北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

采伐剩余物管理对杉木人工林植被和土壤碳密度的影响

杨佳敏 杨礼硕 关欣 吴君萍 张伟东 杨庆朋

Effects of harvest residue management on vegetation and soil carbon density in a Chinese fir plantation

Yang Jiamin, Yang Lishuo, Guan Xin, Wu Junping, Zhang Weidong, Yang Qingpeng

引用本文:
杨佳敏, 杨礼硕, 关欣, 吴君萍, 张伟东, 杨庆朋. 采伐剩余物管理对杉木人工林植被和土壤碳密度的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):112–118. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250434
Yang Jiamin, Yang Lishuo, Guan Xin, Wu Junping, Zhang Weidong, Yang Qingpeng. Effects of harvest residue management on vegetation and soil carbon density in a Chinese fir plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):112–118. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250434

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250434

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期
Optimal rotation period of carbon sequestration wood multifunctional management in Chinese fir plantation
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 120–128. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220399

北京市森林碳汇能力评价
Evaluation of forest carbon sequestration capacity in Beijing
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 108–119. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220436

采伐强度对阔叶红松林生态系统碳密度恢复的影响
Effects of logging intensity on restoration of carbon density in broadleaved Korean pine forest ecosystem
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 33–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220190

黑龙江省主要乔木林类型碳储量及碳汇能力
Carbon storage and carbon sink capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2024, 46(11): 10–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230343

基于大径材培育下杉木人工林间伐初始期的确定
Determination of initial thinning period of Chinese fir plantation based on large diameter timber cultivation
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 45–54. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200397

融合长时序遥感和地面实测的北京城市森林碳汇功能多尺度评估及其影响因素
Multi–scale assessment of carbon sequestration function of urban forests in Beijing and its influencing factors by integrating long–time–series remote sensing and field survey
北京林业大学学报, 2025, 47(12): 26–38. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250120

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250434

采伐剩余物管理对杉木人工林植被和土壤碳密度的影响

杨佳敏[1,2]　杨礼硕[1,2]　关　欣[1,3]　吴君萍[1,2]　张伟东[1,3]　杨庆朋[1,3]

（1. 中国科学院会同森林生态实验站，中国科学院森林生态与保育重点实验室，中国科学院沈阳应用生态研究所，辽宁 沈阳 110016；
2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 101408；3. 湖南会同森林生态系统国家野外科学观测研究站，
亚热带森林生态系统结构与服务功能湖南省重点实验室，湖南 会同 418307）

摘要:【目的】人工林在全球碳循环中扮演着关键角色，但传统以提高木材生产力为导向的经营模式可能导致土壤有机碳损失，形成植被碳与土壤碳之间的权衡。采伐剩余物管理是影响人工林碳汇功能的关键措施，但其对地上、地下碳库的协同影响尚不明确。本研究旨在探究保留与清除采伐剩余物两种处理方式对杉木人工林植被碳与土壤碳密度的长期影响，以期为通过营林措施实现人工林碳汇功能协同提升提供科学依据。**【方法】**采用随机区组设计，设置保留采伐剩余物与清除采伐剩余物两种处理，各 10 个重复。在处理实施 14 年后（2022 年），通过每木检尺并结合生物量方程计算乔木层生物量，采用收获法测定灌木层、草本层及凋落物层生物量，并利用环刀法与分层采样法测定土壤容重和碳含量。所有植物与土壤样品经处理后，使用碳氮元素分析仪测定有机碳含量，进而计算各组分碳密度。**【结果】**保留采伐剩余物处理下，乔木层总碳密度（55.85 t/hm^2）较清除处理（53.12 t/hm^2）提高了 5.14%，但差异不显著。但保留处理显著提高了乔木根碳密度，增幅达 37.23%（从 5.64 t/hm^2 增至 7.47 t/hm^2）。灌木层与草本层碳密度在保留处理下均呈现增加趋势，但未达显著水平。两种处理间的土壤总碳密度（0 ~ 60 cm）无显著差异。但分层分析表明，保留处理显著提高了 0 ~ 10 cm 表层土壤的碳密度，增幅为 16.08%（从 22.90 t/hm^2 增至 26.5 t/hm^2），而对深层土壤的碳密度无显著影响。**【结论】**保留采伐剩余物是促进杉木人工林植被−土壤碳汇协同提升的有效措施，能显著促进乔木根系碳积累并增加表层土壤碳储量，对碳中和目标下人工林可持续经营具有重要实践价值。

关键词：碳密度；采伐剩余物；杉木人工林；碳汇；协同/权衡

中图分类号：S750　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)01−0112−07

引文格式：杨佳敏，杨礼硕，关欣，等. 采伐剩余物管理对杉木人工林植被和土壤碳密度的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：112−118. Yang Jiamin, Yang Lishuo, Guan Xin, et al. Effects of harvest residue management on vegetation and soil carbon density in a Chinese fir plantation［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 112−118.

Effects of harvest residue management on vegetation and soil carbon density in a Chinese fir plantation

Yang Jiamin[1,2]　Yang Lishuo[1,2]　Guan Xin[1,3]　Wu Junping[1,2]　Zhang Weidong[1,3]　Yang Qingpeng[1,3]

(1. Huitong Experimental Station of Forest Ecology, CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Silviculture, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China;
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
3. Huitong National Research Station of Forest Ecosystem, Hunan Key Laboratory for Structure and Ecosystem Service of Subtropical Forest, Huitong 418307, Hunan, China)

Abstract:［**Objective**］Plantations play a critical role in the global carbon cycle. However, traditional management practices aiming at enhancing timber productivity may lead to soil organic carbon loss, creating

收稿日期: 2025−11−06　**修回日期:** 2025−12−25

基金项目: 国家自然科学基金项目（32192434、U22A20612），国家重点研发计划（2022YFF1303003），湖南省科技创新计划（2024RC4029）。

第一作者: 杨佳敏。主要研究方向：杉木人工林经营管理。Email: yangjiamin22@mails.ucas.ac.cn　地址：110016 辽宁省沈阳市文化路 72 号中国科学院沈阳应用生态研究所。

责任作者: 杨庆朋，副研究员。主要研究方向：生态系统碳氮循环。Email: yqp226@iae.ac.cn　地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

a trade-off between vegetation carbon and soil carbon. Harvest residue management is a key measure influencing the carbon sink function of plantations, yet its synergistic effects on above- and below-ground carbon pools remain unclear. This study aims to investigate the long-term effects of two residue management treatments (retention and removal) on vegetation and soil carbon densities in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations, so as to provide a scientific basis for enhancing carbon sequestration through improved silvicultural practices. [**Method**] A randomized block design was adopted, with two treatments—harvest residue retention and removal—each replicated 10 times. After 14 years of treatment (in 2022), tree layer biomass was estimated using tree-by-tree surveys combined with species-specific biomass equations. Shrub, herb, and litter layer biomass were determined using the harvest method. Soil bulk density and carbon content were measured using the cutting ring method and stratified sampling, respectively. All plant and soil samples were processed, and organic carbon content was analyzed using a carbon-nitrogen elemental analyzer. Carbon density of each component was subsequently calculated. [**Result**] Under the residue retention treatment, the total tree layer carbon density (55.85 t/ha) was 5.14% higher than that under the removal treatment (53.12 t/ha), though the difference was not statistically significant. However, residue retention significantly increased tree root carbon density by 37.23% (from 5.64 to 7.47 t/ha). Carbon densities in the shrub and herb layers also showed increasing trends under residue retention, but not to a significant extent. No significant difference was observed in total soil carbon density (0−60 cm) between the two treatments. However, residue retention significantly increased carbon density in the 0−10 cm surface soil layer by 16.08% (from 22.90 to 26.57 t/ha), while no significant effects were detected in deeper soil layers. [**Conclusion**] Long-term retention of harvest residues is an effective silvicultural practice for synergistically enhancing both vegetation and soil carbon storage in Chinese fir plantations. This practice markedly promote carbon accumulation in tree roots and effectively increase organic carbon storage in surface soil, which holds significant practical value for the sustainable management of plantations under the goal of carbon neutrality.

Key words: carbon density; harvest residues; Chinese fir plantation; carbon sink; synergy/trade-off

人工林生态系统是森林资源的重要组成部分，其面积约占全球森林面积的 7%[1]。作为木材及其他林产品的重要来源，人工林还具有显著的碳汇功能，能够有效调节气候，在应对全球气候变化中发挥着不可替代的作用[2]。然而，在传统林业经营中，人工林管理往往以提高木材生产力为核心目标，通过集约化措施追求木材产出与经济效益的最大化[3]。这种单一目标导向的经营模式可能引发土壤肥力下降、有机碳损失等生态问题。例如，杉木人工林地上生物量持续增加常伴随着土壤有机碳的减少，反映出植被碳和土壤碳之间存在一定的权衡关系[4]。在碳中和国家战略的背景下，如何实现植被碳和土壤碳的协同提升，已成为人工林可持续发展的关键[5]。

采伐剩余物是指人工林采伐过程中未被利用的树枝、树叶和其他植物残体等废弃物[6−7]。这类外源有机质在分解过程中可释放大量养分，改善林木生长环境，进而促进林木生长并提高人工林生产力[8−10]。例如，保留采伐剩余物可提高林分的平均树高和木材总产量[11]。然而，与地上植被碳相比，土壤有机碳对采伐剩余物管理的响应仍存在较大不确定性[12−13]。一方面，采伐剩余物处理可以改变外源有机质输入的数量与质量，增强微生物活性或改变其群落结构，从而加速原有土壤有机质的分解，导致土壤碳损失[14]；另一方面，保留采伐剩余物可为土壤提供丰富的碳源，经微生物作用后形成死亡残体，并与土壤矿物结合，最终稳定储存于长期土壤碳库中，有助于土壤有机碳的积累[15]。因此，如何科学管理实现地上植被碳与地下土壤碳的协同提升，已成为当前林业研究的重要议题。

杉木（*Cunninghamia lanceolata*）是我国南方最主要的人工造林树种，其种植面积达 990 万 hm^2，在木材生产和土壤固碳方面均具有重要作用。然而，随着杉木人工林面积的扩大和连栽代数的增加，地力衰退与碳汇功能减弱等问题日益突出，已引起国内外学者和林业工作者的广泛关注[16−17]。基于此，本研究依托采伐剩余物处理的长期实验平台，旨在量化杉木人工林植被与土壤碳密度，探讨不同采伐剩余物处理方式对地上植被碳库和地下土壤碳库的影响。本研究提出以下假设：(1)保留采伐剩余物可促进杉木人工林林木生长，提高植被碳密度；(2)因

采伐剩余物可提供额外养分输入并影响土壤微环境，其保留也有助于增加土壤碳密度。研究结果可为杉木人工林碳汇经营及可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

本研究在湖南省怀化市中国科学院会同森林生态实验站内杉木人工林进行。试验样地位于26°51′11″N，109°36′42″E。该区域属中亚热带季风湿润气候，年均气温 16.5 ℃(1 月平均气温 1.9 ℃，7 月平均气温 29.0 ℃)，年降水量 1 200 ~ 1 400 mm(雨季集中于 4—8 月)，年蒸发量 1 100 ~ 1 300 mm，全年生长期超过 300 d[18]。自然植被以青冈(*Quercus glauca*)、栲属(*Castanopsis*)和石栎属(*Lithocarpus*)为主的亚热带常绿阔叶林，或白栎(*Quercus fabri*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等为主的次生落叶阔叶林。人工植被以杉木人工林和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林为主。林下植被常见种类包括求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、乌蕨(*Odontosoria chinensis*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)、山姜(*Alpinia japonica*)、蕨类(*Pteridophyta*)、红花檵木(*Loropetalum chinense* var. rubrum)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)和忍冬(*Lonicera japonica*)等。土壤类型为铁铝土纲的典型红壤，土层厚度约 80 ~ 100 cm，pH 值为 4.5 ~ 5.2，表层土壤有机碳含量为 13 ~ 25 g/kg。

1.2 样地设置

本研究试验地前茬为第一代杉木人工林，于 1985 年营造，2007 年采伐。该林分海拔范围为 425 ~ 445 m(样地中心点海拔 435 m)，坡度 15° ~ 25°，林分地位指数为 12 ~ 14，采伐时林龄为 22 年。所用种苗来源于当地杉木种子园的第一代良种，造林及生长期间均未施肥。2007 年皆伐后，采用随机区组设计布置试验，共设 10 个区组(即 10 个重复)。每个区组内设两个 15 m × 15 m 的样方，随机设置为保留采伐剩余物处理和清除采伐剩余物处理。在保留处理中，仅移走具有商业价值的树干，将树梢、枝叶等剩余物均匀平铺于样地，剩余物量约 5 kg/m^2；清除处理则移除整株树木，尽量不破坏地表，并清走所有采伐剩余物。同一区组内两样方的海拔、坡度等立地条件基本一致。2008 年春季营造第二代杉木人工林，在各样方内栽植苗高与地径相近的 1 年生杉木裸根苗，苗木来自当地第二代改良种子园。造林密度为 2 500 株/hm^2，株行距为 2.0 m × 2.0 m。除本试验设置的采伐剩余物处理外，林分未实施间伐、施肥等其他经营措施。

1.3 样品采集

2022 年 7 月，在各处理样方内进行每木检尺，测定每株乔木的胸径和树高，记录树种，并依据相应树种的生物量方程[19]计算乔木层各组分(干、枝、叶、根)的生物量。灌木和草本生物量采用全收获法测定：在每个样方内随机设置 3 个 1 m × 1 m 小样方，记录主要种类后，将全部灌草植株收获，灌木分根、茎、叶称质量，草本分地上与地下部分称质量，各取 100 g 样品带回实验室，65 ℃ 烘干至质量恒定，计算含水率并推算各器官生物量。凋落物现存量测定：灌草取样小样方内设置 0.5 m × 0.5 m 小框，收集全部凋落物称质量后，烘干法得到干质量。

土壤取样在每个样方内随机设 5 个取样点，按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 分层取样，将 5 个样品分层混合为一个混合样品。样品立即带回实验室，挑出直径 < 2 mm 的细根，清洗后 105 ℃ 杀青 30 min，65 ℃ 烘干至质量恒定。土壤样品剔除砾石等杂质，过 2 mm 筛后风干，用于有机碳测定。土壤容重采用环刀法测定：将内径 5 cm 环刀垂直压入土中至与下沿齐平，带回实验室称质量，105 ℃ 烘干至质量恒定后计算容重。

1.4 杉木人工林碳密度计算方法

植被和土壤碳含量测定：将烘干的植物样品和土壤样品用球磨仪磨成粉末，过 0.25 mm 筛，包样后用碳氮元素分析仪测定。

植被层碳密度计算公式为

$$D_c = BR_c \tag{1}$$

式中：D_c 为某种林分某一层碳密度，t/hm^2；B 为某种林分某一层生物量，t/hm^2；R_c 为某种林分某一层碳含量。

土壤碳密度计算公式为

$$D_s = \sum_{i=1}^{n} R_i H_i \frac{\theta^i}{10} \tag{2}$$

式中：D_s 为土壤碳密度，t/hm^2；R_i 为第 i 层土壤容重，g/cm^3；H_i 为第 i 层土壤碳含量，θ^i 为第 i 层采样深度，cm。

1.5 统计分析

统计分析前使用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene's 检验来检验数据的正态性和方差齐性，如果数据不满足正态分布，对数据进行对数转换。利用单因素方差分析来评估不同采伐剩余物处理方式对乔木层、灌木层、草本层和凋落物层以及土壤碳密度的影响，显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$。所有数据分析在 SPSS 25.0 上进行，绘图通过 Origin 2021 完成。

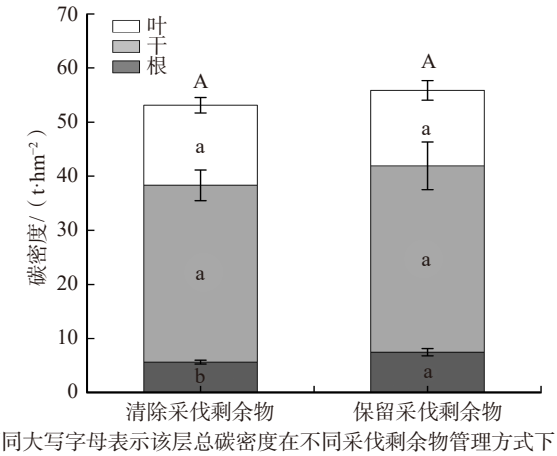
2　结果与分析

2.1　采伐剩余物处理对植被碳密度的影响

清除采伐剩余物处理下，乔木的平均胸径为（6.37 ± 0.38）cm，平均树高为（6.44 ± 0.27）m，保留密度为（2 317 ± 168）株/hm^2；而保留采伐剩余物处理下，相应数值分别为（7.71 ± 0.34）cm，（6.94 ± 0.40）m 和（2 253 ± 196）株/hm^2。乔木层总碳密度从清除采伐剩余物处理的 53.12 t/hm^2 增至保留处理下的 55.85 t/hm^2，增幅为 5.14%，但差异未达到显著性水平（$p > 0.05$，图 1）。各器官碳密度呈现干 > 叶 > 根的分布格局。与清除处理相比，保留采伐剩余物显著增加了乔木根的碳密度（$p < 0.05$，图 1），从 5.64 t/hm^2 增至 7.47 t/hm^2，增幅达 37.23%。然而，两种处理间乔木干和叶碳密度均无显著差异（$p > 0.05$）。

进一步对灌木层和草本层的碳密度进行分析发现，保留处理下灌木层碳密度（272.44 kg/hm^2）较清除处理（236.38 kg/hm^2）虽有增加，但增幅不显著（$p > 0.05$）。器官尺度上，清除处理下叶、茎和根的碳密度分别为 60.33、86.81 和 89.24 kg/hm^2；保留处理下各器官碳密度略有上升，分别为 61.06、94.27 和 117.12 kg/hm^2，但均无显著差异（$p > 0.05$，图 2）。

采伐剩余物处理对草本层碳密度无显著影响（$p > 0.05$）。清除处理下草本层碳密度为 167.98 kg/hm^2，保留处理下为 187.63 kg/hm^2。从结构组成来看，清除处理中地上和地下部分碳密度分别为 67.06 和 100.92 kg/hm^2；保留处理下分别为 67.57 和 120.06 kg/hm^2，虽略有提高，但差异不显著（图 3）。两种处理间整体植被层碳密度亦无显著差异（$p > 0.05$），清除处理下植被层碳密度为 53.53 t/hm^2，保留处理下为 56.31 t/hm^2（图 4）。



不同大写字母表示该层总碳密度在不同采伐剩余物管理方式下的差异显著（$p < 0.05$），不同小写字母表示相同组成部分碳密度在不同采伐剩余物管理方式下的差异显著（$p < 0.05$）。下同。

图 1　采伐剩余物处理对乔木层碳密度的影响

Fig. 1　Effects of harvest residue management on carbon density in tree layer

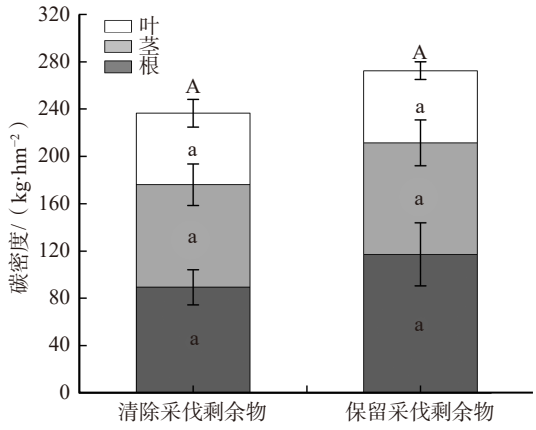


图 2　采伐剩余物处理对灌木层碳密度的影响

Fig. 2　Effects of harvest residue management on carbon density in shrub layer

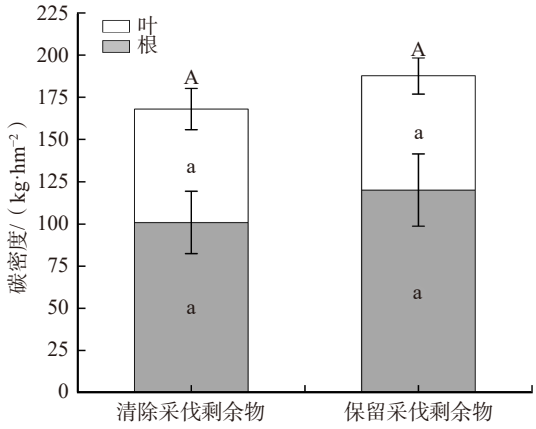


图 3　采伐剩余物处理对草本层碳密度的影响

Fig. 3　Effects of harvest residue management on carbon density in herb layer

2.2　采伐剩余物处理对凋落物层碳密度和土壤碳密度的影响

采伐剩余物处理对凋落物层碳密度无显著性影响。清除处理下凋落物层碳密度为 1.94 t/hm^2，保留

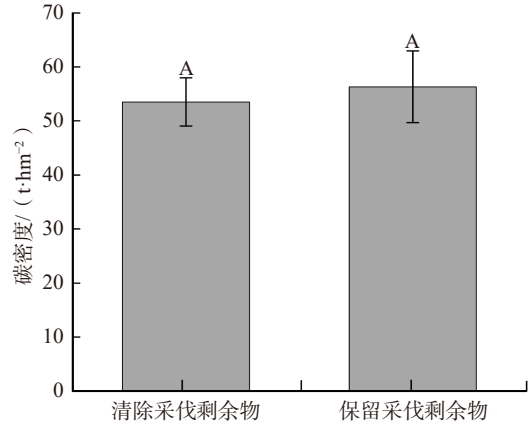


图 4　采伐剩余物处理对植被层碳密度的影响

Fig. 4　Effects of harvest residue management on carbon density in vegetation layer

处理下为 1.90 t/hm^2(图 5)。土壤碳密度方面，清除处理下为 75.45 t/hm^2，保留处理下为 79.05 t/hm^2，两者无显著差异。然而，与清除处理相比，保留采伐剩余物显著提高了 0 ~ 10 cm 土层的碳密度($p < 0.05$)，从 22.90 t/hm^2 增至 26.57 t/hm^2，增幅为 16.08%。而 10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 及 40 ~ 60 cm 土层清除和保留剩余物间的碳密度无显著差异(图 6)。

3 讨　论

尽管两种处理间的植被碳密度未达到显著差异水平，但在保留采伐剩余物的条件下，乔木层、灌木层和草本层的植被碳密度均呈现上升趋势，表明该处理方式可促进植被碳的积累。特别是在乔木根系方面，相较于清除采伐剩余物处理，保留处理显著提高了其碳密度。采伐剩余物在林地自然分解时会释放出大量氮、磷、钾等营养物质[20]。这些养分经土壤微生物分解与转化后更易被植物根系吸收，从而促进乔木根系的生长发育，增加根系生物量，最终提升

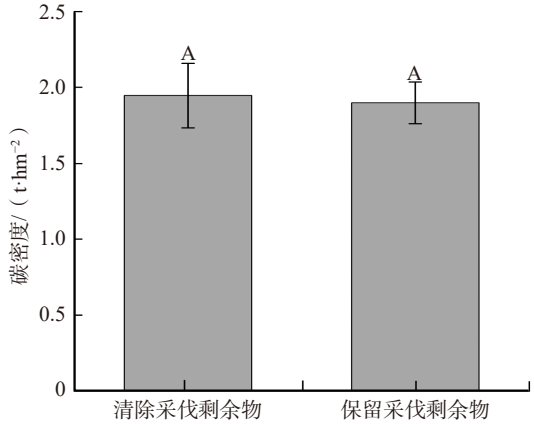


图 5　采伐剩余物处理对凋落物层碳密度的影响

Fig. 5　Effects of harvest residue management on carbon density in litter layer

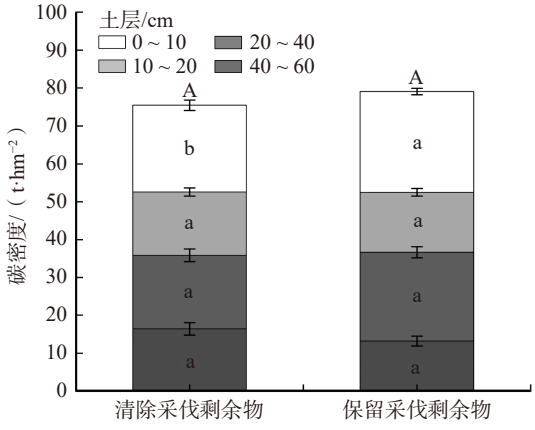


图 6　采伐剩余物处理对不同深度土壤碳密度的影响

Fig. 6　Effects of harvest residue management on carbon density in different soil depths

乔木根碳密度[21]。此外，保留在地表的采伐剩余物可有效减缓雨水对土壤的直接冲刷，降低土壤侵蚀强度，减少养分流失。同时，随着剩余物的分解，土壤有机质含量显著提高，改善了土壤结构，增强了通气性与透水性，为乔木根系的呼吸与扩展创造更适宜的物理环境，进而促进根系碳积累[22]。

与清除采伐剩余物相比，保留采伐剩余物显著提高了表层土壤的碳密度。凋落物和根系是土壤有机碳的重要来源[23−24]。在本研究中，保留采伐剩余物显著增加了外源植物碳的输入。研究表明，外源植物碳在分解过程中可通过物理转移途径在土壤中稳定存在[25−26]，从而在一定程度上提高土壤碳密度。尽管本研究未观察到处理间现存凋落物量的显著差异，这可能是由于试验已持续 14 年，早期残留的采伐剩余物大多已分解或转化为土壤有机质。因此，表层土壤有机碳密度的增加可能部分源于采伐剩余物分解的遗留效应。另一方面，植物根系分布具有高度的可塑性，会主动趋向资源丰富的土壤层次[27]。凋落物层作为养分和水分等资源的富集区，已被广泛证实能够驱动细根生物量向表层土壤聚集[22, 28]。基于本研究的样地，Yang 等[18]发现，与清除采伐剩余物处理相比，保留采伐剩余物处理下表层土壤的细根生物量显著提高了 76%，这可能与采伐剩余物保留诱导的“根系表层化”效应有关。与凋落物相比，植物根系在土壤有机碳形成中贡献更为显著，更有利于土壤碳的积累[29−30]。因此，由保留采伐剩余物所驱动的细根生物量增加，可能是表层土壤碳密度提升的另一重要原因。

本研究进一步表明，采伐剩余物处理对土壤碳密度的影响主要集中在表层，其原因主要包括：与亚表层相比，采伐剩余物作为外源碳输入直接作用于表层土壤，成为其有机碳的主要来源；同时，根系在生长、死亡和分泌过程中也向表层输入大量有机物质，进一步促进该层碳的积累[31]。而亚表层土壤由于距离碳输入源较远，凋落物和根系分泌物在向下迁移过程中数量和质量均显著衰减，导致其有机质相对匮乏，受干扰程度较低[32−33]。与深层土壤相比，表层土壤具备更适宜微生物生长与活动的环境条件：在温度方面，表层土壤直接与大气进行热量交换，温度更为适宜；在湿度方面，表土更易接收降水补给，且通气性良好，有助于维持适宜的土壤湿度；此外，丰富的植物残体输入为微生物提供了充足的碳源、氮源和其他营养物质。这些条件共同促使表层土壤中微生物保持较高的活性和生物量，加快其周转过程，从而更有效地促进有机碳的积累[34−35]。

4 结　　论

本研究基于杉木人工林采伐剩余物管理长期试验证实，保留采伐剩余物是促进人工林植被碳与土壤碳协同提升的有效经营措施。在植被碳方面，虽然林分总碳密度未达显著差异水平，但保留采伐剩余物使乔木层、灌木层与草本层碳密度均呈增加趋势，并显著提高了乔木根碳密度（增幅 37.23%）。这表明该措施有助于促进林木生长，尤其有利于地下部分碳积累。在土壤碳方面，尽管全土层总碳密度差异不显著，但保留处理显著提高了 0～10 cm 表层土壤的碳密度（增幅 16.08%）。综上所述，保留采伐剩余物通过增加外源碳输入，在维持植被碳积累的同时有效增强表层土壤的固碳能力，为杉木人工林植被−土壤系统碳汇功能协同提升提供了可行的经营路径，对推进人工林在碳中和目标下的可持续经营具有重要实践意义。

参　考　文　献

[1] Geng J, Cheng S, Fang H, et al. Nitrogen fertilization changes the molecular composition of soil organic matter in a subtropical plantation forest [J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84(1): 68−81.

[2] Luo R, Kuzyakov Y, Zhu B, et al. Phosphorus addition decreases plant lignin but increases microbial necromass contribution to soil organic carbon in a subalpine forest [J]. Global Change Biology, 2022, 28(13): 4194−4210.

[3] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 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, 2018, 38(1): 1−10.
Liu S R, Yang Y J, Wang H. 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 Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1−10.

[4] Chen L C, Wang H, Yu X, et al. Recovery time of soil carbon pools of conversional Chinese fir plantations from broadleaved forests in subtropical regions, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 587−588: 296−304.

[5] 刘世荣, 王晖, 李海奎, 等. 碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇变化预估与潜力提升途径 [J]. 林业科学, 2024, 60(4): 157−172.
Liu S R, Wang H, Li H K, et al. Projections of China's forest carbon storage and sequestration and ways of their potential capacity enhancement [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(4): 157−172.

[6] Deng L, Han Q S, Zhang C, et al. Above-ground and below-ground ecosystem biomass accumulation and carbon sequestration with *Caragana korshinskii* Kom plantation development [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(3): 906−917.

[7] Wan X, Xiao L, Vadeboncoeur M A, et al. Response of mineral soil carbon storage to harvest residue retention depends on soil texture: a meta-analysis [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 408: 9−15.

[8] Premer M I, Froese R E, Webster C R, et al. Vegetation response to logging residue removals in Great Lakes aspen forests:long-term trends under operational management [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 382: 257−268.

[9] 孙志虎, 毕永娟, 牟长城, 等. 基于 FORECAST 模型的长白落叶松人工林经营措施对长期生产力的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(6): 1−6.
Sun Z H, Bi Y J, Mu C C, et al. Using an ecosystem simulation model FORECAST to evaluate the effects of forest management strategies on long-term productivity of Korean larch plantations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(6): 1−6.

[10] 王伟峰, 魏晓华, 段玉玺, 等. 采伐剩余物处理方式对杉木人工林固碳量的长期影响 [J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 198−203.
Wang W F, Wei X H, Duan Y X, et al. Long-term effects of logging residue treatment on carbon sequestration in Chinese fir plantation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 198−203.

[11] Huong V D, Nambiar E S, Quang L T, et al. Improving productivity and sustainability of successive rotations of *Acacia auriculiformis* plantations in South Vietnam [J]. Southern Forests: a Journal of Forest Science, 2015, 77(1): 51−58.

[12] Hu Z, He Z, Huang Z, et al. Effects of harvest residue management on soil carbon and nitrogen processes in a Chinese fir plantation [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 326: 163−170.

[13] Huang Z, Clinton P W, Davis M R. Post-harvest residue management effects on recalcitrant carbon pools and plant biomarkers within the soil heavy fraction in *Pinus radiata* plantations [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(2): 404−412.

[14] Zhu G, Qiu D, Zhang Z, et al. Land-use changes lead to a decrease in carbon storage in arid region, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 127: 107770.

[15] Oliveira F C C, Ferreira G W D, Dungait J A J, et al. Eucalypt harvest residue management influences microbial community structure and soil organic matter fractions in an afforested grassland [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205: 104787.

[16] 陈龙池, 汪思龙, 陈楚莹. 杉木人工林衰退机理探讨 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1953−1957.
Chen L C, Wang S L, Chen C Y. Degradation mechanism of Chinese fir plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1953−1957.

[17] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 1−14.
Sheng W T. On the maintenance of long-term productivity of plantation in China [J]. Forest Research, 2018, 31(1): 1−14.

[18] Yang J, Huang K, Guan X, et al. Retention of harvest residues promotes the accumulation of topsoil organic carbon by

increasing particulate organic carbon in a Chinese fir plantation [J]. Forest Ecosystems, 2024, 11: 100229.

[19] 梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力 [J]. 生态学杂志, 2016(4): 896−902.
Liang M J, Chen L C, Wang S L. The allocation pattern of carbon storage and carbon sequestration potential in Chinese fir plantation ecosystems in Hunan Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016(4): 896−902.

[20] Mendham D S, O'Connell A M, Grove T S, et al. Residue management effects on soil carbon and nutrient contents and growth of second rotation eucalypts [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 181(3): 357−372.

[21] Ussiri D A N, Johnson C E. Organic matter composition and dynamics in a northern hardwood forest ecosystem 15 years after clear-cutting[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 240(1−3): 131−142.

[22] Sayer E J, Tanner E V J, Cheesman A W. Increased litterfall changes fine root distribution in a moist tropical forest [J]. Plant and Soil, 2006, 281(1): 5−13.

[23] Ridgeway J, Kane J, Morrissey E, et al. Roots selectively decompose litter to mine nitrogen and build new soil carbon [J]. Ecology Letters, 2024, 27(1): e14331.

[24] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, et al. Formation of soil organic matter *via* biochemical and physical pathways of litter mass loss [J]. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 776−779.

[25] Yang Q, Li R, Zhang W, et al. Decomposition of harvest residue needles of different needle ages in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation [J]. Plant and Soil, 2018, 423(1): 273−284.

[26] Sun T, Dong L, Zhang Y, et al. General reversal of N-decomposition relationship during long-term decomposition in boreal and temperate forests [J]. PNAS, 2024, 121(20): e2401398121.

[27] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108(3): 389−411.

[28] Zha L, Jin W, Fang G, et al. Long-term residue retention affects seedcotton yield by regulating distribution of photosynthetic carbon, boll capacity of the root system and soil quality [J]. Field Crops Research, 2023, 303: 109120.

[29] Rillig M C, Aguilar-Trigueros C A, Bergmann J, et al. Plant root and mycorrhizal fungal traits for understanding soil aggregation [J]. The New Phytologist, 2015, 205(4): 1385−1388.

[30] Sokol N W, Bradford M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input [J]. Nature Geoscience, 2019, 12: 46−53.

[31] Walmsley J D, Jones D L, Reynolds B, et al. Whole tree harvesting can reduce second rotation forest productivity [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(3): 1104−1111.

[32] Antony D, Collins C D, Clark J M, et al. Soil organic matter storage in temperate lowland arable, grassland and woodland topsoil and subsoil [J]. Soil Use and Management, 2022, 38(4): 1532−1546.

[33] Dorji T, Odeh I O A, Field D J. Vertical distribution of soil organic carbon density in relation to land use/cover, altitude and slope aspect in the eastern Himalayas [J]. Land, 2014, 3(4): 1232−1250.

[34] He M, Fang K, Chen L, et al. Depth-dependent drivers of soil microbial necromass carbon across Tibetan Alpine grasslands [J]. Global Change Biology, 2022, 28(3): 936−949.

[35] Maestre F T, DelgadSokolo-Baquerizo M, Jeffries T C, et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands [J]. PNAS, 2015, 112(51): 15684−15689.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 臧润国）