbon cycling at different temperature regimes[J]. *The ISME Journal*, 2021, **15**(2): 618 − 621.

[41] PIAO H C, HONG Y T, YUAN Z Y. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soils from karst areas of southwest China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **30**(4): 294 − 297.

[42] 王斐, 马锐豪, 夏开, 等. 森林转换对土壤活性有机碳组分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, **30**(1): 233 − 240.
WANG Fei, MA Ruihao, XIA Kai, *et al*. Response of soil labile organic carbon fractions to forest conversions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(1): 233 − 240.

[43] 朱浩宇, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山 5 种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征[J]. 土壤, 2021, **53**(2): 354 − 360.
ZHU Haoyu, WANG Zifang, LU Chang, *et al*. Variation characteristics of soil active organic carbon and carbon pools under five vegetation types in Jinyun Mountain[J]. *Soil*, 2021, **53**(2): 354 − 360.

[44] 徐雅洁, 郭月峰, 姚云峰, 等. 不同林分配置对土壤水分物理性质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, **39**(3): 370 − 377.
XU Yajie, GUO Yuefeng, YAO Yunfeng, *et al*. Effect of different forest-stand configuration on soil-moisture physical properties[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2021, **39**(3): 370 − 377.

[45] 辜翔. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳库积累及其稳定性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
GU Xiang. *The Effect of Vegetation Restoration on the Accumulation and Stability of Soil Organic Carbon Pool in the Mid-Subtropical of China* [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019.

[46] 袁星明, 朱宁华, 郭耆, 等. 南亚热带不同人工林对土壤理化性质的影响及土壤质量评价[J]. 林业科学研究, 2022, **35**(3): 112 − 122.
YUAN Xingming, ZHU Ninghua, GUO Qi, *et al*. Effects of different plantations on soil physical and chemical properties and soil quality evaluation in south subtropical zone[J]. *Forest Research*, 2022, **35**(3): 112 − 122.