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

# 间伐对华北落叶松凋落物分解及养分释放的影响

杨璐 张海军 秦江环 和敬渊 王珊珊 彭逸飞 李世明 刘宪钊

# Effects of thinning on litter decomposition and nutrient release in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* forests

Yang Lu, Zhang Haijun, Qin Jianghuan, He Jingyuan, Wang Shanshan, Peng Yifei, Li Shiming, Liu Xianzhao

引用本文:
杨璐, 张海军, 秦江环, 和敬渊, 王珊珊, 彭逸飞, 李世明, 刘宪钊. 间伐对华北落叶松凋落物分解及养分释放的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):37–48. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250522
Yang Lu, Zhang Haijun, Qin Jianghuan, He Jingyuan, Wang Shanshan, Peng Yifei, Li Shiming, Liu Xianzhao. Effects of thinning on litter decomposition and nutrient release in *Larix gmelinii* var. *principis–rupprechtii* forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):37–48. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250522

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250522

**您可能感兴趣的其他文章**
**Articles you may be interested in**

间伐对华北落叶松林凋落物分解的影响
Effects of thinning on litter decomposition of *Larix principis–rupprechtii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 29–37. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210114

不同处理方式对华北落叶松抚育剩余物分解的影响
Effects of different treatments on decomposition of *Larix principis–rupprechtii* tending residue
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 15–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200345

间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响
Influence of thinning on the stand structure of *Larix principis–rupprechtii* plantations
北京林业大学学报, 2026, 48(4): 116–124. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250393

寒温带4种乔木树种不同径级根系分解及碳氮释放动态
Dynamics of root decomposition and carbon and nitrogen release of four tree species with different diameter classes in the cold temperate zone
北京林业大学学报, 2023, 45(7): 36–46. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210490

华北落叶松人工林保留木生长与林分生产力对间伐的响应
Responses of residual tree growth and stand productivity to thinning in *Larix gmelinii* var. *principis–rupprechtii* plantations
北京林业大学学报, 2025, 47(11): 48–57. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250239

华北落叶松胚性组织超低温保存技术研究
Cryopreservation of embryogenic callus for *Larix gmelinii* var. *principis–rupprechtii*
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 47–53. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200251

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250522

# 间伐对华北落叶松凋落物分解及养分释放的影响

杨 璐[1] 张海军[2] 秦江环[1] 和敬渊[1] 王珊珊[3] 彭逸飞[1] 李世明[1] 刘宪钊[1]
（1. 中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091；2. 河北省塞罕坝机械林场，河北 承德 068456；
3. 石家庄市植物园，河北 石家庄 050073）

**摘要:【目的】**探究不同间伐强度对华北落叶松人工林叶片凋落物与细根分解速率及养分释放动态的影响，为华北落叶松人工林可持续经营提供科学依据。**【方法】**依托 2019 年在河北省塞罕坝机械林场建立的对照（CK，不采伐）、轻度（LT，20%）、中度（MT，39%）和重度（HT，60%）间伐样地，共计 12 块 30 m × 30 m 固定监测样地，自 2023 年 11 月开始，采用分解袋法进行为期 1 年半的原位分解试验。同步监测土壤温度和含水量，测定凋落物初始全碳（C）、全氮（N）、全磷（P）含量及分解过程中质量残留率和养分释放动态，利用 Olson 指数衰减模型计算分解速率，并通过混合效应模型与相关性分析，解析关键影响因素。**【结果】**（1）间伐处理显著提高了 5 cm 深处土壤温度和含水量，重度间伐处理增幅最大。同时，轻度间伐处理显著提高了叶片凋落物和细根的初始 N、P 含量，并降低了其初始 C/N 和 C/P，从而改善了凋落物质量。（2）所有间伐处理均促进了叶片凋落物分解，分解速率表现为 LT > MT > HT > CK。相比之下，细根分解对不同间伐强度表现不一致，LT 和 MT 显著促进了细根分解，而重度间伐处理下的分解速率反而低于对照。（3）叶片凋落物分解速率与土壤温度及凋落物自身初始 N、P 含量呈显著正相关，与初始 C/N、C/P 呈显著负相关。细根分解速率则主要与凋落物自身的初始化学性质（N、P 含量，C/N、C/P）显著相关，而与监测期的土壤温度和含水量无显著相关性。**【结论】**LT 和 MT 通过改善土壤微环境、提升凋落物质量，有效促进叶片凋落物与细根分解及养分循环；HT 虽加速叶片凋落物分解，但抑制细根分解。凋落物分解受微环境与基质质量共同驱动，但主导因子存在差异。综合表明，轻度至中度间伐是优化华北落叶松人工林凋落物分解与养分归还的适宜经营强度。

**关键词：**华北落叶松；叶片凋落物；细根；分解速率；养分释放速率；间伐；人工林可持续经营
**中图分类号：**S750；S753 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)05−0037−12
**引文格式：**杨璐，张海军，秦江环，等. 间伐对华北落叶松凋落物分解及养分释放的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(5)：37−48. Yang Lu, Zhang Haijun, Qin Jianghuan, et al. Effects of thinning on litter decomposition and nutrient release in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* forests［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 37−48.

# Effects of thinning on litter decomposition and nutrient release in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* forests

Yang Lu[1] Zhang Haijun[2] Qin Jianghuan[1] He Jingyuan[1] Wang Shanshan[3]
Peng Yifei[1] Li Shiming[1] Liu Xianzhao[1]
(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. Saihanba Mechanical Forest Farm of Hebei Province, Chengde 068456, Hebei, China;
3. Shijiazhuang Botanical Garden, Shijiazhuang 050073, Hebei, China)

**Abstract:** ［**Objective**］This paper explores the effects of different thinning intensities on decomposition rates and nutrient release dynamics of needle litter and fine roots in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations to provide a reference for sustainable plantation management. ［**Method**］The study was carried

**收稿日期:** 2025−12−29 **修回日期:** 2026−03−18
**基金项目:** 公益性科研院所基本科研专项重点项目（CAFYBB2022ZB00105），国家自然科学基金项目（32501647）。
**第一作者:** 杨璐，博士，助理研究员。主要研究方向：森林可持续经营理论与技术。Email：yanglu@ifrit.ac.cn 地址：100091 北京市海淀区颐和园后中国林业科学研究院资源信息研究所。
**责任作者:** 刘宪钊，博士，研究员。主要研究方向：森林可持续经营理论与技术。Email：liuxianzhao@ifrit.ac.cn 地址：同上。
**本刊网址:** https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

out based on long-term permanent plots established in 2019 at Saihanba Mechanical Forest Farm, Hebei Province of northern China, totally 12 fixed monitoring plots (30 m × 30 m each). These plots included a control (CK, no thinning), light thinning (LT, 20%), moderate thinning (MT, 39%), and heavy thinning (HT, 60%). An in-situ decomposition experiment was carried out for one and a half years using the litterbag method starting in November 2023. Soil temperature and water content were monitored synchronously. The initial total carbon (C), total nitrogen (N), and total phosphorus (P) contents of the litter were measured, as well as mass residual rates and nutrient release dynamics during decomposition. The Olson exponential decay model was used to calculate decomposition rates, and key influencing factors were analyzed through the mixed-effects model and correlation analysis. [**Result**] (1) Thinning treatments significantly increased soil temperature and water content at 5 cm depth, with the largest increase observed in HT. Meanwhile, LT significantly increased initial N and P contents of needles and fine root litter and decreased the initial C/N and C/P, thereby improving litter quality. (2) All thinning treatments promoted the needle litter decomposition, with decomposition rates following the order of LT > MT > HT > CK. In contrast, the response of fine root decomposition to thinning intensity was inconsistent. LT and MT significantly promoted fine root decomposition, while the decomposition rate under HT was lower than under CK. (3) The decomposition rate of needle litter was significantly positively correlated with soil temperature and initial N and P contents of litter itself, and significantly negatively correlated with initial C/N and C/P. The decomposition rate of fine roots was mainly significantly correlated with initial chemical properties of litter itself (N and P contents, C/N and C/P), with no significant correlation with soil temperature and water content during monitoring period. [**Conclusion**] LT and MT effectively promote the decomposition of needle litter and fine roots and nutrient cycling by improving soil microenvironment and litter quality. Although HT accelerates needle decomposition, it inhibits fine root decomposition. Litter decomposition is jointly driven by microenvironment and substrate quality, but the dominant factors vary. Overall, light to moderate thinning is appropriate management intensity for optimizing litter decomposition and nutrient return in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations.

**Key words:** *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; needle litter; fine roots; decomposition rate; nutrient release rate; thinning; sustainable management of plantation

目前，中国的营林工作已经从大规模植树造林逐步转向精细化森林抚育与长期管护[1]。间伐作为一项重要的森林抚育技术，通过调控林分密度、增加冠层开度、缓解资源竞争并抑制病害风险，在促进林分生产力恢复和维持人工林生态系统稳定性方面发挥关键作用[2−4]。间伐不仅改变地上植被的空间配置，还会同步重塑林下微环境条件，包括土壤温度、含水量和光照，并进一步影响地上植物群落组成和生物量[5−6]。尽管已有研究[7−8]涉及间伐对林分生物量、土壤有机碳（C）储量及部分生物群落的影响，但多数研究[9−11]只针对单一指标或单一生态组分。由于研究指标分散、生态过程衔接不足，尚未形成系统评估间伐对地上−地下综合效应的框架，限制了对间伐生态效应在强度和方向上的理解。凋落物作为连接地上生产力与地下 C 输入、C 周转及养分矿化过程的纽带，也是评估间伐对地上−地下生态效应的关键指标[10−11]。现有研究[12−14]关于间伐对凋落物分解过程的影响主要集中在叶片凋落物分解及养分释放动态的变化，而关于间伐对地下细根分解及氮（N）、磷（P）等关键养分释放动态的研究较少。细根具有 C 输入更稳定、周转周期更长、对微环境扰动更敏感、分解贡献更持久等特点，但其分解机制、过程参数及生态贡献仍缺乏系统量化。

间伐对凋落物分解的驱动主要受水热条件、光照输入和凋落物本身性质的影响，但凋落物分解的主要控制因子和响应方向在不同研究[15−17]中仍存在分歧。部分研究[18−19]认为，土壤水分和温度是分解速率的主导控制因子，通过调节微生物活性和酶促反应速率直接影响凋落物周转。近期一项全球整合分析也指出，凋落物化学性质（C/N、木质素、纤维素、次生代谢物）对分解速率的解释力更强，尤其在环境差异较小或水热条件非限制的情况下更为突出[20]。此外，在不同研究[21−22]中，同一驱动因子的解释方向存在不一致。例如，冠层开度增加后，土壤升温加速叶片凋落物分解，但有研究[23]却观测到林下干燥抑制了分解速率；在细根方面，细根分解主要受基质质

量控制，但水分变化对细根的影响更强，且持续时间更长[24]。这些相互矛盾的结果说明，叶片凋落物与细根分解过程对驱动因子的响应机制并不一致，且细根分解对微环境扰动的敏感性和反馈可能与叶片凋落物不同。总体来看，叶片凋落物分解受冠层下光照和水热条件的影响更大，而细根分解则更多受基质质量和土壤微环境变化的共同制约[23]。然而，不同间伐强度下叶片凋落物与细根分解速率如何变化还需探讨。

间伐对森林养分循环的影响不仅体现在凋落物分解速率的变化，还直接决定养分释放到土壤的时序与有效性[25]。间伐提高冠层开度后，林下光照增强和土壤表层升温常导致叶片凋落物分解初期的快速淋溶释放增加，表现为可溶性 N 和 P 在分解早期形成短期释放峰值，该过程与间伐后降水截留减少、地表蒸发增强以及土壤含水量的短期下降密切相关[21]。因此在间伐处理中，叶片凋落物养分释放通常由水热条件和地表水分收支的物理过程主导，并在数周至数月尺度内完成大部分易淋失养分的释放[21,25]。与之相比，细根的养分释放对间伐响应更为复杂且受根际环境变化的直接约束。间伐后，土壤水分恢复速率常表现为层间差异，表层受蒸发与降雨输入影响更强，而深层水分的恢复可能更依赖水力传导与植被根系重新分布，这些变化共同调控微生物对根系 N 和 P 的矿化效率[26]。细根（尤其是直径更小、木质化更高的细根）具有更高的 C/N 和 C/P 及更高的木质素/纤维素比例，其分解过程中释放的 N 和 P 更易被微生物暂时固持，从而呈现更明显的时滞性和更平缓的养分释放曲线，而非叶片凋落物的脉冲式释放[27]。此外，间伐引起的土壤水分波动对细根分解的限制通常更强、持续更久，导致细根养分释放可能在年尺度甚至更长时间内逐步完成[28]。间伐背景下，叶片凋落物与细根的养分释放过程并不相同，现阶段在同一间伐强度下，对 2 类组分的养分释放过程进行直接对比的研究仍然缺乏。

华北落叶松（*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*）作为我国北方地区重要的用材树种，因其生长迅速、材质优良、适应性强等特点，在华北地区被广泛种植，特别是在河北塞罕坝机械林场。塞罕坝位于浑善达克沙地南缘，承担着阻滞沙源、涵养水源、维护生物多样性和提升气候适应能力的核心生态功能，作为京津冀生态环境支撑区和水源涵养功能区的重要组成部分，该区域在维系区域生态安全中发挥着不可替代的屏障作用。在这一敏感区位开展森林经营研究具有重要的地缘战略意义。戴楠等[29]研究表明，华北落叶松人工林达到 30 年树龄时，合理经营密度应维持在约 800 株/hm$^2$。塞罕坝机械林场的华北落叶松人工林占整个林场人工林总面积的 76.2%[30]，其林分质量与可持续经营能力直接决定了区域水源涵养与碳汇功能的强弱。然而，林场内许多林分密度远超这一数值，林木生长空间受限，林地生产力无法充分发挥，凋落物分解速率低、养分循环慢的问题依然严峻[31]。凋落物作为驱动土壤碳输入与养分循环的重要来源，从叶片凋落物和根系组分角度分析不同强度间伐措施对凋落物分解和养分释放的影响过程，不仅有助于揭示间伐措施调控人工林物质循环的内在机制，也可为优化华北落叶松人工林的密度管理、提升土壤养分供应效率及林分长期生产力提供关键理论依据。本研究同时关注地上和地下凋落物分解速率及其养分释放，主要聚焦以下 2 个科学问题：(1)不同间伐强度下，叶片凋落物和细根的质量特征及其分解速率是否一致；(2)不同间伐强度下，叶片凋落物和细根的养分释放速率是否存在差异。本研究旨在筛选适宜的间伐强度，提高土壤养分循环效率，为华北落叶松人工林的可持续经营提供理论依据和实践参考。

## 1　研究区概况

研究区位于河北省塞罕坝机械林场（42°02′ ~ 42°36′N，116°53′ ~ 117°39′E），海拔 1 010 ~ 1 939 m，森林覆盖率 82.0%。该地区的气候特征为寒温带大陆性季风气候，常年气象资料显示年均温为−1.3 ℃，年降雨为 452.6 mm，年积温 2 647 ℃，年日照时数 2 900 h，全年无霜期 110 d[31]。研究区土壤主要为暗灰色森林土。研究区 15 ~ 52 年生的华北落叶松人工林土壤 C、N、P 储量平均值分别为（211.5 ± 46.1）t/hm$^2$、（16.0 ± 3.1）t/hm$^2$ 和（5.8 ± 0.8）t/hm$^2$[29]。研究区主要乔木树种有华北落叶松、云杉（*Picea asperata*）、白桦（*Betula platyphylla*）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongholica*）等。

## 2　研究方法

### 2.1　样地设置

2019 年 10 月，在塞罕坝机械林场千层板分场的辖区内选取了同 1 个林班 3 个临近小班（15 林班 65、68 和 70 小班）的华北落叶松人工中龄林（42°25′N，117°18′E）作为间伐实验对象，3 个小班的试验林均于 1994 年造林形成，初植密度为 3 330 株/hm$^2$，同时具有相似的植物群落和土壤条件等特点，林下植被以草本为主。2002 年，该地区被设立为国家自然保护区之后至本次间伐之前，未进行任何经营活动。2019 年 10 月进行了样地调查，样地株数平均密度

为 1 800 株/hm$^2$，在 3 个区组中设计了同样的间伐处理，分别为对照（CK）、轻度间伐（LT）、中度间伐（MT）和重度间伐（HT），主要结合伐除病腐木、采密留稀、采小留大的原则进行间伐。为减少边际效应，相邻样地间隔 10 m 以上。2020 年 2 月，通过人工间伐的方式对不同处理只进行 1 次间伐工作，并在间伐完成后仅清除树枝等间伐剩余物，不对伐桩进行任何处理。所有样地中，未对林下植被进行任何处理。以上 3 个试验林均包含 4 种间伐处理，共设计了 12 块 30 m × 30 m 的固定样地，每个固定样地的四周设置了 10 m 的缓冲区。采伐完成后，不同间伐处理强度根据伐前和伐后的株数密度确定，CK、LT、MT 和 HT 对应的平均株数密度分别为 1 810、1 490、1 098 和 697 株/hm$^2$，株数采伐强度分别为 0、20%、39% 和 60%，不同样地采伐前后株数及样地基本情况（海拔、平均胸径和土壤有机碳含量）见表 1。

### 2.2 凋落物收集与分解袋布设、土壤温度和含水量监测

2023 年 10 月中旬，原位收集不同间伐强度样地内新凋落的华北落叶松叶片；同时，在不同间伐强度样地的缓冲区内，挖掘表层（0 ~ 20 cm）土壤中直径 < 2 mm 的华北落叶松细根。之后将收集到的叶片凋落物和细根带回实验室，用清水洗净细根。同一间伐强度下的叶片凋落物混合在一起，然后放置于 65 ℃ 的烘箱中烘干至恒质量，之后称量 10 g 的叶片凋落物，装入尺寸大小 20 cm × 20 cm、孔径为 1 mm 的尼龙网袋中[31]。与叶片凋落物的处理方式一样，同一间伐强度下的细根混合在一起，放置于 65 ℃ 的烘箱中烘干至恒质量，然后称量 1.5 g 的细根装入尺寸大小为 10 cm × 10 cm、孔径为 0.1 mm 的尼龙网袋中[13−14]。每个间伐强度下的叶片凋落物和细根分解袋分开进行标记。

2023 年 11 月 2 日，将每个固定样地围绕中心分为 4 个 10 m × 10 m 分解小区，每个小区放置 3 个装有叶片凋落物和 3 个装有细根的分解袋，每个固定样地放置 12 个叶片凋落物分解袋和 12 个细根分解袋，12 个固定样地累计放置 144 个叶片凋落物分解袋（4 个间伐强度 × 3 个重复 × 4 个分解小区 × 3 个分解袋）和 144 个细根分解袋（4 个间伐强度 × 3 个重复 × 4 个分解小区 × 3 个分解袋）。分解袋放置前，首选清除土壤表面凋落物，在土壤表层上方贴地放置叶片凋落物分解袋，按 45°倾斜角挖开 0 ~ 10 cm 的土壤表层，放置细根分解袋，收集的不同间伐强度下的分解袋分别对应放置于不同处理下，模拟自然状态下叶片凋落物和细根分解。每个分解小区内的叶片凋落物分解袋和细根分解袋随机 S 形进行放置，保证距离样木 0.5 m 以外，并使用样地内树枝对分解袋进行固定。

在 12 个固定样地内，分别安装 HOBO 微型气象监测系统，整个试验期内用于记录不同间伐强度处理样地土壤 5 cm 深处的土壤温度和土壤体积含水量，记录间隔期设置为 1 h。

### 2.3 凋落物样品收集与测定

2023 年 11 月至 2025 年 5 月，每隔 6 个月，从每个分解小区随机收集 1 个叶片凋落物分解袋和 1 个细根分解袋，每次收集 48 个叶片凋落物分解袋和 48 个细根分解袋，共收集 3 次，实际收集日期分别为 2024 年 5 月 12 日、2024 年 11 月 1 日和 2025

**表 1 样地基本情况**

Tab. 1 Basic information of sample plots

| 区组 | 样地号 | 间伐强度/% | 海拔/m | 平均胸径/cm | 伐前密度/（株·hm$^{-2}$） | 伐后密度/（株·hm$^{-2}$） | 土壤有机碳/（g·kg$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CK-1 | 0 | 1 540 | 13.7 | 1 735 | 1 735 | 28.8 |
| | LT-1 | 21 | 1 540 | 12.8 | 1 900 | 1 501 | 28.4 |
| | MT-1 | 38 | 1 540 | 13.6 | 1 840 | 1 141 | 26.6 |
| | HT-1 | 61 | 1 540 | 14.8 | 1 675 | 653 | 28.2 |
| 2 | CK-2 | 0 | 1 520 | 14.0 | 1 915 | 1 915 | 27.2 |
| | LT-2 | 22 | 1 520 | 12.4 | 1 860 | 1 451 | 26.8 |
| | MT-2 | 40 | 1 520 | 13.8 | 1 825 | 1 095 | 25.0 |
| | HT-2 | 58 | 1 520 | 15.7 | 1 610 | 676 | 29.8 |
| 3 | CK-3 | 0 | 1 538 | 13.0 | 1 780 | 1 780 | 26.4 |
| | LT-3 | 18 | 1 538 | 12.6 | 1 850 | 1 517 | 27.2 |
| | MT-3 | 38 | 1 538 | 13.2 | 1 705 | 1 057 | 27.6 |
| | HT-3 | 60 | 1 538 | 13.3 | 1 905 | 762 | 25.6 |

注：CK代表对照，LT代表轻度间伐，MT代表中度间伐，HT代表重度间伐。土壤有机C含量为样地间伐之前采集的0 ~ 10 cm深度土壤的有机C含量。

年 5 月 12 日。对收集回实验室的分解袋，小心去除其表面的土块、碎石、碎屑等杂物，然后放置于 65 ℃的烘箱中烘干至恒质量，称质量并计算凋落物残留率。将称质量后的叶片凋落物和细根凋落物粉碎、研磨并过 0.25 mm 的筛网，用于凋落物养分含量的测定。此外，在放置分解袋之前，将不同间伐强度下混合好的叶片凋落物和细根随机挑选 4 份，用于叶片凋落物和细根初始养分含量的测定。对收集的叶片凋落物和细根，测定其全 C、N、P 含量。其中，全 C 含量使用重铬酸钾氧化法测定，全 N 含量使用硫酸–过氧化氢消煮–靛蓝比色法测定，全 P 使用硫酸–过氧化氢消煮–钼锑抗比色法测定。

### 2.4　数据处理与统计分析

叶片凋落物和细根质量残留率计算公式如下。

$$y = M_i/M_0 \times 100\% \tag{1}$$

式中：$y$ 为凋落物质量残留率(%)，$M_i$ 为凋落物原位分解时间 $i$ 时取样的凋落物质量(g)，$M_0$ 为凋落物原位分解初始时放置的凋落物质量(g)。

然后，使用 Olsen 指数衰减模型[32]计算凋落物分解速率，公式如下。

$$k = -t\ln a/\ln y \tag{2}$$

式中：$k$ 为凋落物分解速率($a^{-1}$)，$a$ 为拟合参数，$t$ 为凋落物分解时间(a)。进一步使用如下公式计算凋落物分解 50% 和 95% 时所需时间。

$$t_{0.5} = \ln 0.5/(-k) \tag{3}$$

$$t_{0.95} = \ln 0.05/(-k) \tag{4}$$

同时，结合公式(5)，计算叶片凋落物和细根养分释放速率。

$$R_i = (M_0X_0 - M_iX_i)/(M_0X_0) \times 100\% \tag{5}$$

式中：$R_i$ 为凋落物分解 C、N、P 养分释放速率，$X_0$ 为凋落物原位分解初始时放置的凋落物元素含量(%)，$X_i$ 为凋落物原位分解时间 $i$ 时取样的凋落物元素含量(%)。

首先使用“lme4”包中的线性混合模型来检验间伐强度、取样时间及其交互作用对土壤温度、土壤含水量、凋落物分解速率、凋落物养分释放速率的影响。间伐强度、取样时间及其交互作用被视为固定效应，而样方被视为随机效应。当间伐强度和年份的交互作用显著时，使用“lsmeans”包与错误发现率进行事后比较，以纠正可能出现的 1 类错误，成对比较中的自由度使用 Satterthwaite 近似值进行估计[33]。使用单因素方差分析(ANOVA)来检验不同间伐强度对土壤温度、土壤含水量、凋落物初始养分含量、凋落物分解速率、凋落物养分释放速率的影响。使用 Pearson 相关分析检验凋落物分解速率和土壤温度、土壤含水量、凋落物原始养分含量之间的相关性。本文中的所有统计分析均在 R 4.4.0[34]中进行。

## 3　结果与分析

### 3.1　土壤温度和含水量变化

由表 2 可知，实验期内(2023 年 11 月至 2025 年 5 月)，不同间伐处理下的土壤温度($F = 26.41$，$P < 0.001$)和土壤含水量($F = 568.93$，$P < 0.001$)与对照处理下的土壤温度和土壤含水量均呈显著差异。整个监测期内，轻度、中度和重度间伐条件下，土壤温度比对照处理分别提高了 0.43、0.26 和 0.49 ℃，土壤含水量在轻度、中度和重度间伐条件下，分别比对照提高了 0.014、0.050 和 0.052 $m^3/m^3$，不同间伐强度下，土壤温度和土壤含水量均明显增加。

### 3.2　叶片凋落物和细根初始养分含量变化

由表 3 可知，不同间伐处理下，叶片凋落物初始 C($F = 0.36$，$P = 0.79$)、P($F = 1.13$，$P = 0.40$)、N/P($F = 2.06$，$P = 0.18$)和 C/P($F = 1.23$，$P = 0.36$)无明显差异，而 N($F = 5.40$，$P < 0.05$)和 C/N($F = 4.07$，$P < 0.05$)存在显著差异，轻度间伐下，N 含量明显高于对照，C/N 明显低于对照。不同间伐处理下，细根初始 C($F = 1.28$，$P = 0.35$)和 N/P($F = 1.59$，$P = 0.27$)无明显差异，而 N($F = 6.14$，$P < 0.05$)、P($F = 6.33$，$P < 0.05$)、C/N($F = 10.186$，$P < 0.01$)和 C/P($F = 9.470$，$P < 0.01$)存在显著差异，主要表现为轻度间伐下，细根 N 和 P 含量比对照明显升高，而 C/N 和 C/P 比对照明显降低。

### 3.3　叶片凋落物和细根分解速率变化

不同间伐强度下，华北落叶松叶片凋落物和细根质量残留率均随分解时间增加呈逐渐降低趋势(图 1)，且间伐处理和分解时间对叶片凋落物($F =$

**表 2　不同间伐强度下 5 cm 深处土壤温度和含水量变化**

Tab. 2　Changes in soil temperature and moisture content at 5 cm depth under different thinning intensities

| 指标 | 对照(CK) | 轻度间伐(LT) | 中度间伐(MT) | 重度间伐(HT) |
|---|---|---|---|---|
| 土壤温度/℃ | 2.08 ± 0.05a | 2.51 ± 0.08c | 2.34 ± 0.05b | 2.57 ± 0.06c |
| 土壤含水量/($m^3 \cdot m^{-3}$) | 0.041 ± 0.001a | 0.055 ± 0.001b | 0.091 ± 0.001c | 0.107 ± 0.001d |

注：不同小写字母代表同一指标不同间伐处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

**表 3 不同间伐强度下华北落叶松叶片凋落物和细根初始养分含量**

Tab. 3 Initial nutrient concentrations of needle litter and fine roots in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* under different thinning intensities

| 类型 | 指标 | 对照(CK) | 轻度间伐(LT) | 中度间伐(MT) | 重度间伐(HT) |
|---|---|---|---|---|---|
| 叶片凋落物 | C含量/% | 47.84 ± 0.61a | 48.41 ± 0.96a | 47.85 ± 0.68a | 47.61 ± 0.94a |
| | N含量/% | 0.78 ± 0.01a | 0.92 ± 0.05b | 0.83 ± 0.04a | 0.86 ± 0.04a |
| | P含量/% | 0.06 ± 0.01a | 0.07 ± 0.01a | 0.06 ± 0.01a | 0.06 ± 0.01a |
| | C/N | 61.34 ± 0.58b | 52.60 ± 3.33a | 57.99 ± 2.39ab | 55.49 ± 3.16ab |
| | N/P | 13.08 ± 0.21a | 14.31 ± 1.06a | 12.88 ± 0.52a | 14.13 ± 0.77a |
| | C/P | 802.21 ± 20.31a | 749.31 ± 15.95a | 747.59 ± 49.98a | 782.30 ± 37.74a |
| 细根 | C含量/% | 41.80 ± 1.43a | 40.44 ± 0.16a | 40.28 ± 0.88a | 40.79 ± 0.28a |
| | N含量/% | 1.15 ± 0.02a | 1.38 ± 0.03b | 1.24 ± 0.10ab | 1.26 ± 0.02ab |
| | P含量/% | 0.13 ± 0.01a | 0.16 ± 0.01b | 0.14 ± 0.01ab | 0.15 ± 0.01ab |
| | C/N | 36.48 ± 1.60b | 29.32 ± 0.71a | 32.73 ± 1.87ab | 32.38 ± 0.44ab |
| | N/P | 8.94 ± 0.10a | 8.58 ± 0.27a | 8.83 ± 0.18a | 8.67 ± 0.11a |
| | C/P | 326.18 ± 17.71b | 251.31 ± 5.72a | 289.19 ± 21.37ab | 280.65 ± 0.58a |

2.45，$P < 0.05$)和细根($F = 8.78$，$P < 0.001$)质量残留率均存在显著影响(表 4)。经过 1 年半的分解，不同处理叶片凋落物质量残留率分别为对照((64.50 ± 7.99)%) > 重度间伐((61.49 ± 2.70)% ) > 中度间伐((60.89 ± 4.96)%) > 轻度间伐((59.13 ± 2.69)%)，不同间伐条件均会促进叶片凋落物分解，轻度间伐条件下叶片凋落物分解最快；不同处理下细根质量残留率分别为重度间伐((47.56 ± 2.51)%) > 对照((43.26 ± 3.91)% ) > 中度间伐((34.67 ± 6.28)% ) > 轻度间伐((28.15 ± 2.66)%)，重度间伐不利于细根分解，其他间伐条件均有利于细根分解，且在轻度间伐下细根分解最快。

利用 Olson 指数衰减模型拟合凋落物分解速率，不同处理下，叶片凋落物分解速率分别为轻度间伐(0.369) > 中度间伐(0.349) > 重度间伐(0.342) > 对照(0.297)，对照、轻度、中度和重度间伐下，叶片凋落物分解 50% 所需时间分别为 2.335、1.877、1.987、2.028 年，分解 95% 所需时间分别为 10.090、8.114、8.586、8.765 年，由此可见，不同间伐条件均会促进华北落叶松叶片凋落物分解(表 5)。不同处理下，细根分解速率分别为轻度间伐(0.867) > 中度间伐(0.725) > 对照(0.568) > 重度间伐(0.522)，对照、轻度、中度和重度间伐下，细根分解 50% 所需时间分别为 1.220、0.799、0.956、1.329 年，分解 95% 所需时间分别为 5.272、3.454、4.134、5.742 年，轻度和中度间伐促进了华北落叶松细根分解，而重度间伐下，细根分解速率将会减慢(表 5)。

### 3.4 叶片凋落物和细根养分释放变化

由表 4 可知，叶片凋落物 C、N、P、C/N、N/P 和 C/P 在不同间伐强度下均未发生明显变化($P > 0.05$)，仅叶片凋落物 C 含量($P < 0.001$)和 C/N($P < 0.001$)在不同分解时期表现出显著差异。如图 2 所示，叶片凋落物 C 含量在整个分解过程中呈现释放状态，一年半的分解之后，对照、轻度、中度和重度间伐下，叶片凋落物 C 含量较各自初始 C 含量分别降低了 18.44%、16.23%、19.31% 和 18.16%；叶片凋落物 N

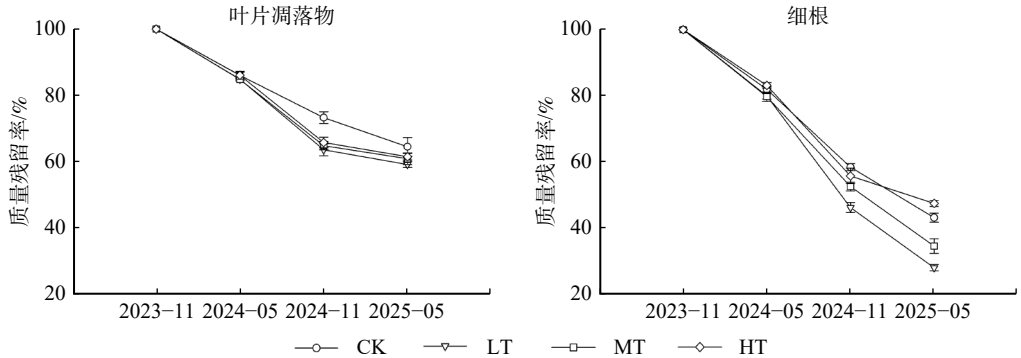



图 1 不同间伐强度下华北落叶松叶片凋落物和细根分解动态

Fig. 1 Decomposition dynamics of needle litter and fine roots in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* under different thinning intensities

**表 4　华北落叶松叶片凋落物和细根分解速率及养分释放速率的双因素方差分析（*F* 值）**

Tab. 4　Two factor variance analysis for decomposition rates and nutrient release rates of needle litter and fine roots in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* (*F* value)

| 类型 | 响应指标 | 处理 | 时间 | 处理 × 时间 |
|---|---|---|---|---|
| 叶片凋落物 | 分解速率 | 7.60*** | 19.09*** | 2.45* |
| | C释放速率 | 2.09 | 29.53*** | 1.26 |
| | N释放速率 | 0.63 | 1.47 | 1.52 |
| | P释放速率 | 1.30 | 0.14 | 0.82 |
| | C/N | 2.18 | 9.90*** | 1.17 |
| | N/P | 1.89 | 2.68 | 0.43 |
| | C/P | 0.68 | 2.32 | 0.55 |
| 细根 | 分解速率 | 30.29*** | 42.72*** | 8.78*** |
| | C释放速率 | 19.16*** | 74.96*** | 4.63*** |
| | N释放速率 | 10.70*** | 10.18*** | 7.60*** |
| | P释放速率 | 4.69** | 20.01*** | 3.77** |
| | C/N | 12.64*** | 6.00*** | 4.06** |
| | N/P | 0.09 | 3.09* | 0.53 |
| | C/P | 0.46 | 1.57 | 0.64 |

注: *表示$P < 0.05$; **表示$P < 0.01$; ***表示$P < 0.001$。

**表 5　不同间伐强度下华北落叶松叶片凋落物和细根分解方程及分解参数**

Tab. 5　Decomposition equations and decomposition parameters of needle litter and fine roots in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* under different thinning intensities

| 类型 | 处理 | 拟合方程 | 相关系数 | 分解速率/($a^{-1}$) | 凋落物分解50%所需时间/a | 凋落物分解95%所需时间/a |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 叶片凋落物 | CK | $y = 0.995\ 3e^{-0.296\ 9t}$ | 0.850 5 | 0.297 | 2.335 | 10.090 |
| | LT | $y = 0.990\ 2e^{-0.369\ 2t}$ | 0.900 4 | 0.369 | 1.877 | 8.114 |
| | MT | $y = 0.987\ 0e^{-0.348\ 9t}$ | 0.891 1 | 0.349 | 1.987 | 8.586 |
| | HT | $y = 0.991\ 6e^{-0.341\ 8t}$ | 0.897 8 | 0.342 | 2.028 | 8.765 |
| 细根 | CK | $y = 1.032\ 2e^{-0.568\ 2t}$ | 0.964 1 | 0.568 | 1.220 | 5.272 |
| | LT | $y = 1.086\ 2e^{-0.867\ 3t}$ | 0.955 1 | 0.867 | 0.799 | 3.454 |
| | MT | $y = 1.058\ 1e^{-0.724\ 7t}$ | 0.922 5 | 0.725 | 0.956 | 4.134 |
| | HT | $y = 1.011\ 6e^{-0.521\ 7t}$ | 0.911 5 | 0.522 | 1.329 | 5.742 |

含量在分解前半年未表现出明显变化，之后一直呈增加状态，一年半的分解之后，对照、轻度、中度和重度间伐下，叶片凋落物 N 含量较各自初始值分别增加了 84.11%、60.77%、78.33% 和 67.50%; 叶片凋落物 P 含量在整个分解过程中，呈现先增加后释放状态，但仍高于叶片凋落物初始 P 含量，分别较叶片凋落物初始 P 含量增加了 33.10%、15.30%、19.90% 和 19.78%。如图 3 所示，整个分解过程中，叶片凋落物 C/N 呈现降低状态，一年半的分解之后，对照、轻度、中度和重度间伐处理分别比初始 C/N 降低了 54.80%、47.30%、54.33% 和 50.61%; 叶片凋落物 N/P 和 C/P 均呈现先降低后增加状态，叶片凋落物 N/P 在分解一年半之后，比叶片凋落物初始 N/P 明显增加，分别较初始增加了 39.95%、39.63%、49.82% 和 41.47%; 而叶片凋落物 C/P 在分解一年半之后，比叶片凋落物初始 C/P 明显降低，分别较初始叶片凋落物 C/P 降低了 36.99%、26.35%、31.51% 和 30.61%。

细根 C、N、P、C/N 在不同间伐强度及不同分解时期存在显著差异（$P < 0.01$），而 N/P 和 C/P 则无显著差异（$P > 0.05$）（表 4）。细根 C 含量在整个分解过程中呈现释放状态，一年半的分解之后，对照、轻度、中度和重度间伐下，细根 C 含量较各自初始 C 含量分别降低 14.14%、8.78%、6.13% 和 8.02%; 细根 N 含量一直呈增加状态，一年半的分解之后，对照、轻度、中度和重度间伐下，细根 N 含量较各自初始 N 含量分别增加了 60.85%、44.20%、58.41% 和 59.72%; 细根 P 含量在整个分解过程中呈现释放状

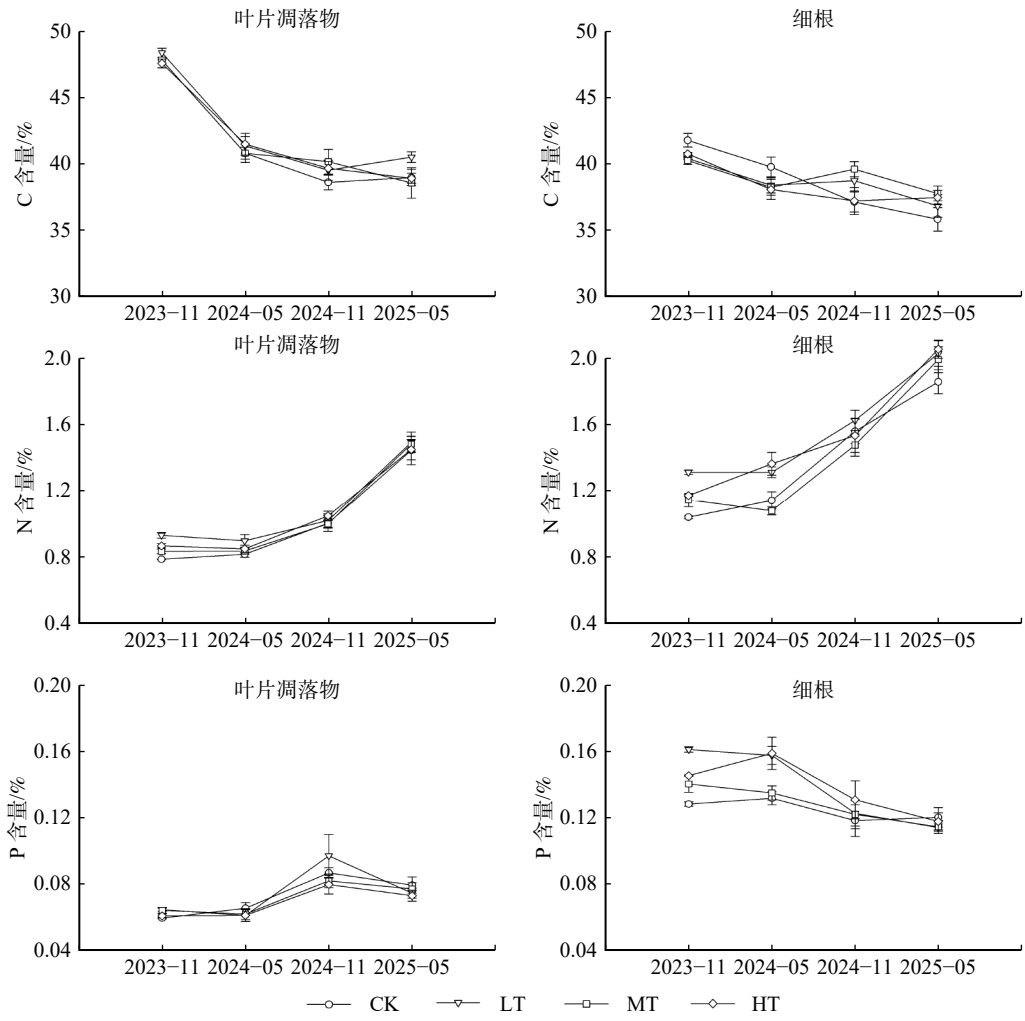



图 2 不同间伐强度下华北落叶松叶片凋落物和细根分解过程中 C、N、P 含量变化

Fig. 2 Changes in C, N, P concentrations of needle litter and fine roots in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* under different thinning intensities

态，一年半的分解后，分别较细根初始 P 含量降低了 6.20%、29.02%、18.28% 和 18.83%。如图 3 所示，整个分解过程中，细根 C/N 呈现降低状态，对照、轻度、中度和重度间伐处理分别比初始降低了 46.47%、36.11%、40.59% 和 42.15%；细根 N/P 比呈现增加状态，分别较初始增加了 73.46%、103.09%、94.22% 和 98.80%；而细根 C/P 比在整个分解时期表现出明显的变化趋势。

### 3.5 影响华北落叶松叶片凋落物和细根分解速率的因素分析

华北落叶松叶片凋落物和细根分解速率与分解期间 5 cm 深处土壤温度和土壤含水量、初始养分含量的 Pearson 相关分析结果见表 6。其中，叶片凋落物分解速率与 5 cm 深处土壤温度（$P < 0.05$）、初始叶片凋落物 N 含量（$P < 0.01$）和初始叶片凋落物 P 含量（$P < 0.01$）呈显著正相关，而与初始叶片凋落物 C/N（$P < 0.05$）和 C/P（$P < 0.01$）呈显著负相关，与土壤含水量、初始叶片凋落物 C 含量及 C/N 未表现出显著相关性（$P > 0.05$）；细根分解速率与细根初始 N 含量（$P < 0.01$）和 P 含量（$P < 0.01$）呈显著正相关，与细根初始 C/N（$P < 0.05$）和 C/P（$P < 0.01$）呈显著负相关，而与土壤温度和土壤含水量、初始叶片凋落物 C 含量及 C/N 未表现出显著相关性（$P > 0.05$）。

## 4 讨 论

### 4.1 间伐对华北落叶松叶片凋落物和细根分解速率的影响

本研究表明，不同强度的间伐处理均显著促进了华北落叶松叶片凋落物的分解速率，分解速率表现为轻度间伐 > 中度间伐 > 重度间伐 > 对照（图 1、表 5）。这一结果与之前研究[7,14,31]一致，即间伐通过改善林内微环境加速凋落物分解过程。轻度和中度间伐通过降低林分密度，显著提高了林下土壤温度和土壤含水量（表 2），为微生物及中小型土壤动物（如跳虫 *Collembola* spp.，螨类 *Acari* spp.）提供了更适宜的活动条件[35−36]，从而增强了以微生物主导的酶促分解效率以及土壤动物对凋落物的物理破碎作用，共同推动了分解速率的提升。相关分析进一步证

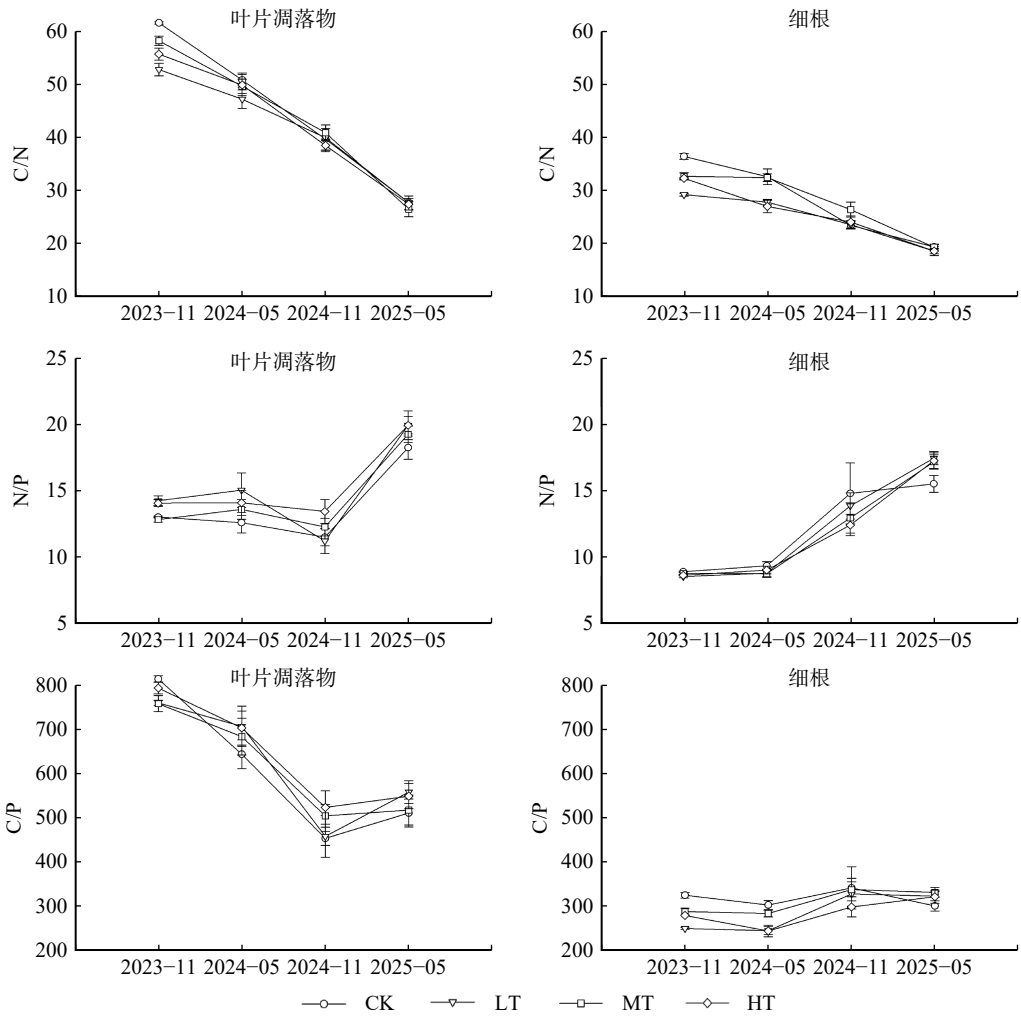



图 3　不同间伐强度下华北落叶松叶片凋落物和细根分解过程中 C/N、N/P、C/P 变化

Fig. 3　Changes in C/N, N/P, C/P of needle litter and fine roots in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii* under different thinning intensities

**表 6　华北落叶松叶片凋落物和细根分解速率与土壤温度、含水量、初始养分含量的关系**

Tab. 6　Relationship between decomposition rates of needle litter and fine roots and soil temperature, soil water content, as well as initial nutrient contents in *L. gmelinii* var. *principis-rupprechtii*

| 项目 | | 分解速率 | |
|---|---|---|---|
| | | 叶片凋落物 | 细根 |
| 土壤温度 | | 0.68* | 0.26 |
| 土壤含水量 | | 0.34 | −0.28 |
| 叶片凋落物/细根 | C含量 | 0.34 | −0.13 |
| | N含量 | 0.74** | 0.79** |
| | P含量 | 0.72** | 0.75** |
| | C/N | −0.68* | −0.73** |
| | N/P | 0.17 | −0.35 |
| | C/P | −0.72** | −0.69* |

注: 表中数值为Spearman相关系数, *代表$P < 0.05$; **代表$P < 0.01$; ***代表$P < 0.001$。

明, 叶片凋落物分解速率与土壤温度呈显著正相关(表 6), 为环境变化驱动凋落物分解提供了定量支持。尽管重度间伐下, 土壤温度和含水量增幅最大, 但其对分解的促进作用弱于轻度和中度处理, 这表明, 高强度间伐可能在短期内改变了林分的结构特征或资源供给状态, 对部分关键分解者群落产生了扰动效应, 从而削弱了微环境改善带来的正向促进作用[37]。此外, 间伐还通过改变凋落物质量对分解过程产生间接调控[8,14,31]。本研究发现, 间伐改变了林木的生长策略和养分分配。轻度间伐显著提高了叶片凋落物和细根的初始氮(N)含量, 同时降低了 C/N 和 C/P(表 3)。由于凋落物 C/N 和 C/P 是反映凋落物分解难易程度的经典化学计量指标, 其下降通常意味着凋落物质量更高、更易被分解者利用[8]。与之相符, 叶片凋落物分解速率与初始 N、P 含量呈正相关关系, 与初始 C/N、C/P 呈负相关关系(表 6)。这说明间伐后, 林木资源竞争缓解, 促进了养分向叶片和细根的富集, 提高了凋落物的内在可分解性, 从而增强了分解过程的底物驱动效应[14,31]。

与叶片凋落物相比, 细根的分解对间伐强度的响应呈现出更高的复杂性。由于本研究中, 叶片凋

落物和细根分解使用的凋落物分解袋的孔径(1.0 和 0.1 mm)是不一致的，且以往研究[38]表明，0.1 mm 的分解袋虽能防止细根流失，同时也隔离了大多数土壤微型节肢动物(如跳虫、螨类)对根系分解的贡献，这可能会低估细根分解速率，因此本研究不对叶片凋落物和细根分解速率进行对比，仅在同一处理条件下，对比不同间伐条件下分解速率的变化。轻度和中度间伐显著促进了细根分解，而重度间伐反而使其分解速率低于对照(图 1、表 5)。这一结果可能与分解环境的异质性增强密切相关[13,20,39]。埋藏在土壤中的细根，其分解过程不仅受表层微气候影响，更受土壤物理结构、水分动态及根际微生物群落的直接调控[23−24]。尽管重度间伐提高了表层土壤温度和含水量，但重度间伐可能导致根系周转减缓或根系分泌物输入减少，进而降低土壤微生物活性(激发效应减弱)[12]；此外，间伐会减少林木根系生物量，促进林下灌草植被的生长，这种作用在重度间伐下增加更为明显[40−41]，这将对微生物网络造成结构性干扰，进一步影响细根分解[37,42]。塞罕坝地处寒温带向温带的过渡地带，高海拔、低气温是本地区的典型特征，温度更是植物分解的主要限制因子，而间伐带来的地温升高可能对分解产生比热带/亚热带地区更为显著的“增温效应”[20]。此外，细根的初始化学性质(如 C/N，C/P)对间伐的响应比叶片凋落物更敏感(表 3)。尽管重度间伐下，细根的初始 C/N 和 C/P 也有所下降，但其对分解的正面效应可能被上述不利的微环境变化所掩盖，甚至逆转。

### 4.2 间伐对华北落叶松叶片凋落物和细根养分释放的影响

研究发现，间伐处理对叶片凋落物分解过程中的养分元素动态模式影响不显著(表 4)；但间伐放缓了细根凋落物 C 释放和 N 累积，加快了 P 释放，同时显著影响了分解初始时的养分含量，并因此间接调控了整个分解序列中的细根养分释放格局。在整个分解过程中，叶片凋落物和细根的 C 含量均表现出稳定的净释放趋势(图 2、3)，说明碳损失在时间序列上具有一致的方向性[13,31,39]。分解早期，凋落物中易分解的有机化合物(如可溶性糖、淀粉和部分半纤维素)被微生物快速同化并矿化为 $CO_2$[27]。间伐处理并未改变叶片凋落物 C 释放的整体趋势，但间伐处理(尤其是轻度)提高了分解速率，使 C 释放进程加快，表现为单位时间内更多来自叶片凋落物的有机碳被归还到土壤中。同时，间伐放缓了细根 C 释放，之前研究也发现，针叶林间伐后，短期时间内地上针叶凋落物的累积会抑制细根 C 释放[13]。这对于人工林土壤碳库的更新和生态系统碳循环通量具有积极意义[25,43]。

叶片凋落物和细根的 N 含量在分解过程中均表现为净富集(图 2)。这是分解初期的典型特征，其主要原因是分解微生物(尤其是真菌)为满足自身生长对氮的需求，从周围环境中吸收并固持无机氮，从而导致凋落物残体中的 N 浓度相对增加[25,27]。以往研究[13]也发现，凋落物 N 含量低于 2% 或 C/N 高于 20 时，N 元素会呈累积状态，这与本研究结果一致。间伐处理下，凋落物初始 N 含量更高，意味着其在整个分解序列中，可能具有更强的 N 固持潜力或更长的固持期，同时，间伐会延长细根 N 累积的时间[13]。N 富集可能是来自于微生物菌丝的转运或土壤有机质的迁移，针对华北落叶松这种贫瘠土壤林分来讲，将有利于保留林木的养分需求，这也表明，间伐通过减少林木株数促进林下植被生长，可能会进一步改变土壤微生物菌群的变化和土壤有机质的迁移，进一步促进保留木的生长，而这一过程是否存在及主要路径还需进一步的数据验证。

叶片凋落物和细根表现出不同的 P 释放模式。叶片凋落物 P 呈现先富集后释放的动态特征，但末期仍高于初始水平，可能反映分解初期微生物的 P 需求与固持行为占主导，而中后期，随着有机质矿化加剧，磷酸盐开始释放[25,27]。相比之下，细根 P 在整个研究期内表现为净释放(图 2)，说明细根磷损失在时间序列上更具方向一致性。这种差异可能与凋落物中 P 的有机结合形态和矿化难易程度有关，即细根中 P 的形态可能更易被矿化释放[16]。轻度间伐下，细根 P 的释放率最高，且与该处理下，细根分解速率同步达到峰值，显示出分解速率与磷释放速率紧密的耦合关系。

分解过程中，叶片凋落物和细根的 C/N 均持续下降(图 3)，反映凋落物质量逐步改善并趋近微生物活动所需的低 C/N 特征。叶片凋落物 C/P 表现为下降趋势，而细根 C/P 变化不显著；同时，叶片凋落物和细根的 N/P 均呈上升趋势(图 3)，表明 C、N、P 释放在分解过程中存在异步性，通常 N 和 P 的释放滞后于 C。间伐处理通过提高初始养分含量(降低了 C/N、C/P)，使得凋落物残体在分解过程中，能更快地达到微生物活动的“理想”化学计量比阈值[15,20]，理论上，有助于更早地启动 N 和 P 的净矿化释放，从而增加分解过程中植物可利用养分的有效供给速率[43]。

## 5 结 论

本研究通过塞罕坝华北落叶松人工林间伐试验表明，轻度和中度间伐能够改善林内土壤温度和含水量，并显著提升凋落物质量(如提高 N、P 含量，降

低 C/N 和 C/P)，从而有效加速叶片凋落物与细根的分解进程，其中轻度间伐的促进效应最强；重度间伐虽改善了微环境，并对叶片凋落物分解具有促进作用，但其较高的扰动强度抑制了细根的分解进程。间伐未改变凋落物分解中碳释放、氮富集的基本模式，但通过显著加快分解速率，缩短了养分在凋落物层的滞留时间，从而提高了碳归还与氮、磷等养分元素的循环效率。综上，轻中度间伐强度是促进林下养分周转、提升养分循环效率及维持地力的更适宜强度范围。因此，建议在塞罕坝华北落叶松人工林中，优先采用轻度至中度的间伐措施，以在优化林分结构的同时，通过改善微环境与凋落物质量，实现对生态系统物质循环的有效驱动与调控。

## 参　考　文　献


[1] 张会儒, 雷相东, 符利勇, 等. 中国森林资源质量现状与提升对策 [J]. 陆地生态系统与保护学报, 2024, 4(5): 46−54.
Zhang H R, Lei X D, Fu L Y, et al. The current situation and improvement strategies of forest resource quality in China [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2024, 4(5): 46−54.

[2] 黄栋才, 郭鑫, 王得祥, 等. 不同经营方法对秦岭华北落叶松林分生长和林下植被的影响 [J]. 林业科学, 2024, 60(8): 57−66.
Huang D C, Guo X, Wang D X, et al. Effects of different management methods on stand growth and understory vegetation of *Larix principis-rupprechtii* in Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(8): 57−66.

[3] 冉馨, 孙晓梅, 吴春燕, 等. 降水减少和间伐对日本落叶松人工林根系分布与生理特性的影响 [J]. 林业科学, 2025, 61(7): 157−169.
Ran X, Sun X M, Wu C Y, et al. Effects of precipitation reduction and thinning on the root distribution and physiological characteristics of *Larix kaempferi* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(7): 157−169.

[4] 周雨飞, 罗超, 李生, 等. 亚热带马尾松林阔叶化改造对林分结构的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 11−21.
Zhou Y F, Luo C, Li S, et al. Effects of broadleaved transformation on stand structure of *Pinus massoniana* forest in subtropical area [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 11−21.

[5] Liu Q, Sun Y, Wang G R, et al. Short-term effects of thinning on the understory natural environment of mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountain area, Northeast China [J]. Peer J, 2019, 7: e7400.

[6] Yu J T, Zhan X N, Xu C Y, et al. Thinning can increase shrub diversity and decrease herb diversity by regulating light and soil environments [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 948648.

[7] 陈家琛, 左晓东, 陈立, 等. 间伐对杉木人工林凋落物分解和养分释放速率的影响 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 119−125.
Chen J C, Zuo X D, Chen L, et al. Effects of different thinning intensities on the decomposition and nutrient release rate of Chinese fir plantation leaves [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(2): 119−125.

[8] 李国雷, 刘勇, 李瑞生, 等. 油松叶凋落物分解速率、养分归还及组分对间伐强度的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 52−57.
Li G L, Liu Y, Li R S, et al. Responses of decomposition rate nutrient return and composition of leaf litter to thinning intensities in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(5): 52−57.

[9] 徐扬. 抚育间伐对油松人工林凋落物分解影响的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
Xu Y. The effects of thinning on litter decomposition of *Pinus tabulaeformis* plantation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.

[10] 林娜, 刘勇, 李国雷, 等. 抚育间伐对人工林凋落物分解的影响 [J]. 世界林业研究, 2010, 23(3): 44−47.
Lin N, Liu Y, Li G L, et al. Research progress of impact of thinning on plantation litter decomposition [J]. World Forestry Research, 2010, 23(3): 44−47.

[11] Giweta M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review [J]. Journal of Ecology and Environment, 2020, 44(1): 11.

[12] Hou X F, Li P, Wu X J, et al. Differences in nutrient release and decay rate of poplar leaf litter and fine roots and their relationship with substrate quality and decomposition environment under ozone pollution [J]. Environmental and Experimental Botany, 2024, 226: 105898.

[13] 王晓荣, 牛红玉, 曾立雄, 等. 不同营林措施对马尾松细根分解与养分释放的影响 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2337−2345.
Wang X R, Niu H Y, Zeng L X, et al. Effects of different forest management practices on fine root decomposition and nutrient release in *Pinus massoniana* forests [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(8): 2337−2345.

[14] 王晓荣, 雷蕾, 付甜, 等. 抚育择伐对马尾松林凋落叶分解速率和养分释放的短期影响 [J]. 林业科学, 2020, 56(4): 12−21.
Wang X R, Lei L, Fu T, et al. Short-term effects of selective cutting for tending on leaf litter decomposition rate and nutrient release in *Pinus massoniana* forests [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(4): 12−21.

[15] Chen X, Page-Dumroese D S, Lü R H, et al. Interaction of initial litter quality and thinning intensity on litter decomposition rate, nitrogen accumulation and release in a pine plantation [J]. Silva Fennica, 2014, 48(4): 1−13.

[16] Pang Y, Tian J, Lü X Y, et al. Contrasting dynamics and factor controls in leaf compared with different-diameter fine root litter decomposition in secondary forests in the Qinling Mountains after 5 years of whole-tree harvesting [J]. Science of the Total Environment, 2022, 838: 156194.

[17] Prescott C E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling [J]. Tree Physiology, 2002, 22(15−16): 1193−1200.

[18] Chen Y M, Liu Y, Zhang J, et al. Microclimate exerts greater control over litter decomposition and enzyme activity than litter quality in an alpine forest-tundra ecotone [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 14998.

[19] Guo L L, Deng M F, Yang S, et al. The coordination between leaf and fine root litter decomposition and the difference in their controlling factors [J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(11): 2286−2296.

[20] Wu Q X, Ni X Y, Sun X Y, et al. Substrate and climate determine terrestrial litter decomposition [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2025, 122(7): e2420664122.

[21] Chen J J, Zhu J, Wang Z W, et al. Canopy gaps control litter decomposition and nutrient release in subtropical forests [J]. Forests, 2023, 14(4): 673.

[22] Saha S, Huang L, Khoso M A, et al. Fine root decomposition in forest ecosystems: an ecological perspective [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1277510.

[23] Fujii S, Takeda H. Dominant effects of litter substrate quality on the difference between leaf and root decomposition process above- and belowground [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12): 2224−2230.

[24] Han S H, Kim S, Chang H, et al. Soil depth- and root diameter-related variations affect root decomposition in temperate pine and oak forests [J]. Journal of Plant Ecology, 2019, 12(5): 871−881.

[25] Gao T, Song X Y, Ren Y Z, et al. Thinning intensity affects carbon sequestration and release in seasonal freeze-thaw areas [J]. Journal of Forestry Research, 2023, 34(4): 993−1006.

[26] Liu X, Jiao L, Cheng D, et al. Light thinning effectively improves forest soil water replenishment in water-limited areas: observational evidence from *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637(11): 131408.

[27] Bonanomi G, Idbella M, Zotti M, et al. Decomposition and temperature sensitivity of fine root and leaf litter of 43 mediterranean species [J]. Plant and Soil, 2021, 464(1): 453−465.

[28] 张鑫, 邢亚娟, 闫国永, 等. 细根对降水变化响应的 meta 分析 [J]. 植物生态学报, 2018, 42(2): 164−172.
Zhang X, Xing Y J, Yan G Y, et al. Response of fine roots to precipitation change: a meta-analysis [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(2): 164−172.

[29] 戴楠, 王寅, 王梓静, 等. 植被恢复年限对塞罕坝华北落叶松人工林土壤碳氮磷储量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5): 92−99.
Dai N, Wang Y, Wang Z J, et al. Effects of vegetation recovery years on soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in Saihanba, Hebei Province of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 92−99.

[30] 贾建恒, 侯树航, 次柯凡, 等. 不同经营模式华北落叶松的径向生长及对干旱事件的响应 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1708−1714.
Jia J H, Hou S H, Ci K F, et al. Radial growth of *Larix principis-rupprechtii* and responses to drought events under different forest management models [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(6): 1708−1714.

[31] 周运红, 李建亮, 王利东, 等. 间伐对华北落叶松林凋落物分解的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 29−37.
Zhou Y H, Li J L, Wang L D, et al. Effects of thinning on litter decomposition of *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(12): 29−37.

[32] Wang H, Liu S R, Mo J M. Correlation between leaf litter and fine root decomposition among subtropical tree species [J]. Plant and Soil, 2010, 335(1): 289−298.

[33] Satterthwaite F E. An approximate distribution of estimates of variance components [J]. Biometrics Bulletin, 1946, 2(6): 110−114.

[34] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing[Z]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

[35] Hackett T D, Sauve A M, Maia K P, et al. Multi-habitat landscapes are more diverse and stable with improved function [J]. Nature, 2024, 633: 114−119.

[36] Klein J, Low M, Sjögren J, et al. Short-term experimental support for bird diversity retention measures during thinning in European boreal forests [J]. Forest Ecology and Management, 2022, 509(7): 120084.

[37] Yang L, Wang J S, Geng Y, et al. Heavy thinning reduces soil organic carbon: evidence from a 9-year thinning experiment in a pine plantation [J]. Catena, 2022, 211(1): 106013.

[38] Luan J W, Li S Y, Liu S R, et al. Biodiversity mitigates drought effects in the decomposer system across biomes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121(13): e2313334121.

[39] 余士香, 黄凤生, 成向荣. 间伐对杉木叶凋落物和细根分解的影响 [J]. 华东森林经理, 2018, 32(1): 14−17, 20.
Yu S X, Huang F S, Cheng X R. Effects of thinning on leaf litter and fine root decomposition in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. East China Forest Management, 2018, 32(1): 14−17, 20.

[40] Li X K, Li Y N, Zhang J, et al. The effects of forest thinning on understory diversity in China: a meta-analysis [J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(10): 1225−1240.

[41] Qin J H, Lu J, Peng Y F, et al. Thinning-induced decrease in fine root biomass, but not other fine root traits in global forests [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370(1): 122938.

[42] Shen Y F, Cheng R M, Xiao W F, et al. Effects of understory removal and thinning on soil aggregation, and organic carbon distribution in *Pinus massoniana* plantations in the Three Gorges Reservoir area [J]. Ecological Indicators, 2021, 123(1): 107323.

[43] 张子胥, 胡丁猛, 卢昱存, 等. 抚育间伐条件下凋落物分解对海岸带防护林土壤有机碳稳定性的影响 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 293−301.
Zhang Z X, Hu D M, Lu Y C, et al. The impact of litter decomposition on soil organic carbon stability in coastal shelter forests under thinning [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 293−301.

（责任编辑 李 契
责任编委 赵秀海）