

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.013

论文标题： 择伐强度对长白落叶松人工林下凋落物现存量及土壤理化性质的影响

作　　者： 杨 贺，刘 盛，李国伟，等

收稿日期： 2025-07-04

引文格式： 杨贺,刘盛,李国伟,等.择伐强度对长白落叶松人工林下凋落物现存量及土壤理化性质的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):133-142,215.

Yang H, Liu S, Li G W, et al. Effects of selective cutting management on standing litter and soil physicochemical properties under *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):133-142,215.

相关论文推荐

Recommended articles

氮添加对华北落叶松人工林土壤和凋落物酶活性的影响

Effect of nitrogen addition on soil and litter enzyme activity in a *Larix principis-rupprechtii* plantation

凋落物添加对不同龄级杉木林土壤养分与微生物特性的影响

Effects of litter additions on the soil nutrients and microbial properties in *Cunninghamia lanceolata* plantations of different stand ages

凋落物处理对南亚热带枫香人工林土壤碳氮矿化耦合的影响

Influences of litter management on soil carbon and nitrogen mineralization coupling in the south subtropical *Liquidambar formosana* plantation

滇中亚高山4种典型林分凋落物归还及养分动态变化特征

Characteristics of litter return and nutrient dynamic change in four typical forests in the subalpine of central Yunnan Province

4种落叶松人工林凋落物分解与养分释放动态特征

Dynamic characteristics of litter decomposition and nutrient release in 4 species of *Larix* plantations

大兴安岭雷击火火烧迹地凋落物有机质动态及其影响因素

Dynamics of organic matter in litter and its influencing factors in the burned area of lightning fires in Daxing'anling mountains

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.013
http: //qks.csuft.edu.cn

择伐强度对长白落叶松人工林下凋落物现存量及土壤理化性质的影响

杨　贺，刘　盛，李国伟，刘庆忠，何　箭，孙晓菲
（北华大学 林学院，吉林 吉林 132013）

摘　要：【目的】明确择伐强度、凋落物现存量与土壤理化性质间的关联，为落叶松人工林的可持续经营及土壤肥力维持提供理论与技术支撑。【方法】选取立地条件基本一致的长白落叶松人工林，于 2018 年按蓄积量进行了不同强度（25%、35%、45%）的择伐作业，并设置未择伐为对照，随后在各择伐强度的林分内分别设置了 3 块固定样地，于择伐经营 5 a 后的 2023 年 8 月，在各样地内对凋落物的覆盖厚度和现存量、土壤理化性质进行调查，通过单因素方差分析、Mantel 分析和结构方程模型构建，对不同择伐强度下凋落物覆盖厚度、现存量及土壤理化性质的变化和其相互间的关系进行研究。【结果】择伐经营 5 a 后，25%、35%、45% 择伐强度下凋落物覆盖厚度与对照林分相比分别减小 17.4%、30.3%、31.0%；未分解层厚度仅在 35%、45% 择伐强度下与对照林分相比分别减小 32.7%、36.1%；半分解层厚度在 25%、35%、45% 择伐强度下与对照林分相比分别减小 25.7%、44.2%、43.4%。高强度择伐（45%）对 0 ～ 10 cm 土层的土壤容重影响较大，与对照组相比减小 17.7%；中弱强度择伐（35%、25%）对 20 ～ 40 cm 土层的土壤容重影响较大，与对照林分相比分别减小 15.0%、11.0%。土壤含水率在高强度（45%）的择伐后较对照林分分别增大 40.8%（0 ～ 10 cm）、21.8%（10 ～ 20 cm）、18.7%（20 ～ 40 cm）。0 ～ 40 cm 土层中土壤紧实度最大值在不同择伐强度下表现从大到小依次为对照林分（785.0 kPa）、25% 择伐强度（724.4 kPa）、45% 择伐强度（525.6 kPa）、35% 择伐强度（503.9 kPa）。中等强度的择伐（35%）下，0 ～ 10 cm 土层土壤 pH 值和全氮、全磷、有机质碳、水解性氮含量与对照组相比分别提高 5.5%、21.7%、39.8%、45.4%、51.3%。高强度（45%）的择伐下，0 ～ 10 cm 土层土壤速效钾、速效磷含量与对照组相比分别提高 30.0%、60.4%。通过结构方程模型拟合结果发现，择伐经营可以直接对土壤含水率、土壤化学性质产生显著的正向影响，对土壤容重、凋落物覆盖厚度、凋落物现存量产生显著的负向影响；凋落物覆盖厚度和现存量对土壤化学性质间接产生显著负向影响。【结论】择伐经营能显著减少林地表面凋落物堆积，改善林分内微环境，有利于地表落叶松针叶等凋落物的分解。在中高强度（35%、45%）的择伐后，能够加速凋落物的分解，有效促进土壤养分循环，对维持土壤肥力和预防土壤酸化有重要作用。

关键词：择伐经营；凋落物；土壤理化性质；结构方程模型
中图分类号：S752.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0133-10

Effects of selective cutting management on standing litter and soil physicochemical properties under *Larix olgensis* plantation

Yang He, Liu Sheng, Li Guowei, Liu Qingzhong, He Jian, Sun Xiaofei

(Collage of Forestry, Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China)

Abstract:【Objective】To provide theoretical and technical support for the sustainable management and soil fertility maintenance of larch plantations.【Method】*Larix olgensis* plantations with basically the same site conditions were selected. In 2018, selective cutting operations with different intensities (25%, 35% and 45%) were carried out according to the stock volume, and non-selective cutting was

收稿日期（Received）：2025-07-04　　**修订日期**（Revised）：2025-08-24
基金项目：国家“十四五”重点研发计划项目（2023YFD2200802）。
第一作者：杨贺（913371289@qq.com），硕士研究生。　　**通信作者：**刘盛（shliu64@sina.com），教授，博士研究生导师。
引文格式：杨贺 , 刘盛 , 李国伟 , 等 . 择伐强度对长白落叶松人工林下凋落物现存量及土壤理化性质的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7):133-142,215.
Yang H, Liu S, Li G W, et al. Effects of selective cutting management on standing litter and soil physicochemical properties under *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):133-142,215.

set as the control. Subsequently, three fixed sample plots were set up in the stands with different selective cutting intensities. In August 2023, after five years of selective cutting operation, the coverage thickness, standing stock, soil physical and chemical properties of litters were measured in each plot. Through single factor analysis of variance, Mantel analysis and structural equation modeling, the changes of litter cover thickness, standing stock and soil physical and chemical properties under different selective cutting intensities and their relationships were studied.【Result】After 5 years of selective cutting, the litter cover thickness decreased by 17.4%, 30.3%, and 31.0% at 25%, 35% and 45% selective cutting intensities, respectively, compared to the control stand. The undecomposed litter layer thickness decreased by 32.7% and 36.1% at 35% and 45% selective cutting intensities, respectively, compared to the control stand. The semi-decomposed litter layer thickness decreased by 25.7%,44.2%, and 43.4% at 25%,35%, and 45% selective cutting intensities, respectively, compared to the control stand.High-intensity selective cutting (45%) significantly reduced soil bulk density in the 0-10 cm layer by 17.7% compared to the control. Moderate-intensity selective cutting (35% and 25%) also reduced soil bulk density in the 20-40 cm layer, with reductions of 15.0% and 11.0% respectively. Soil moisture content increased by 40.8% (0-10 cm), 21.8% (10-20 cm), and 18.7% (20-40 cm) after high-intensity selective cutting compared to the control.The maximum soil compaction degree in 0-40 cm soil layer was 785.0 kPa in control forest,724.4 kPa in 25% selective cutting forest, 525.6 kPa in 45% selective cutting forest and 503.9 kPa in 35% selective cutting forest. Under the moderate selective cutting (35%), the soil pH, total nitrogen, total phosphorus, organic carbon and hydrolyzable nitrogen in the 0-10 cm soil layer increased by 5.5%, 21.7%, 39.8%, 45.4% and 51.3% respectively compared with the control.Under the high intensity (45%) selective cutting, the contents of available potassium and available phosphorus in the 0-10 cm soil layer increased by 30.0% and 60.4% respectively compared with the control. The results of structural equation modeling showed that selective cutting had a significant positive effect on soil moisture content and soil chemical properties, and a significant negative effect on soil bulk density, litter cover and litter stock, and also had a significant negative effect on soil chemical properties through changing litter cover and litter stock.【Conclusion】Selective cutting management can significantly reduce the accumulation of litter on the surface of forest land, improve the microenvironment in the stand, and be beneficial to the decomposition of litter such as larch needles on the surface. After selective cutting with medium and high intensity (35%, 45%), it can accelerate the decomposition of litter, effectively promote the circulation of soil nutrients, and play an important role in maintaining soil fertility and preventing soil acidification.

Keywords: management selection cutting; litter; soil physicochemical properties; structural equation model

长白落叶松 *Larix olgensis* 是一种对生境条件有较强适应能力的速生针叶树种 [1]。从 20 世纪六七十年代开始，我国东北林区陆续营造了大量的长白落叶松人工林，使得长白落叶松成为我国东北地区三大针叶用材树种之一 [2-3]。

凋落物作为植物器官组织自然枯死落到地面的一部分，紧贴土壤，具有吸水和保温的功能 [4]，对森林的水源涵养功能和促进林分更新具有重要作用。有研究表明，凋落物的覆盖厚度显著影响土壤含水量并减缓土壤水分的流失 [5]；同时，植物体的营养物质通过凋落物返还到土壤，其分解后能显著提升土壤的养分含量，维持土壤养分循环 [6]。凋落物现存量是凋落物输入量与分解量的净累积量 [7]。以往研究结果发现，林分密度对凋落物现存量存在显著影响，过高的间伐强度不利于其积累，且凋落物现存量会显著影响土壤的理化性质 [8]。然而，在落叶松人工林的经营过程中发现，相较于阔叶树种，针叶树种凋落物养分更为贫瘠，油脂和酸不溶性组分含量均更高 [9]，有机质分解不充分，易导致土壤酸化 [10]。此外，单一大量针叶掉落物覆盖林地，加之林分内光照利用效率和土壤温度较低 [11]，不利于营养元素循环和土壤肥力保持，易造成林地土壤肥力退化。与单一种植物体的凋落物相比，多种植物体的凋落物分解速度更快，对土壤养分的提升效果更大 [12]，同时土壤水分、C、N 元素等也能通过促进微生物生长，进一步加速凋落物的分解 [13]。

择伐经营作为一种有效的林分结构调节手段，能释放林分内竞争压力，促进林分的健康生长 [14]。研究不同择伐强度下落叶松人工林的凋落物现存量及土壤理化性质的变化，能够帮助我们识别最佳的择伐管理策略。对于择伐经营，凋落物现存量和土壤理化性质间的相互关系，难以通过简单的相关性计算结果来说明。通过结构方程模型分析择伐经营对凋落物现存量和土壤肥力的影响，可筛选出有利于减少凋落物积累、促进凋落物分解、维持土壤肥力并提升林分生产力的最佳择伐强度 [15]，为落叶松人工林的可持续经营及土壤肥力维持提供理论和实践依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

试验样地位于吉林省白山市桦树镇临江林业局桦树林场 48 号林班（41°57′48″ ～ 42°57′59″N，126°16′47″ ～ 126°16′51″E）。地处鸭绿江流域上

游，临近松花江支流，东部与抚松县漫江镇接壤，南部与蚂蚁河乡相连，西部与闹枝镇、白山市江源区松树镇毗邻，北部与抚松县仙人桥镇交界。桦树镇属典型的长白山熔岩台地地貌，地势南高北低，地貌沟谷交错，绵亘起伏；最高海拔青山主峰 1 420 m，境内平均海拔 865 m，主要山脉有龙岗、青山、杨木顶子山脉；土壤类型主要为暗棕壤，富含腐殖质。该地属温带大陆性季风气候，植物资源丰富，处于长白山温带针阔混交林带，森林覆盖率 90% 以上，是吉林省重要的木材生产基地之一。

1.2　样地设置

本试验选取了立地条件基本一致的长白落叶松人工林，于 2018 年按蓄积量进行了不同强度（25%、35%、45%）的择伐作业。择伐前林分密度基本一致，为（1 300±30）株 /hm^2。择伐后随即在各择伐强度的林分内分别设置了 3 块固定样地，并在未经择伐经营的林分内设置了 3 块对照样地，样地大小均为 30 m×30 m，共 12 块样地。样地基本信息见表 1。

表 1　各样地基本信息表
Table 1　Basic Information of sample plots

择伐强度 Selective cutting intensity /%	样地号 Plot No.	坡向 Aspect	坡度 Slope /(°)	坡位 Slope position	林分平均胸径 Stand DBH /cm	林分平均树高 Stand height /m	林分密度 Stand density /（株·hm^{-2}）
25	Z1-1	北	14	下	19.9	20.3	920
	Z1-2	北	16	中下	21.7	18.5	911
	Z1-3	西北	15	上	21.1	21.4	900
35	Z2-1	北	15	下	22.2	19.7	831
	Z2-2	北	15	中	21.7	19.3	850
	Z2-3	北	14	上	21.3	19.0	859
45	Z3-1	北	14	下	20.7	20.1	711
	Z3-2	北	16	中	20.3	20.2	767
	Z3-3	北	15	中上	19.8	20.3	700
0	ZD-1	北	16	中	19.9	20.3	1 289
	ZD-2	北	15	中	19.3	19.5	1 333
	ZD-3	北	15	上	18.2	19.9	1 267

1.3　研究方法

1.3.1　凋落物现存量调查

择伐 5 a 后，在每块样地的 4 个顶点和样地中心分别设立了 1 m×1 m 的调查样方，在各调查样方内随机选取一个 30 cm×30 cm 大小的枯落物取样点，共 60 个凋落物取样点。在各凋落物取样点上测量枯落物未分解层和半分解层厚度，并将取样点上方未分解的枯落物收获到纸袋中，带回实验室分成草本植物凋落物和针叶凋落物（长白落叶松），烘干后称量其各自干质量，得到凋落物现存量数据。

1.3.2　土壤理化性质的测定

凋落物现存量调查结束后，在取样点下方利用 SC-900 数显式土壤紧实度仪（Spectrum Technologies，美国）测量每个取样点下方 0 ～ 40 cm 土层的土壤紧实度，每个样方内随机测定 3 组 [16]。土壤紧实度测量完成后，利用环刀法 [17] 分别取 0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 40 cm 土层的土样并称量其湿土质量并记录，然后带回实验室烘干后测量干土质量，得到其物理性质指标（含水率、容重）。再取同一样地同一土层的 5 个土壤样品混合成 1 个土样，带回实验室用于测定土壤化学性质。

测定指标包括土壤酸碱度和有机碳（重铬酸钾氧化 - 外加热法）、全氮（凯氏定氮）、全磷（碱熔 - 钼锑抗比色法）、土壤全钾（碱熔 - 火焰光度计法）、有效磷（比色法）、速效钾（乙酸铵浸提法）、水解性氮（碱解扩散法）含量 [18]。

1.4　数据处理

对调查和试验测得的数据通过 Excel 2021 软件进行分类和汇总。利用 R4.3.2 软件中的“ggpubr”包和“rstatix”包对不同择伐强度下凋落物现存量和土壤理化性质进行单因素方差分析（One-way analysis of variance，ANOVA），检验差异显著性，并采用 LSD 法进行多重比较。为了分析择伐经营下凋落物现存量与土壤理化性质的关系，利用“vegan”包进行 Pearson 相关分析，并对凋落物现存量与土壤理化性质进行冗余分析（Redundancy

analysis，RDA）。利用“LinkET”包对冗余分析结果进行 Mantel 检验分析，进一步分析凋落物现存量与土壤理化性质的关系。利用“corrplot”包进行相关性分析。上述分析结果均通过“ggplot2”包进行绘图。

在此基础上，为进一步分析择伐经营对凋落物现存量与土壤理化性质的影响，以及二者之间的相互关系，本研究通过 RDA[19] 和 Mantel 分析[20] 筛选出凋落物现存量与土壤理化性质中相关性较强的因子，再利用“lavaan”包对筛选出的因子构建结构方程模型（Structural equation model，SEM）。SEM 作为一种多变量的统计方法，能够有效量化和验证各变量间的直接和间接关系[21]，最终通过模型拟合结果，明确择伐经营对凋落物现存量和土壤理化性质的影响。

2　结果与分析

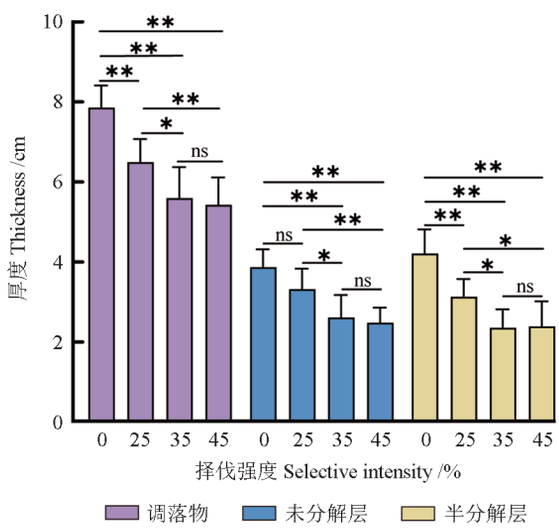
2.1　不同择伐强度对凋落物的影响

2.1.1　凋落物覆盖厚度的变化

如图 1 所示，各择伐强度的林分内地表凋落物覆盖厚度与对照林分相比均存在显著差异（$P < 0.05$），25%、35%、45% 择伐强度的林分凋落物覆盖厚度分别比对照林分减少 17.4%、30.3%、31.0%。凋落物未分解层厚度除在择伐强度为 25% 时外，与对照林分相比均存在显著差异；35% 和 45% 择伐强度下，凋落物未分解层厚度与对照林分相比分别减小 32.7%、36.1%。凋落物半分解层厚度在 25%、35%、45% 择伐强度的林分下与对照林分相比分别减小 25.7%、44.2%、43.4%。但凋落物覆盖厚度、未分解层厚度、半分解层厚度在 35% 和 45% 择伐强度的林分内相比无显著差异。随着择伐强度的增大，林分地表凋落物覆盖厚度、未分解层厚度和半分解层厚度基本上逐渐减小。弱强度择伐（25%）对凋落物未分解层影响较小，中高强度择伐（35%、45%）对凋落物未分解层和半分解层厚度的影响较大；当择伐强度大于 35% 时，凋落物层厚度变化量减小。

2.1.2　凋落物现存量的情况

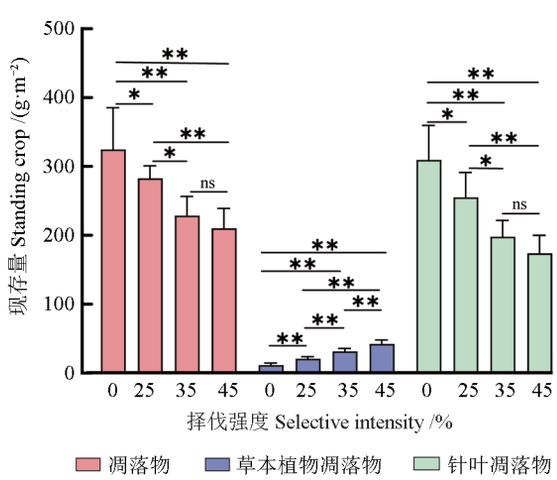
如图 2 所示，不同择伐强度经营 5 a 后，林分内凋落物现存量随着择伐强度的增大逐渐减小；25%、35%、45% 择伐强度下，凋落物现存量分别小于对照林分的 15.9%、32.9%、38.3%；当择伐强度大于 35% 后，凋落物现存量变化量减小。草本植物凋落物现存量随着择伐强度的增大逐渐增大，在 25%、35%、45% 择伐强度下草本植物凋落物现存量分别为对照林分的 1.79 倍、2.73 倍、3.57 倍。针叶凋落物现存量随着择伐强度的增大逐渐减小，在 25%、35%、45% 择伐强度下分别小于对照林分的 14.8%、33.9%、47.6%；当择伐强度大于 35% 后，针叶凋落物现存量变化不显著。不同强度的择伐经营对林分内凋落物现存量的影响有差异：弱强度择伐（25%）对凋落物现存量的影响较小；高强度择伐（45%）能显著增加草本植物凋落物现存量，但对针叶凋落物现存量的减少作用与中等强度择伐（35%）下相比无显著差异。



ns. $P > 0.05$; *. $0.01 < P \leqslant 0.05$; **. $P \leqslant 0.01$.

图 1　不同择伐强度经营 5 a 后的凋落物覆盖厚度情况

Fig. 1　Litter coverage thickness after 5 years of management with different selective cutting intensities



ns. $P > 0.05$; *. $0.01 < P \leqslant 0.05$; **. $P \leqslant 0.01$.

图 2　不同择伐强度经营 5 a 后的凋落物现存量情况

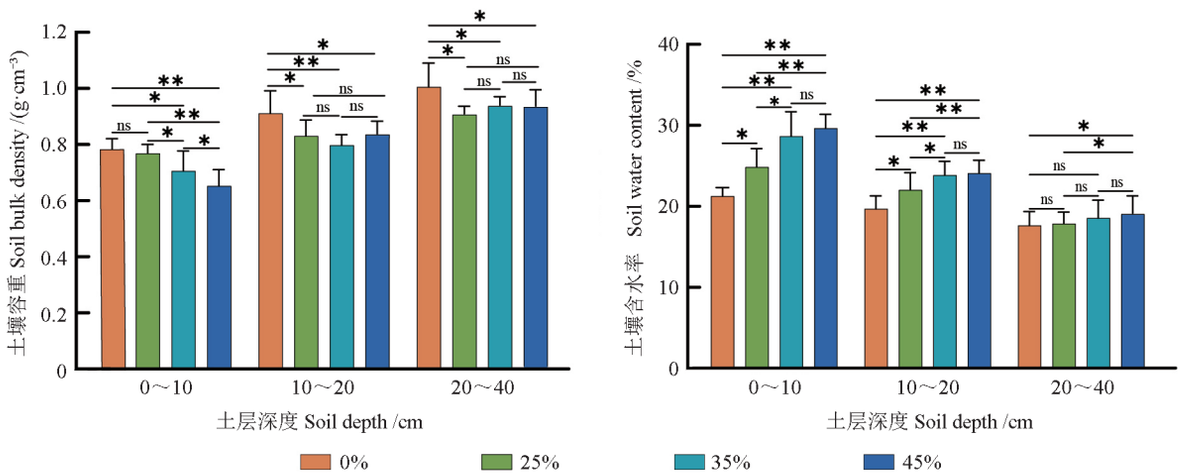
Fig. 2　The standing stock of litter after 5 years management with different selective cutting intensities

2.2　不同择伐强度对土壤理化性质的影响

2.2.1　土壤容重和含水率

通过单因素方差分析结果可知（图 3），不同

择伐强度经营 5 a 后，林分土壤的含水率和容重与对照林分相比均存在显著差异。0 ～ 10 cm 土层的土壤容重在 35%、45% 择伐强度下分别小于对照林分 10.1%、17.7%，在 25% 择伐强度下与对照林分相比无显著差异。10 ～ 20 cm 土层的土壤容重在 25%、35%、45% 择伐强度下分别小于对照林分 8.8%、13.2%、8.3%。20 ～ 40 cm 土层的土壤容重在 25%、35%、45% 择伐强度下分别小于对照林分 15.0%、11.0%、12.0%。高强度择伐（45%）对表层土壤的容重影响较大，显著降低了表层的土壤容重；而中弱强度择伐（35%、25%）对较深层土壤的影响较大，显著降低了深层的土壤容重。



ns. $P > 0.05$; *. $0.01 < P \leqslant 0.05$; **. $P \leqslant 0.01$.

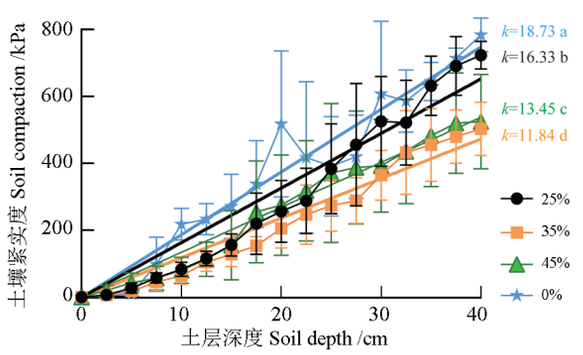
图 3　不同择伐强度经营 5 a 后的土壤含水率和容重

Fig. 3　Soil moisture content and bulk density after 5 years of operation with different cutting intensities

0 ～ 10 cm 土层的土壤含水率在 25%、35%、45% 择伐强度下显著大于对照林分 17.0%、35.0%、40.8%。10 ～ 20 cm 土层的土壤含水率在 25%、35%、45% 择伐强度下显著大于对照林分 11.8%、21.2%、21.8%。20 ～ 40 cm 土层的土壤含水率仅在 45% 择伐强度下与对照林分相比存在显著差异，表现为大于对照林分土壤含水率的 18.7%。高强度（45%）的择伐显著增大了 0 ～ 40 cm 深度的土壤含水率，中、弱强度择伐（35%、25%）对土壤含水率的影响主要集中在浅表层的土壤。

2.2.2　土壤紧实度

通过一元线性回归拟合模型结果可知（图 4），随着土壤深度的增加，土壤紧实度值呈波动式逐渐增大。不同择伐强度经营 5 a 后，土壤紧实度呈现显著差异。0 ～ 40 cm 土壤深度中，土壤紧实度拟合方程斜率从大到小依次为对照林分（k=18.73）、25% 强度（k=16.33）、35% 强度（k=11.84）、45% 强度（k=13.45）。当土壤深度为 40 cm 时，土壤紧实度最大，不同择伐强度下依次表现为对照林分（785.0 kPa）、25% 强度（724.4 kPa）、45% 强度（525.6 kPa）、35% 强度（503.9 kPa）。随着择伐强度的增大，土壤紧实度最大值呈先减小后增大的趋势，当择伐强度大于 35% 后，土壤紧实度略有增大。



k 表示拟合方程斜率，斜率后不同小写字母表示土壤紧实度存在显著差异（$P < 0.05$）。

k represents the slope of the fitting equation, and different lowercase letters following the slope indicate significant differences in soil compaction ($P < 0.05$).

图 4　不同择伐强度下土壤紧实度随土壤深度的变化

Fig. 4　Changes in soil compaction with soil depth under different cutting intensities

2.2.3　土壤化学性质

通过单因素方差分析结果可知（表 2），0 ～ 40 cm 土层内，土壤 pH 值未随择伐强度的增大呈线性上升趋势，而是在弱强度（25%）、中强度（35%）择伐处理下提升幅度最大。其中 0 ～ 10 cm 土层，25%、35% 择伐处理的土壤 pH 值较对照组分别提升 4.0%、5.5%；10 ～ 20 cm 土层，25%、35% 择伐处理较对照组分别提升 9.5%、3.7%；20 ～ 40 cm 土层，25%、35% 择伐处理较对照组分别提升 8.3%、8.6%。土壤全氮、全磷含量对择伐强度的响应表现为，中强度（35%）择伐处理下的变

化幅度最大。全氮含量方面，0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 40 cm 土层不同强度的平均值较对照组分别提升 21.7%、52.8%、45.8%。全磷含量方面，0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 40 cm 土层不同强度的平均值较对照组分别提升 39.8%、33.0%、58.6%。不同择伐强度处理下，土壤全钾含量与对照林分相比均无显著差异（$P > 0.05$）。有机碳含量在中强度（35%）、高强度（45%）择伐处理后显著增加；其中 0 ～ 10 cm 土层，35%、45% 择伐处理较对照组分别提升 45.4%、34.3%；10 ～ 20 cm 土层，35%、45% 择伐处理较对照组分别提升 42.5%、26.7%；20 ～ 40 cm 土层，35%、45% 择伐处理较对照组分别提升 46.0%、45.9%。

表 2　不同择伐强度下的土壤化学性质 †

Table 2　Soil chemical properties under different cutting intensities

择伐强度 Selective intensity /%	pH 值 pH value			全氮含量 TN content /(g·kg^{-1})		
	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm
0	5.77±0.05 Ba	5.91±0.04 Ca	5.67±0.10 Aa	6.65±0.03 Ca	2.86±0.15 Ba	1.68±0.08 Aa
25	6.00±0.19 Ab	6.47±0.20 Cc	6.14±0.10 Bb	7.36±0.39 Cb	4.27±0.60 Bb	2.43±0.11 Ab
35	6.09±0.23 Ab	6.13±0.12 Ab	6.16±0.12 Bb	8.09±0.46 Cc	4.37±0.33 Bb	2.45±0.05 Ab
45	5.95±0.06 Aa	6.19±0.34 Cb	6.01±0.23 Bb	6.78±0.12 Ca	3.08±0.17 Bc	2.13±0.07 Ab
择伐强度 Selective intensity /%	全钾含量 TK content /(g·kg^{-1})			全磷含量 TP content /(g·kg^{-1})		
	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm
0	21.50±2.48 Ba	21.40±0.59 Ba	17.84±1.04 Aa	0.88±0.16 Ba	0.88±0.17 Ba	0.70±0.07 Aa
25	22.46±2.80 Ca	21.36±4.34 Ba	15.83±2.19 Aa	1.13±0.20 Bb	1.04±0.06 Ba	0.94±0.17 Ab
35	23.03±1.42 Ca	21.76±0.70 Ba	16.32±2.70 Aa	1.23±0.20 Bb	1.17±0.14 Bb	1.11±0.12 Ab
45	22.40±4.58 Ca	20.23±3.68 Ba	17.44±1.67 Aa	1.12±0.13 Bb	1.12±0.13 Bb	0.95±0.23 Ab
择伐强度 Selective intensity /%	有机碳含量 SOC content /(g·kg^{-1})			速效钾含量 AK content /(μg·g^{-1})		
	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm
0	55.83±4.66 Ca	34.59±2.78 Ba	25.59±5.66 Aa	286.24±2.20 Ca	169.68±2.20 Ba	140.71±6.93 Aa
25	67.11±6.48 Cb	45.95±6.17 Bb	32.66±5.94 Ab	309.43±6.17 Cb	217.66±3.33 Bb	201.80±6.38 Ab
35	81.16±8.09 Cc	49.30±2.10 Bb	37.35±6.19 Ab	343.31±4.88 Cc	219.93±4.88 Bb	137.67±3.49 Aa
45	74.96±7.59 Cb	43.82±5.74 Bb	37.34±7.17 Ab	372.24±5.34 Cd	273.95±8.33 Bc	227.60±1.33 Ac
择伐强度 Selective intensity /%	有效磷含量 AP content /(μg·g^{-1})			水解性氮含量 HN content /(μg·g^{-1})		
	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm	0 ～ 10 cm	10 ～ 20 cm	20 ～ 40 cm
0	12.28±1.63 Ba	7.88±1.11 Aa	9.56±1.31 Aa	324.22±32.50 Ca	164.47±24.04 Ba	99.75±6.41 Aa
25	13.03±0.54 Bb	10.67±2.73 Aa	11.30±1.39 Aa	398.91±6.50 Cb	182.61±11.02 Ba	103.64±6.47 Aa
35	19.70±2.99 Cc	15.04±3.49 Bb	11.21±2.70 Aa	490.58±29.53 Cc	197.44±8.57 Bb	149.29±9.69 Ab
45	21.43±4.60 Cc	14.39±6.19 Bb	10.30±3.57 Aa	392.12±11.60 Cb	196.91±17.53 Bb	110.25±8.16 Aa

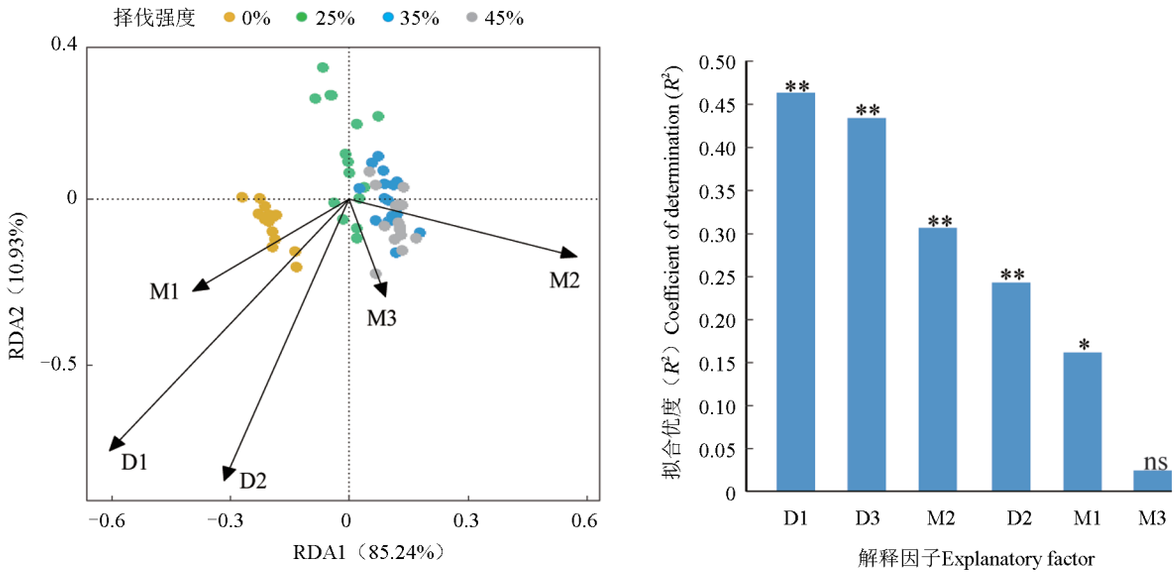
† 不同小写字母代表同列数据存在显著差异（$P < 0.05$），不同大写字母代表同化学性质内同行数据存在显著差异（$P < 0.05$）。
Different lowercase letters indicate significant differences among the data in the same column ($P < 0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences among the data in the same row within the same chemical property ($P < 0.05$).

土壤中的速效养分在择伐经营 5 a 后与对照组相比差异显著。速效钾含量对择伐强度的响应表现为，高强度（45%）择伐处理下显著提升，其中 0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 40 cm 土层的含量较对照组分别提升 30.0%、61.5%、61.8%。有效磷含量方面，其在中高强度（35%、45%）择伐处理下显著增加；0 ～ 10 cm 土层中，35%、45% 择伐处理的有效磷含量较对照组分别提升 60.4%、74.5%；10 ～ 20 cm 土层中，35%、45% 择伐处理较对照组分别提升 90.9%、82.6%。水解性氮含量受中等强度（35%）择伐处理的影响最大，其 0 ～ 10、10 ～ 20、20 ～ 40 cm 土层的含量较对照组分别提升 51.3%、30.0%、49.7%。随土壤土层深度的增加，土壤全氮、全钾、全磷、有机碳、速效钾、有效磷及水解性氮的含量均呈逐渐降低的趋势。

2.3　择伐经营与凋落物现存量、土壤理化性质的关系

在冗余分析结果中（图 5a），凋落物覆盖厚度和现存量在 RDA1 和 RDA2 中对土壤理化性质的解释度累计为 96.17%。通过 envfit 检验结果显示（图 5b），凋落物覆盖厚度、未分解层厚度、半分解层厚度、凋落物现存量、草本植物凋落物现存量均对土壤理化性质存在显著影响，但针叶凋落物现存量对土壤理化性质的影响不显著。

在 Mantel 分析中（图 6），凋落物覆盖厚度与土壤理化性质，除全钾含量外，均存在显著相关关系（$P < 0.05$）；凋落物现存量与土壤理化性质，除全钾含量、含水率外，均存在显著相关关系（$P < 0.05$）；草本植物凋落物现存量与土壤理化性质均存在显著相关关系（$P < 0.05$）；针叶凋



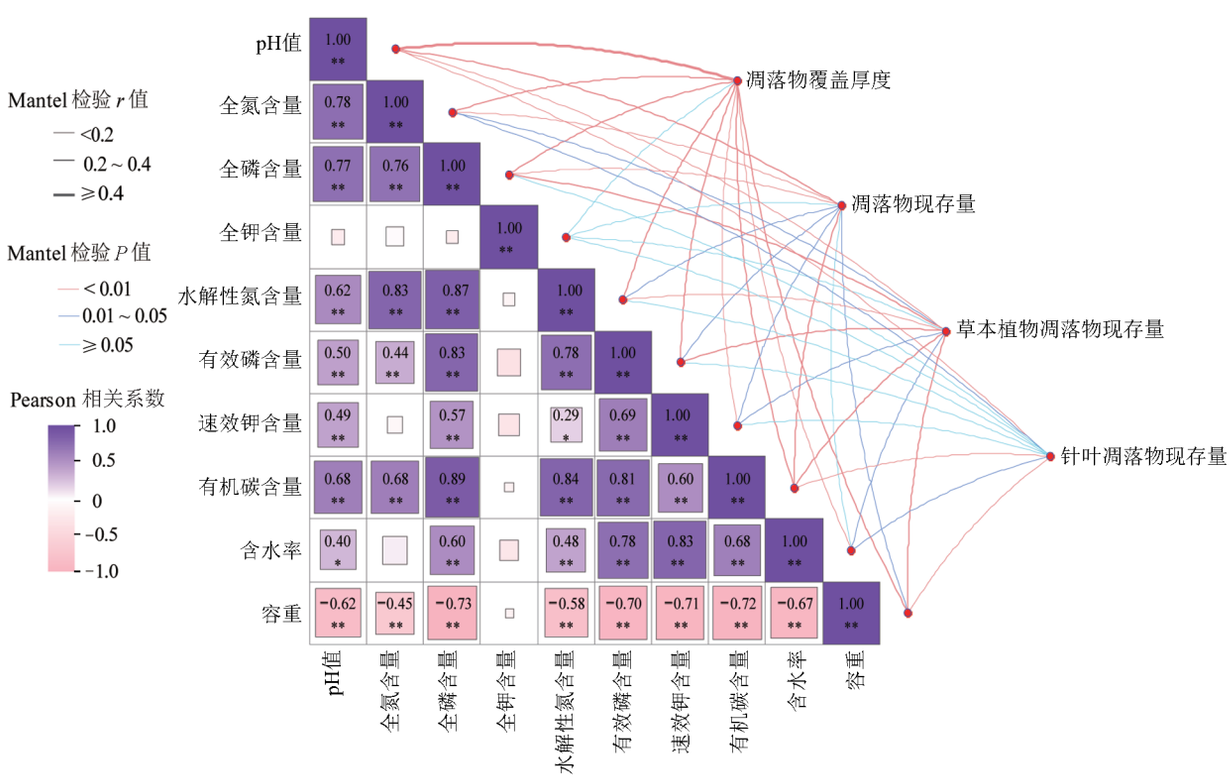
（a）凋落物特征因子与土壤理化性质的冗余分析
Redundancy analysis of characteristic factors of litter and soil physicochemical properties

（b）凋落物特征因子解释度
Explanatory power of characteristic factors of litter

D1. 凋落物覆盖厚度；D2. 未分解层厚度；D3. 半分解层厚度；M1. 凋落物现存量；M2. 草本植物凋落物现存量；M3. 针叶凋落物现存量。ns. $P > 0.05$; *. $0.01 < P < 0.05$; **. $P \leqslant 0.01$。
D1. Thickness of litter cover; D2. Thickness of the undecomposed layer; D3. Thickness of the semi decomposed layer; M1. Current stock of litter; M2. Current stock of herbaceous plant litter; M3.Current stock of coniferous litter. ns. $P > 0.05$; *. $0.01 < P < 0.05$; **. $P \leqslant 0.01$.

图 5　凋落物特征因子与土壤理化性质的冗余分析

Fig. 5　Redundancy analysis of litter characteristic factors and soil physicochemical properties



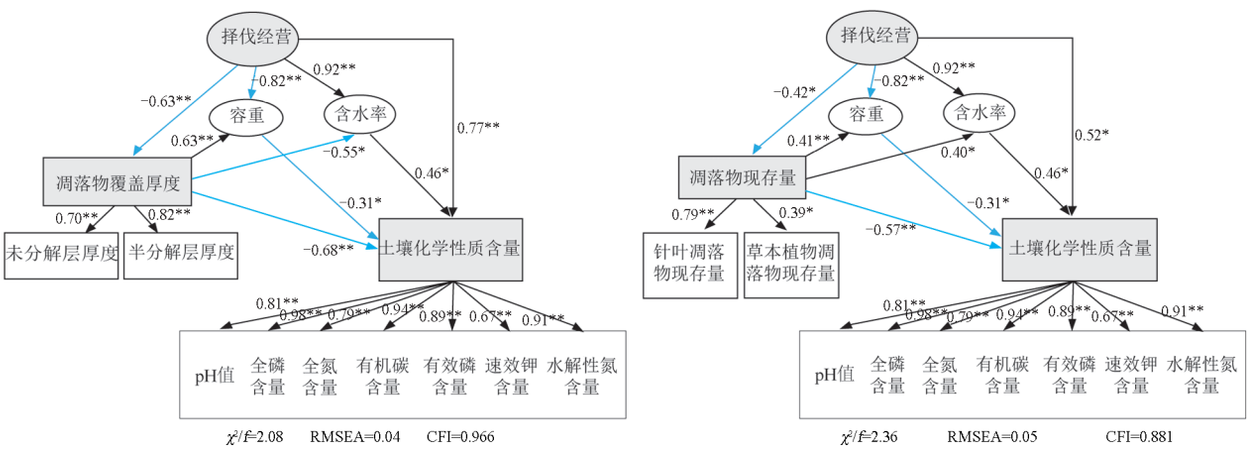
*. $P < 0.05$; **. $P < 0.01$.

图 6　凋落物特征因子与土壤理化性质的 Mantel 分析

Fig. 6　Mantel analysis of litter characteristic factors and soil physical and chemical properties

落物现存量仅与土壤 pH 值、全氮含量、有机碳含量、含水率、容重存在显著相关关系（$P < 0.05$）；与草本植物凋落物现存量相比，针叶凋落物现存量对土壤理化性质的影响较小。

利用结构方程模型分析凋落物覆盖厚度、现存量与土壤理化性质的关系（图 7）。模型拟合结果显示，卡方与自由度的比值（χ^2/f）、近似均方根误差（Approximate root mean square error，RMSEA）、比较拟合指数（Comparative fit index，CFI）均满足模型拟合标准，表明模型拟合效果较好。在直接影响中，择伐经营可以对土壤含水率、土壤化学性质产生显著的正向影响，对土壤容重、凋落物覆盖厚度、凋落物现存量产生显著的负向影响。在间接影响中，一方面，通过改变凋落物覆盖厚度对土壤容重产生显著的正向影响，对土壤含水率和化学性质产生显著的负向影响；另一方面，通过改变凋落物现存量对土壤容重和含水率产生显著正向影响，对土壤化学性质产生显著的负向影响。模型中，凋落物覆盖厚度和现存量对土壤化学性质都呈现显著的负向影响，说明凋落物现存量的累积不利于土壤养分的增加。



（a）凋落物覆盖厚度 The thickness of litter cover　　（b）凋落物现存量 Standing stock of litter cover

黑色箭头表示正向影响，蓝色表示负向影响；箭头上数字为路径系数。* 表示 $0.01 < P < 0.05$；** 表示 $P < 0.01$。
The black arrows indicate positive effects, while the blue arrows indicate negative effects; The numbers on the arrows represent path coefficients.
* indicates $0.01 < P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$.

图 7　择伐经营下凋落物覆盖厚度和现存量对土壤理化性质的影响

Fig. 7　Effects of litter cover thicknes and standing stock on soil physical and chemical properties under selective cutting management

3　讨　论

有研究表明，林分密度减小能促进地表凋落物分解，导致凋落物现存量减少 [22]。Bravo-Oviedo 等 [23] 的研究结果表明过高强度的间伐不利于凋落物现存量的累积，随着择伐强度的增大，林分地表凋落物层总厚度、未分解层厚度和半分解层厚度均逐渐减小。但本研究中，当择伐强度为 45% 时，凋落物层总厚度、未分解层厚度和半分解层厚度与 35% 择伐强度下相比差异不显著。这可能与林分湿度抑制微生物生长有关 [7]。有研究发现，湿度会影响土壤微生物的数量致使凋落物分解速率加快或减慢 [24]，湿度过大也会导致土壤微生物的数量减少。本研究中，土壤含水率在 35% 和 45% 择伐强度下差异不显著，对土壤微生物的影响差异较小，凋落物分解差异较小，凋落物层厚度变化量无显著差异。本研究发现，凋落物现存量组成中，草本植物凋落物现存量占比较小，但与土壤理化性质的相关性大于针叶凋落物现存量。草本植物多为 1 年生，其养分物质当年即可通过凋落物回归土壤 [25]，对土壤养分循环起着重要作用。

本研究中，中、弱强度（25%、35%）的择伐对土壤含水率的影响主要集中在浅表层的土壤。由于土壤含水率受天气因素的影响较大 [26]，中、弱强度择伐下深层土壤含水率未出现显著变化，这可能与林冠截留降水和凋落物对水分的吸收有关 [27]。周璇等 [28] 对杉木人工林的研究发现，间伐后土壤 pH 值随着间伐强度的增大而减小，这与本研究的结论有差异。这可能与树种差异和间伐后的时间间隔有关：间伐后初期凋落物迅速分解并释放出大量的有机酸，可能会导致 pH 值下降。然而，梁燕芳等 [29] 的研究则表明，人工林间伐后土壤 pH 值显著增大，这有利于缓解和预防土壤酸化。择伐后土壤中全氮、全磷、有机质碳、速效磷、速效钾、水解性氮含量均显著增加，这与李雪惠 [30] 和王媚臻等 [31] 的结果大致相同。但本研究中土壤

全钾含量在择伐前后无显著差异，这与董凯丽 [32] 的研究结果不同，可能与研究地土壤的成土母质有关。

本研究中通过结构方程模型拟合结果发现，凋落物覆盖厚度和现存量对土壤化学性质均产生负向影响。凋落物过量累积且分解受阻，不利于土壤养分循环。尤其是落叶松人工林，其凋落物富含木质素、纤维素、缩合单宁等难降解成分 [33]，高密度林分中，针叶凋落物堆积且分解缓慢，极易导致土壤酸化 [34-35]。模型结果还发现，土壤水分对土壤化学性质活动具有显著正向影响。择伐经营能有效降低林分郁闭度，增加林下光照强度，改善地表的温湿度条件，从而促进土壤微生物的生长和繁殖，加速凋落物分解，进而推动土壤养分循环。

4　结　论

在长白落叶松人工林经营过程中，择伐经营能够有效调控林分密度和凋落物生物量配比。中、高强度（35%、45%）择伐后，地表凋落物，尤其是针叶凋落物的生物量组成得到显著优化，凋落物现存量和累积量减少，针叶凋落物分解加速，对预防和减缓林地土壤酸化具有显著积极作用。

参考文献：

[1] 刘增力 , 方精云 , 朴世龙 . 中国冷杉、云杉和落叶松属植物的地理分布 [J]. 地理学报 ,2002,57(5):577-586.
Liu Z L, Fang J Y, Piao S L. Geographical distribution of species in genera *Abies*, *Picea* and *Larix* in China[J]. Acta Geographica Sinica,2002,57(5):577-586.

[2] Peng M, Qu L N, Wang Q Y. Seed-specific identification of *Larix gmelinii*, *Larix olgensis*, and *Larix principis-rupprechtii* using sequence-characterised amplified region markers[J]. Biochemical Systematics and Ecology,2014,55:231-235.

[3] 刘阳 , 苗晨 , 王鹤松 . 气候变化对落叶松人工林在中国适生区分布的影响 [J]. 生态学报 ,2023,43(23):9686-9698.
Liu Y, Miao C, Wang H S. Influence of climate change on distribution of suitable areas of *Larix* plantation in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(23):9686-9698.

[4] Shi Z Q, Fan C K, Zhao S M, et al. Effect of litter changes on soil microbial community and respiration in a coniferous-broadleaf mixed forest[J]. Ecosystems,2025,28:26.

[5] 赵子荐 . 凋落物对长白山西坡苔原本地植物及土壤微生物的影响 [D]. 长春 : 吉林大学 ,2023:48.
Zhao Z J. Effects of litter on native plants and soil microorganisms in tundra on the western slope of Changbai mountain[D]. Changchun: Jilin University,2023:48.

[6] Hu G, Huo C L, Hu C, et al. Elevational patterns of hydrological properties of forest litter layers in Daming mountain, southern China[J]. Global Ecology and Conservation,2025,58: e03510.

[7] 陈家琛 . 不同间伐强度杉木人工林凋落物特征研究 [D]. 福州 : 福建农林大学 ,2023:14.
Chen J C. Research on the characteristics of litter of Chinese fir plantation with different thinning intensity[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2023:14.

[8] Ibrahima A, Ntonga J C, Mvondo Ze A D. Litterfall, litter standing crops and nutrient dynamics as influenced by selective logging in tropical rainforest of Ebom, southwest Cameroon[J]. Journal of Ecology and the Natural Environment, 2018,10(8):205-220.

[9] 杨佳萍 . 川西亚高山典型针叶林群落凋落物难降解组分归还特征 [D]. 雅安 : 四川农业大学 ,2022:91.
Yang J P. Return patterns of litter recalcitrant components in typical subalpine coniferous forests in western Sichuan[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University,2022:91.

[10] Meng D L, Liu J, Yan L Y, et al. The humus layer promotes needle litter decomposition but not carbon release or phosphorus accumulation in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation[J]. Ecological Processes,2025,14:45.

[11] Ferreira M L, Barbosa M F, Gomes E P C, et al. Ecological implications of twentieth century reforestation programs for the urban forests of São Paulo, Brazil: a study based on litterfall and nutrient cycling[J]. Ecological Processes,2021,10:27.

[12] 张磊 , 贾淑娴 , 李啸灵 , 等 . 凋落物和根系输入对亚热带米槠天然林土壤有机碳组分的影响 [J]. 水土保持学报 ,2021,35(3): 244-251.
Zhang L, Jia S X, Li X L, et al. Effects of litter and root inputs on soil organic carbon fractions in a subtropical natural forest of *Castanopsis carlesii*[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):244-251.

[13] Barantal S, Schimann H, Fromin N, et al. C, N and P fertilization in an Amazonian rainforest supports stoichiometric dissimilarity as a driver of litter diversity effects on decomposition[J]. Proceedings Biological Sciences,2014,281:20141682.

[14] 李玉江 , 李国伟 , 刘冠兵 . 落叶松成熟林不同采伐方式对林下土壤化学性质的影响 [J]. 林业科技 ,2022,47(6):5-9,20.
Li Y J, Li G W, Liu G B. Effects of different cutting methods on chemical properties of soil under larch mature forest[J]. Forestry Science & Technology,2022,47(6):5-9,20.

[15] 石亚飞 , 石善恒 , 黄晓敏 . 基于 R 的结构方程模型在生态学中的应用 [J]. 生态学杂志 ,2022,41(5):1015-1023.
Shi Y F, Shi S H, Huang X M. The application of structural equation modeling in ecology based on R[J]. Chinese Journal of

Ecology,2022,41(5):1015-1023.

[16] 吕娇 ,Mustaq Shah, 崔义 , 等 . 土壤紧实度和凋落物覆盖对城市森林土壤持水、渗水能力的影响 [J]. 北京林业大学学报 ,2020,42(8)102-111.
Lyu Jiao, Mustaq Shah, Cui Yi, et al. Effects of soil compactness and litter covering on soil water holding capacity and water infiltration ability in urban forest[J]. Journal of Beijing Forestry University,2020,42(8):102-111.

[17] 田佳歆 . 采伐对长白落叶松人工林草本物种多样性和土壤化学性质的影响 [D]. 吉林 : 北华大学 ,2021:26.
Tian J X. Effects of cutting on species diversity and soil chemical properties of *Larix olgensis* plantation[D]. Jilin: Beihua University,2021:26.

[18] 尹明宇 , 吴波 , 乌云塔娜 , 等 . 初植密度对科尔沁沙地樟子松人工林生长和健康状况及土壤化学性质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2024,52(7):42-52.
Yin M Y, Wu B, Wuyun T N. Effects of initial planting density on growth, health status and soil chemical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Horqin sandy Land[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2024,52(7):42-52.

[19] 褚贯琳 , 田继强 , 刘立峰 , 等 . 华北落叶松林下草本植物分布对光环境的响应及指示作用 [J]. 林业与生态科学 ,2024,39(3):243-248.
Chu G L, Tian J Q, Liu L F, et al. Response and indication of understory herbs distribution of *Larix pcincipis-rupprechtii* forest to light environment[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2024,39(3):243-248.

[20] 陈双双 . 石漠化区樟树 - 马尾松人工混交林植物群落与土壤理化特征的研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2022:7.
Chen S S. Plant communities and soil physicochemical characteristics of *Camphor-Pinus* artificial mixed forests in rocky desertification areas[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2022:7.

[21] Rosseel Y. lavaan: an R package for structural equation modeling[J]. Journal of Statistical Software,2012,48(2):1-36.

[22] 卢德浩 , 冯铭淳 , 邱展鹏 , 等 . 间伐保留密度对杉木人工林凋落物与土壤持水特性的影响 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学),2025,45(3):141-149.
Lu D H, Feng M C, Qiu Z P, et al. Effects of thinning retention density on litter and soil water retention characteristics of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2025,45(3):141-149.

[23] Bravo-oviedo A, Ruiz-peinado R, Onrubia R, et al. Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in Mediterranean oak-pine mixed stands[J]. Forest Ecology and Management,2017,391:309-320.

[24] 肖文娅 , 刁娇娇 , 费菲 , 等 . 不同强度间伐对杉木人工林凋落物分解速率的影响 [J]. 生态环境学报 ,2016,25(8):1291-1299.
Xiao W Y, Diao J J, FEI F, et al. Effects of different intensity thinning on litter decomposition in Chinese fir plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences,2016,25(8):1291-1299.

[25] 沈健 , 何宗明 , 郜士垒 , 等 . 去除根系或枯落物对湿地松和尾巨桉人工林土壤碳氮库的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(2):114-123.
Shen J, He Z M, Gao S L, et al. Effects of root and litter removal on the soil carbon and nitrogen pools of *Pinus elliottii* and *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(2):114-123.

[26] Jin C, Jia Z F, Li G, et al. Effect of soil moisture content on condensation water in typical loess and sandy soil[J]. Land,2024,13:934.

[27] Xia C C, Liu G D, Luo J. Stable isotopes reveal the effect of canopy and litter layer interception on water recharge in a subtropical manmade forest of southwest China[J]. Forests,2023,14:129.

[28] 周璇 . 抚育间伐对杉荷混交林生长及土壤理化性质的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2024:32.
Zhou X. Effects of thinning on growth and soil physical and chemical properties of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook-*Schima superba* mixed forest[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024:32.

[29] 梁燕芳 , 罗华龙 , 蒋林 , 等 . 不同间伐强度对杂交松人工林土壤理化性质及酶活性的影响 [J]. 北华大学学报 (自然科学版),2022,23(4):521-529.
Liang Y F, Luo H L, Jiang L, et al. Effects of different thinning intensities on soil physicochemical properties and enzyme activities in hybrid pine plantation[J]. Journal of Beihua University (Natural Science),2022,23(4):521-529.

[30] 李雪惠 . 抚育间伐对杉木林植被和生物量及土壤理化性质的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2023:36.
Li X H. Effect of thinning on vegetation, biomass and soil physicochemical properties of *Cunninghamia lanceolata*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023:36.

[31] 王媚臻 , 毕浩杰 , 金锁 , 等 . 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响 [J]. 生态学报 ,2019,39(3):981-988.
Wang M Z, Bi H J, Jin S, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(3):981-988.

（下转第 215 页）

a recent review based on state-of-the-art works[J]. Alexandria Engineering Journal,2022,61:3831-3872.

[30] Abdel-Basset M, Mohamed R, Abouhawwash M. Crested porcupine optimizer: a new nature-inspired metaheuristic[J]. Knowledge-Based Systems,2024,284:111257.

[31] 周文武 , 舒清态 , 胥丽 , 等 . 基于星载光子计数雷达数据的森林郁闭度估测模型优化 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(4):84-95,105.
Zhou W W, Shu Q T, Xu L, et al. Optimization of forest canopy closure estimation model based on spaceborne photon counting LiDAR data[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(4):84-95,105.

[32] Dubey A K, Kumar A, García-Díaz V, et al. Study and analysis of SARIMA and LSTM in forecasting time series data[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments,2021,47: 101474.

[33] Guruge P B, Priyadarshana Y H P P. Time series forecasting-based Kubernetes autoscaling using Facebook prophet and long short-term memory[J]. Frontiers in Computer Science, 2025,7:1509165.

[34] Li Z L, Yu H Y, Xu J X, et al. Stock market analysis and prediction using LSTM: a case study on technology stocks[J]. Innovations in Applied Engineering and Technology,2023,2(1):1-6.

[35] 宋子戈 , 肖海 , 张泰 , 等 . 机载 LiDAR 森林蓄积量非参数模型构建与残差分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(10): 86-95,123.
Song Z G, Xiao H, Zhang T, et al. Nonparametric model for forest stock volume estimation based on airborne LiDAR point cloud and residual analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(10):86-95,123.

[36] Awad M, Khanna R. Support vector regression[M]//Efficient learning machines: theories, concepts, and applications for engineers and system designers. Berkeley, CA: Apress,2015:67-80.

[37] Li D Z, Zhou B, Lin C, et al. Supply forecasting and profiling of urban supermarket chains based on tensor quantization exponential regression for social governance[J]. PeerJ Computer Science, 2022,8:e1138.

[38] Zhou H Y, Zhang S H, Peng J Q, et al. Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2021,35(12):11106-11115.

[39] Nayak G H H, Alam M W, Avinash G, et al. N-BEATS deep learning architecture for agricultural commodity price forecasting[J]. Potato Research,2025,68:1437-1457.

[40] Huang X Y, Tang J, Shen Y M. Long time series of ocean wave prediction based on PatchTST model[J]. Ocean Engineering, 2024,301:117572.

[本文编校：张雨朦]

（上接第 142 页）

[32] 董凯丽 . 抚育间伐对三种人工林土壤水文效应及其理化性质的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2020:31.
Dong K L. The effect of thinning on soil hydrological and physicochemical properties in three plantations[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2020:31.

[33] 赵继德 , 杨雨春 , 申方圆 , 等 .4 种落叶松人工林凋落物分解与养分释放动态特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(7): 119-129.
Zhao J D, Yang Y C, Shen F Y, et al. Dynamic characteristics of litter decomposition and nutrient release in 4 species of *Larix* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(7):119-129.

[34] Xi L L, Chen S G, Bian H L, et al. Organic carbon release from litter decomposition of woody and herbaceous plants in the Dongting lake wetlands: a comparative study[J]. Ecohydrology & Hydrobiology,2023,23:408-419.

[35] Yang K, Zhu J J, Zhang W W, et al. Litter decomposition and nutrient release from monospecific and mixed litters: comparisons of litter quality, fauna and decomposition site effects[J]. Journal of Ecology,2022,110:1673-1686.

[本文编校：张雨朦]