

间伐对杉木人工林凋落物分解和养分释放速率的影响

陈家琛^{1,2}, 左晓东^{1,2}, 陈立^{1,2}, 朱琴^{1,2}, 孟芳芳^{1,2}, 廖文海^{1,2},
范福金³, 曹光球^{1,2}, 曹世江^{1,2*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 国家林业和草原局 杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002;
3. 洋口国有林场, 福建 顺昌 353211)

摘要:明确间伐对杉木人工林凋落物分解与养分释放的影响,以期为人工林持续性经营提供科学指导。以福建省洋口国有林场板桥管护站 13 年生杉木人工林为研究对象,2019 年设置未间伐(CK,保留密度 2 505 株/hm²)、轻度间伐(LIT,保留密度 1 500 株/hm²)、中度间伐(MIT,保留密度 1 200 株/hm²)、重度间伐(HIT,保留密度 900 株/hm²)4 个处理。2020 年于试验林地内采用原位分解法分析不同间伐强度处理下杉木人工林凋落物,历经 1 年分解时间后,其分解速率和养分释放速率的变化。结果表明,未间伐、轻度、中度、重度间伐下杉木人工林凋落物年分解速率依次为 0.27,0.34,0.32,0.30 g·g⁻¹·a⁻¹;相较于未间伐,轻度、中度、重度间伐处理下杉木林凋落物分解速率分别提升 25.93%、18.52%、11.11%。不同强度间伐下,杉木林凋落物 C 含量在 180 d 前下降显著,之后波动相对平稳,N、P 含量呈先释放后固持的模式。双因素方差分析表明,处理和分解时间对凋落物分解速率和 C、N、P 养分释放影响显著。短期来看,不同强度间伐均能促进凋落物分解,加速养分周转,但随着间伐强度增加,凋落物分解速度减缓。今后建议选取轻度间伐,以调控林分结构,促进养分循环。

关键词:杉木;间伐;凋落物分解;养分释放

中图分类号:S723.1

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0119-07

Effects of Different Thinning Intensities on the Decomposition and Nutrient Release Rate of Chinese Fir Plantation Leaves

CHEN Jia-chen^{1,2}, ZUO Xiao-dong^{1,2}, CHEN Li^{1,2}, ZHU Qin^{1,2}, MENG Fang-fang^{1,2}, LIAO Wen-hai^{1,2},
FAN Fu-jin³, CAO Guang-qiu^{1,2}, CAO Shi-jiang^{1,2*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center, National Administration of Forestry and Grassland, Fuzhou 350002, Fujian, China;
3. Yangkou State-Owned Forest Farm, Shunchang 353211, Fujian, China)

Abstract: To better understand the impacts of thinning on litter decomposition and nutrient release of Chinese fir plantations, and provide scientific guidelines for long-term plantation management, taking the 13-year-old Chinese fir plantations at Banqiao Management Station, Yangkou State-Owned Forestry Farm, Fujian Province, China, as the research objects to carry out the thinning experiment. Four treatments were established in 2019: no thinning (control, with the initial retention density of 2 505 plants/hm²), light thinning (LIT, retention density: 1 500 plants/hm²), medium thinning (MIT, retention density: 1 200 plants/hm²), and heavy thinning (HIT, retention density: 900 plants/hm²). In 2020, the in-situ decomposi-

收稿日期:2022-02-18 修回日期:2022-04-13

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0600301);国家自然科学基金(71201800739);福建农林大学林学高峰学科(71201800739)。

第一作者:陈家琛。研究方向:森林培育。E-mail:chenjiachen0123@126.com

* 通信作者:曹世江,博士,讲师。研究方向:森林培育。E-mail:csjiang1123@126.com

tion method was adopted to examine the changes in decomposition rate and nutrient release rate of litters after one year of decomposition in the experimental forest under various thinning intensity treatments. The annual decomposition rates of litter fall in four treatments mentioned above were 0.27, 0.34, 0.32, and 0.30 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Compared with the control, the decomposition rates of litter fall increased by 25.93%, 18.52%, and 11.11%, respectively under light, medium, and heavy thinning treatments. The carbon content of litters declined dramatically in 180 days after thinning and subsequently fluctuated reasonably and smoothly, but the N and P contents showed a pattern of first being released and then being fixed. Two-way ANOVA showed that treatment and decomposition time had significant effects on the litter decomposition rate and C, N and P nutrient release. In the short term, thinning with different intensities could promote the litter decomposition and accelerate nutrient turnover, but the litter decomposition rate decreased as the thinning intensity increased. In the future, it is recommended to select light thinning to regulate the Chinese fir plantations and promote nutrient cycling.

Key words: litter decomposition; thinning; nutrient release; Chinese fir plantation

凋落物又被称为枯落物,森林枯落物的主成分大多是植物自然死亡之后的枯枝、枯叶、果实。在森林所有类型的凋落物中,叶凋落物占比达到 55%~73%^[1]。凋落物分解被当作土壤形成和养分循环的重要组成部分,在生态系统演化中起着重要作用^[2],并且凋落物分解也是树木生长所需的有机和无机养分的来源^[3-4]。凋落物的降解易受生物与非生物因素的影响,例如,分解微生物^[5]、土壤含水率^[6]、气温^[7]。另外,森林类型^[8]也是一个重要因子。凋落物分解速率在很大程度上影响着森林生态系统碳转化和土壤养分供给^[9]。一般来说,阔叶林内凋落物养分循环速率高于针叶林^[10]。因此,针叶林,尤其是针叶纯林,凋落物降解速度比阔叶林更慢^[11]。陈思路等人研究表明,不同树种间器官凋落物的化学性质有着较大差异,其 N 含量具体表现为观光木>米槠>台湾相思>杉木^[12]。

间伐作为常见的森林抚育措施^[13],通常会使得林分内树种比例、微生物组成、林分质量产生较大改变^[14],并对林内光有效性、大气温湿度、土壤温湿度、凋落物质量与数量产生作用^[15-16],进而共同影响凋落物周转及养分矿化^[13]。现有研究证实,适度间伐通过对凋落物层温度、土壤蔗糖酶、纤维素酶等施加作用加速凋落物降解^[17],而过度间伐却导致养分回归缓慢^[18]。可见,不同间伐处理对凋落物分解的作用并不一致。此外,研究地域、间伐时间、间伐强度、间伐方式等通常形成不同营林效果,使得凋落物分解差异显著^[19-21]。例如,ROIG 等^[22]通过 2 种间伐强度的试验证实,凋落物产量与间伐强度呈负相关。NAVARRO 等^[13]开展的 3 种间伐强度表明,轻度间伐增加了树木水平上的凋落物产量,提高了树木的单株生产力,间伐过后,林下不耐阴植被恢复速度明显加快。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)具备广泛的生态价值和极高的经济价值,并被作为南方地区营林的主要树种^[23]。目前,受当地农民长期砍伐大径材杉木及多代连载的影响,林场管护范围内杉木林林分质量、生态服务功能不稳定^[24],如何实施科学有效的营林措施,提升杉木林林分质量和生态服务功能,成为辖区森林可持续经营的重大问题。鉴于此,本研究选取洋口林场板桥管护站 011 林班 35 大班 010 小班(011-35-010)为试验林,设置未间伐、轻度间伐、中度间伐、重度间伐 4 种间伐处理,分析不同强度间伐对杉木林凋落物分解和养分释放的影响,以期为人工林持续性经营提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验林地处福建省顺昌县洋口国有林场板桥工区(118°32′—119°04′E, 27°27′—27°13′N),具备亚热带季风气候特点。年日照时长 1 800 h,无霜期 280 d,年均温 18.8℃,年均降水 1 800 mm。海拔 185~292 m,平均坡度 30°,坡向为南坡。土壤属暗红壤,土深 90 cm 以上,地位指数>18^[24]。该区杉木林为 2008 年造林,初值密度 2 500 株/hm²,长期以来人为干扰较少,以杉木林为优势树种。伴生植被以粗叶榕(*Ficus hirta*)、芒萁骨(*Dicranopteris dichotoma*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、紫麻(*Oreocnide frutescens*)、江南双盖蕨(*Diplazium mettenianum*)和傅氏凤尾蕨(*Pteris fauriei*)等为主。

2 研究方法

2.1 试验设计

2018 年 10 月,于洋口林场根据海拔、坡度和坡向等立地条件选取板桥工区 011 林班 35 大班 010

小班杉木人工林进行杉木间伐试验。2019 年 3 月开始对 13 年生杉木人工林实施间伐处理,设置 4 种间伐保留密度:未间伐(2 505 株/hm²)、轻度间伐(1 500 株/hm²)、中度间伐(1 200 株/hm²)、重度间伐(900 株/hm²)。每种处理 3 个重复,样地面积 20 m×20 m,共 12 块样地,样地之间设置 5 m 缓冲区。间伐 1 a 后样地基本情况如表 1 所示。

2020 年 3 月,就地收取样地内新鲜凋落物,带回实验室,65 ℃干燥至恒重,同一处理凋落物充分混合,称重 20 g,装入 200 mm×200 mm,孔径 1 mm 的尼龙网袋,袋口密封后标记。于 2020 年 5 月将装有凋落物的尼龙网袋置于 12 块样地中,在每块样地的上、中、下 3 个点位,分别布置 8 袋。布置时先除去地表凋落物、杂草及其他杂物,让分解袋紧靠

土壤表层,然后将原本附着于地表的凋落物、杂草和其他杂物放于分解袋上,使凋落物自然降解。于 2020 年 7 月底—2021 年 5 月底收集。每次收集时在每块样地的上、中、下 3 个点位各取 1 袋,每次收集 36 袋,带回实验室后将凋落物仔细分拣,清理附着于凋落物上的泥土,然后置于 65 ℃下烘干至恒重,称量,最后粉碎保存供凋落物养分测定分析。

凋落物放入尼龙网袋之前,对于混合的凋落物,各处理随机抽取 5 个,便于测定凋落物初始养分。在分解过程中,每个 20 m×20 m 样地的 3 个分解样本混合成 1 个,共 12 个样本。粉碎后过 0.149 mm 筛以进行化学测定。C、N 用元素分析仪测定(Elementar Vario EL, Germany)。P 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,钼锑抗比色法测定。

表 1 13 年生杉木间伐密度试验林基本情况

Table 1 Basic information of 13-year-old Chinese fir plantation to carry out thinning experiment

处理	间伐强度(%)	间伐保留密度/hm ²	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度	坡向/坡度(°)
未间伐	0	2 505	16.03	14.29	0.85	南坡(S)/30
轻度间伐	40	1 500	17.65	13.84	0.80	南坡(S)/30
中度间伐	52	1 200	17.56	14.03	0.70	南坡(S)/30
重度间伐	64	900	18.70	14.71	0.65	南坡(S)/30

2.2 数据分析

2.2.1 凋落物残留率 计算公式如下

$$\text{干质量残留率} = X_t / X_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_t , t 时刻凋落物质量(g); X_0 , 凋落物初始质量(g)。

2.2.2 凋落物分解速率 Olson 指数衰减模型拟合凋落物分解,计算分解常数 k

$$X_t / X_0 = a e^{-kt} \quad (2)$$

式中: a , 拟合参数; k , 分解常数; t , 分解时间(a)。

2.2.3 凋落物分解 50%和 95%耗时如下

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

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

式中: $t_{0.5}$, 凋落物分解 50%所需时间(a); $t_{0.05}$, 凋落物分解 95%所需时间(a)。

2.2.4 凋落物养分释放速率 R_t 公式为

$$R_t = (X_0 C_0 - X_t C_t) / X_0 C_0 \times 100\% \quad (5)$$

式中: R_t , 凋落物分解 C, N, P 释放率(%); X_0 , 凋落物初始质量(g); X_t , 凋落物分解 t 时刻残余质量(g); C_0 , 初始元素含量(g/kg); C_t , 分解 t 时刻元素含量(g/kg)。

SPSS 22.0 和 Excel 2019 进行数据统计分析,采用 One-way ANOVA(单因素方差分析)并进行 LSD *post hoc* (LSD 事后比较)(显著性水平 $P = 0.05$)分析凋落物分解速率和养分含量,并用 Origin 2020 绘图。

3 结果与分析

3.1 间伐对杉木林凋落物初始养分含量的影响

由表 2 可知,间伐 1 a 后,取样分析发现轻度间伐下,凋落物初始 C 含量、C/N 显著高于重度间伐(C 含量: $P = 0.03 < 0.05$, C/N: $P = 0.04 < 0.05$)。凋落物初始 C 含量呈轻度间伐>中度间伐>未间伐>重度间伐,凋落物初始 N 含量呈重度间伐>未间伐>中度间伐>轻度间伐,C/P 呈轻度间伐>中度间伐>未间伐>重度间伐,N/P 呈轻度间伐>重度间伐>未间伐>中度间伐。因此可知,不同间伐强度对杉木林凋落物的初始养分含量影响显著,其中除重度间伐 C 含量低于未间伐外,其余处理均能提高凋落物初始 C 含量。虽然轻度间伐和中度间伐降低了凋落物初始 N 含量和 P 含量,但却提高了 C/N 和 N/P。

3.2 凋落物分解动态

4 种处理凋落物残留率随分解时间不断下降(图 1),处理×时间的交互作用对凋落物分解速率影响极显著(表 3)($P < 0.01$),分解 1 a 后各处理杉木林凋落物残留率为未间伐(CK, 73.05%±1.79%)>重度间伐(HIT, 69.94%±1.71%)>中度间伐(MIT, 67.89%±3.70%)>轻度间伐(LIT, 66.20%±3.46%),3 种处理均能促进凋落物分解,且以轻度间伐分解最快。Olson 指数衰减模型显示

各处理拟合精度均达到显著水平(表4),4种间伐处理凋落物年分解速率为轻度间伐(LIT, $0.34 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) > 中度间伐(MIT, $0.32 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) > 重度间伐(HIT, $0.30 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) > 未间伐(CK, $0.27 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)。未间伐、轻度、中度、重度间伐

$t_{0.5}$ 分别为 2.23、2.06、2.08、2.15 a, $t_{0.95}$ 分别为 9.63、8.94、9.45、9.30 a。可见,间伐均可在一定程度上提高杉木林凋落物的分解速率,但分解速率与间伐强度成反比关系。

表2 不同间伐强度下杉木人工林凋落物初始养分含量^①

Table 2 Initial nutrient contents of litters in *C. lanceolata* plantations under different thinning densities $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	未间伐	轻度间伐	中度间伐	重度间伐
C 含量	469.84±7.93ab	484.79±21.57a	475.84±9.06ab	465.26±8.37b
N 含量	12.48±0.58ab	12.14±0.21b	12.35±0.356b	12.73±0.92ab
P 含量	0.90±0.07a	0.85±0.09a	0.89±0.09a	0.91±0.12a
C : N	37.68±1.39abc	39.90±1.48a	38.54±0.48ab	36.66±0.10bc
C : P	527.89±47.04ab	577.47±72.82a	537.16±50.21ab	519.19±67.21ab
N : P	14.02±0.13a	14.43±0.14a	13.93±0.12a	14.41±0.15a

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$)。

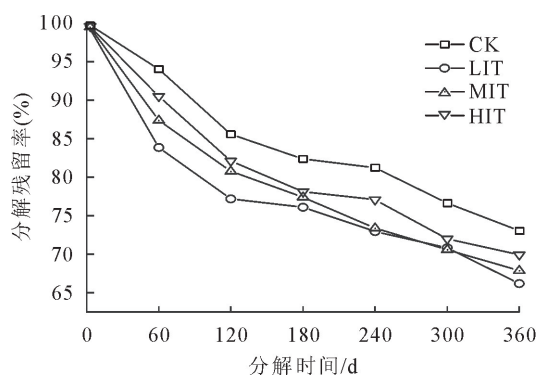


图1 不同间伐强度处理下杉木林凋落物分解动态

Fig. 1 Residual rate of dry mass of litters under different thinning intensities

3.3 凋落叶分解过程中养分释放动态

由表3可知,不同处理对凋落物C释放率影响极显著,分解时间、分解时间与处理的交互作用使C、N、P释放率均存在极显著差异。图2表明,4种处理的凋落物C含量呈现先下降后上升再下降的趋势,分解360 d后未间伐(CK)、轻度间伐(LIT)、中度间伐(MIT)、重度间伐(HIT)处理C含量较各自初始值C含量分别降低25.12%、12.76%、12.01%、22.55%;N

含量60~120 d呈减少状态,随后总体上呈增加趋势,分解360 d后4种处理N含量较初始分别增加2.24%、6.51%、10.61%、6.52%;P含量在60~180 d呈减少状态,随后总体上呈现出不断增加,分解360 d后4种处理P含量较初始分别减少36.92%、7.69%、34.85%、21.33%;C/N在整个分解趋势呈现出先增加后降低,360 d后4种处理C/N较初始降低26.60%、32.08%、20.38%、26.21%,轻度间伐(LIT)处理下降最明显;C/P在200 d之前呈现出无规律变化,随后呈不断下降趋势。N/P在分解的整个阶段内呈现出下降上升在下降的变化趋势,分解360 d后各处理N/P较初始N/P增加39.37%、4.37%、47.63%、27.78%(表4)。

表3 分解速率和养分释放速率的双因素方差分析^①

Table 3 Two-factor analysis of variance of decomposition rate and nutrient release rate (F value)

因素	分解速率	C 释放率	N 释放率	P 释放率
处理	0.985	15.91**	0.483	0.181
时间	21.58**	8.05**	4.97**	5.642**
处理×时间	18.67**	28.53**	12.547**	12.943**

注:*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

表4 不同间伐强度凋落物分解速率及分解方程

Table 4 The decomposition rate and decomposition equation of litters under different thinning intensities

处理	拟合方程	相关系数	分解速率 /($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	凋落物分解 50% 所需时间/a	凋落物分解 95% 所需时间/a
未间伐	$y = 93.515e^{-0.311t}$	0.887	0.27	2.23	9.63
轻度间伐	$y = 94.862e^{-0.335t}$	0.914	0.34	2.06	8.94
中度间伐	$y = 93.598e^{-0.317t}$	0.915	0.32	2.18	9.45
重度间伐	$y = 93.459e^{-0.322t}$	0.919	0.30	2.15	9.30

4 结论与讨论

4.1 结论

凋落物干质量残留率随时间延长呈减小趋势且

呈现出未间伐($73.05\% \pm 1.79\%$) > 重度间伐($69.94\% \pm 1.71\%$) > 中度间伐($67.89\% \pm 3.70\%$) > 轻度间伐($66.20\% \pm 3.46\%$)。

凋落物分解速率随间伐强度上升而下降,轻度、

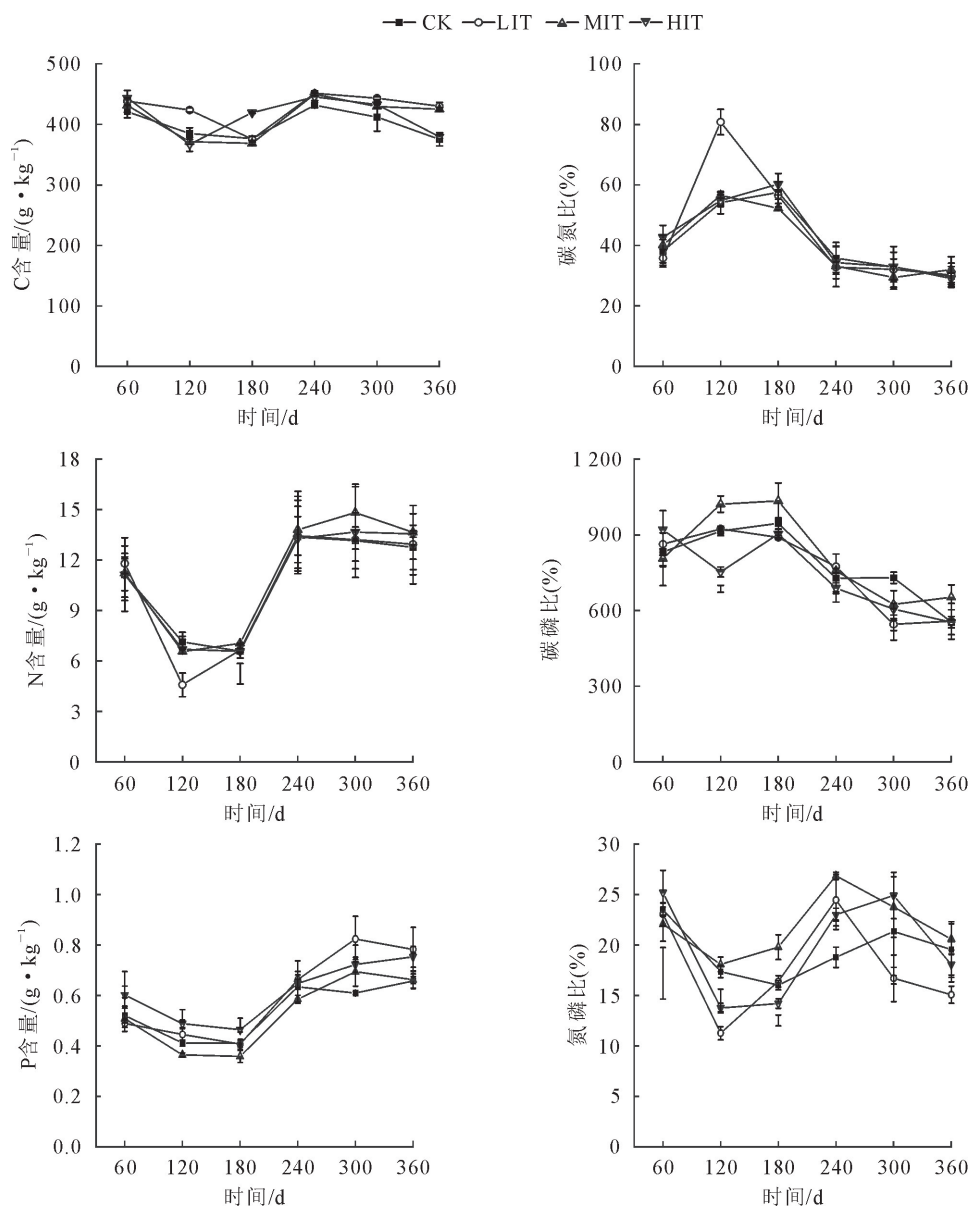


图2 不同间伐强度处理下杉木林凋落物分解过程中C、N、P、C/N、C/P、N/P变化

Fig. 2 Changes of C, N, P, C/N, C/P and N/P in litter decomposition of Chinese fir forest under different thinning intensities

中度、重度间伐处理下杉木凋落物分解半衰期分别为2.06、2.18、2.15 a, 分解95%所需时间分别是8.94、9.45、9.30 a。

间伐对凋落物C、N、P含量在分解过程中影响不同。具体表现为促进凋落物N积累和C、P释放。

今后在进行人工林经营时, 建议选择轻度间伐, 保证科学的林分结构, 促进人工林养分循环。

4.2 讨论

合适的间伐强度, 通过对群落组成、林分质量、土壤温湿度、凋落量、微生物群落等因子施加作用, 加速凋落物降解, 缓解养分过量积累问题^[17,18,20]。本研究发现, 轻度、中度、重度间伐均能在一定程度上促进杉木林凋落物的分解, 这可能有以下2个原因: 第一, 间伐后改变了林内密度与林分郁闭度, 太阳直射面积增大, 地表光照增加, 水分蒸散增强, 使

得地温增加的同时降低了土壤层湿度, 使得微生物群落结构、功能以及土壤酶活性在一定程度上改变, 从而加快凋落物分解^[25-26]。第二, 凋落物初始质量被许多研究者视为是凋落物分解过程中一个重要的因子^[27], 本试验所得结果也支持这一观点。轻度、中度间伐改变了凋落物初始基质, 其中凋落物初始N、P含量较未间伐分别降低2.80%、1.05%和5.89%、1.13%, 主要由于间伐后保留木生存空间扩大, 养分获得途径多样, 生境条件改善, 树木生长周期的延长为养分在老叶中的再吸收提供了充足的时间, 从而降低了残留凋落物中N和P的含量^[19]。凋落物N:P在很大程度上影响着微生物的稳定和适应习惯, 进而影响到凋落物分解^[28]。有研究发现, 当N:P<14时, 凋落物分解对N的依赖性较强, N:P>16时, 凋落物分解收到P限制^[29], 本试验

发现,大多数情况下,凋落物 N/P 总是 >16 ,说明凋落物分解受 P 的限制。

本试验中,不同间伐强度处理后杉木林凋落物分解速率差异明显,轻度、中度、重度间伐较未间伐分别提高了 25.93%、18.52%、11.11%,以轻度间伐分解最快。进一步分析,可能与不同间伐强度影响林分质量和生态功能有关。轻度间伐对林分结构的干扰度最轻,凋落物初始 N/P 最大。另外,野外调查发现,轻度间伐后草本层植物茂盛,草本层植物由于其易分解、周转快速的特点能为分解者提供更多的底物来源,促使分解过程发生显著变化^[30]。重度间伐下虽然初始 N、P 含量最大,但由于强度过大,短期内林内灌木层发育不及时,生物多样性明显降低,分解速率反而不如轻度和中度间伐。其余学者研究结果也表明轻中度间伐下杉木凋落物分解速率最快^[9,17],究其原因可能是轻中度间伐后林内植被大量更新,微生态得到迅速恢复。

通常而论,凋落物养分释放受其本身特性与外界环境,如降雨、温湿度等影响^[31],凋落物养分释放模式主要有 3 种^[32]:(1)淋溶—富集—释放;(2)富集—释放;(3)释放。本研究发现,4 种处理的凋落物 C 的释放具备相同模式,均呈现出淋溶(降低)—富集(上升)—释放(降低)的模式。C 含量的降低主要出现在分解的前中期(0~180 d),分解后期(180~360 d)波动趋势相对平缓,这可能由以下原因引起:(1)分解前中期,凋落物本身易降解物质多,能被分解者直接利用,C 作为凋落物主要元素,其所构建的碳水化合物极易被降解,因此水溶性 C 大量流失使得分解前中期凋落物 C 呈现出快速淋溶的特点;(2)分解前中期正好处于当年的 5—9 月,此时温度的升高可能激活了解者的活性,分解者种类和数量增加加速了凋落物降解,后期受木质素以及纤维素等难降解物质的制约,使得分解速度减缓,我们发现凋落物在分解的 360 d 时 N 含量高于其初始含量,这可能是由于:(1)该时间段内凋落物分解所释放的 N 无法满足分解者生存需要,使得分解者从土壤中吸收 N 供其生长,而其自身消耗的 N 小于其吸收的 N,因此表现出高于初始 N 含量。(2)N 以大气 N 沉降、降水等形式输入土壤^[33],使得 N 含量增加,此时正值第 2 年的夏季,大气降雨活跃。(3)此时凋落物虽然被降解,但是体内 N 可能未被释放,造成 N 含量超过初始 N 含量。另外,本研究所呈现出的 N 的释放模式也与沈芳芳等^[34]的研究结果一致。

凋落物分解初期阶段,可溶性 P 大量存在,最易大量流失^[35],因此在分解初期 60~180 d,不同强

度间伐处理下 P 含量都在净释放。在分解 180~300 d 时间段内凋落物 P 含量呈现上升趋势,且在 180~240 d 时间段内上升最为明显,此时恰处于冬季,温度较低,微生物量小,活性低,不需要大量 P 供给微生物生存,从而导致此时凋落物 P 含量出现增加。在 300~360 d 时间段内,P 含量下降,此时刚好历经雨季,雨水的作用可能是导致 P 含量下降的重要原因,相关研究表明 P 元素受控于雨水冲刷、林分冠层异质性等因素^[36]。

参考文献:

- [1] 刘文飞,沈芳芳,徐志鹏,等.氮沉降对杉木人工林凋落物叶分解过程中养分释放的影响[J].生态环境学报,2019,28(4):695-701.
LIU W F, SHEN F F, XU Z P, et al. Impacts of nitrogen deposition on nutrient release during leaf litter decomposition in *Cunninghamia lanceolata* Plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(4): 695-701. (in Chinese)
- [2] 薛飞,龙翠玲,廖全兰,等.喀斯特森林不同地形凋落物现存量及养分特征[J].西北林学院学报,2021,36(5):28-35.
XUE F, LONG C L, LIAO Q L, et al. Characteristics of litter stock and nutrients in different land forms in Karst forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5): 28-35. (in Chinese)
- [3] 范晓慧,马勇,冯家豪,等.北方城市 10 种常见树木凋落叶的分解及养分释放特征[J].西北林学院学报,2020,35(6):25-31.
FAN X H, MA Y, FENG J H, et al. Decomposition and nutrient release characteristics of ten common tree leaves in northern cities[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 25-31. (in Chinese)
- [4] YAN J, WANG L, HU Y, et al. Plant litter composition selects different soil microbial structures and in turn drives different litter decomposition pattern and soil carbon sequestration capability[J]. Geoderma, 2018, 319: 194-203.
- [5] OSONO T, ONO Y, TAKEDA H. Fungal ingrowth on forest floor and decomposing needle litter of *Chamaecyparis obtusa* in relation to resource availability and moisture condition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(11): 1423-1431.
- [6] HAYNES A G, SCHÜTZ M, BUCHMANN N, et al. Linkages between grazing history and herbivore exclusion on decomposition rates in mineral soils of subalpine grasslands[J]. Plant & Soil, 2014, 374(1-2): 579-591.
- [7] ROBINSON C H. Controls on decomposition and soil nitrogen availability at high latitudes[J]. Plant & Soil, 2002, 242(1): 65-81.
- [8] PRESCOTT C E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling[J]. Tree Physiology, 2002, 22(15-16): 1193-1200.
- [9] 余坦蔚,葛志强,严强,等.杉木人工林自然衰老叶和绿色叶凋落物分解对间伐强度和施肥的响应[J].生态学杂志,2021,40(6):1589-1598.
YU T W, GE Z Q, YAN Q, et al. Responses of decomposition of naturally senescent and green leaf litter to thinning intensity

- and fertilization in Chinese fir plantation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(6): 1589-1598. (in Chinese)
- [10] 张楠, 杨智杰, 胥超, 等. 中亚热带森林转换对凋落物养分归还及养分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 321-328.
- [11] JURGENSEN M, REED D, PAGE-DUMROESE D, *et al.* Wood strength loss as a measure of decomposition in northern forest mineral soil[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(1): 23-31.
- [12] 陈思路, 蔡劲松, 林成芳, 等. 亚热带不同树种凋落叶分解对氮添加的响应[J]. 植物生态学报, 2020, 44(3): 214-227.
- [13] NAVARRO, F. B., ROMERO-FREIRE, *et al.* Effects of thinning on litterfall were found after years in a *Pinus halepensis* afforestation area at tree and stand levels[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 289: 354-62.
- [14] 梁晶, 王庆成, 许丽娟, 等. 抚育对长白山两种林分凋落物分解及土壤的影响[J]. 植物研究, 2015, 35(2): 297-303.
- [15] YONG L, WEIWEI W, XIAO C, *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): 2242-4075.
- [16] 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.
- [17] 肖文姬, 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. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] KUNHAMU T K, KUMAR B M, VISWANATH S. Does thinning affect litterfall, litter decomposition, and associated nutrient release in *Acacia mangium* stands of Kerala in peninsular India? [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(4): 792-801.
- [20] TITUS B D, PRESCOTT C E, MAYNARD D G, *et al.* Post-harvest nitrogen cycling in clearcut and alternative silvicultural systems in a montane forest in coastal British Columbia[J]. Forestry Chronicle, 2006, 82(6): 844-859.
- [21] LONG J, DORREPAAL E, KARDOL P, *et al.* Understory plant functional groups and litter species identity are stronger drivers of litter decomposition than warming along a boreal forest post-fire successional gradient[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 98: 159-170.
- [22] ROIG S, DEL RÍO M, CAÑELLAS I, *et al.* Litter fall in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. stands under different thinning regimes[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 206(1-4): 179-190.
- [23] 邱勇斌, 凌高潮, 郑文华, 等. 间伐对杉木人工林不同组分碳、氮、磷含量及其生态化学计量关系的影响[J]. 林业科学研究, 2019, 32(4): 64-69.
- [24] 任正标, 郭传阳, 郑鸣鸣, 等. 间伐对杉木凋落物分解中生态化学计量的影响[J]. 西部林业科学, 2021, 50(2): 109-115, 123.
- [25] 刘华, 张丹桔, 张健, 等. 马尾松人工林林窗大小对四种凋落叶质量损失和养分释放的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 513-522.
- [26] LAIHO R, LAINE J, TRETTIN C C, *et al.* Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient gradients in peatland forests, and the effects of inter-annual weather variation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(7): 1095-1109.
- [27] 唐仕姗, 杨万勤, 殷睿, 等. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子[J]. 植物生态学报, 2014, 38(6): 529-539.
- [28] 周正虎, 王传宽. 微生物对分解底物碳氮磷化学计量的响应和调节机制[J]. 植物生态学报, 2016, 40(6): 620-630.
- [29] GÜSEWELL S, GESSNER M O. N : P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms[J]. Functional Ecology, 2009, 23(1): 211-219.
- [30] GURLEVIK N, KELTING D L, ALLEN H L. Nitrogen mineralization following vegetation control and fertilization in a 14-year-old Loblolly Pine plantation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(1): 272-281.
- [31] 王娜, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区马尾松细根分解及其养分释放[J]. 林业科学研究, 2017, 30(1): 18-24.
- [32] 陈栋霖, 刘语欣, 范川, 等. 台湾桫木-扁穗牛鞭草复合模式下凋落物分解及其养分释放动态[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(1): 49-54. CHEN Y L, LIU Y X, FAN C, *et al.* Litter decomposition and nutrient release dynamics in complex ecosystem of *Alnus formosana*-*Hemarthria compressa* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2015, 39(1): 49-54. (in Chinese)
- [33] 韩其飞, 李莹莹, 彭开兵, 等. 大气氮沉降对中亚草地生态系统净初级生产力的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8545-8555. HAN Q F, LI Y Y, PENG K B, *et al.* Effects of atmospheric nitrogen deposition on net primary productivity of grassland ecosystem in Central Asia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8545-8555. (in Chinese)
- [34] 沈芳芳, 刘文飞, 吴建平, 等. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 8078-8090.
- [35] 李娜, 赵传燕, 郝虎, 等. 不同海拔条件下祁连山青海云杉林叶凋落物分解过程及养分的动态变化[J]. 生态学报, 2021, (11): 1-10. LI N, ZHAO C Y, HAO H, *et al.* Decomposition and its nutrients dynamic of Qinghai spruce leaf litter with elevation gradient in Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, (11): 1-10. (in Chinese)
- [36] 张磊, 贾淑娟, 李啸灵, 等. 亚热带米槠天然林凋落物和根系输入变化对土壤磷组分的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 1-11. ZHANG L, JIA S X, LI X L, *et al.* Effects of litter and root inputs changes on soil phosphorus fractions in a subtropical natural forest of *Castanopsis carlesii* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 1-11. (in Chinese)