

大兴安岭多年冻土区森林凋落物 分解动态及其影响因素

黄敏¹, 高明亮², 李格炜³, 王宇¹, 贾丙瑞³

(1. 河南科技大学 园艺与植物保护学院, 河南 洛阳 471000; 2. 黑龙江呼中国家级自然保护区
管理局, 黑龙江 呼中 165036; 3. 中国科学院 植物研究所 植被与环境变化重点实验室, 北京 100093)

摘要: [目的] 探究大兴安岭多年冻土区优势树种兴安落叶松(*Larix gmelinii*)和伴生种白桦(*Betula platyphylla*)凋落物的分解动态特征及其影响因素, 为冻土退化背景下森林生态系统稳定性维持、碳汇功能提升及适应性管理策略的制定提供科学依据。[方法] 采用凋落物分解袋法, 设置兴安落叶松、白桦及其混合(3:1 比例)3 种处理类型, 通过为期 2 a 的原位分解试验, 系统分析凋落物质量损失动态变化特征及其与碳氮含量的关系, 结合 Olson 指数模型计算凋落物分解半衰期和完全分解所需时间。[结果] ①凋落物在两年分解期内质量损失依次为: 阔叶(23.53%)>针阔混合(16.41%)>针叶(14.47%), 其中第 1 年占总分解量的 65.11%~66.80%; 针阔混合凋落物失重率的观测值仅在分解第 1 年显著高于预期值, 表现出协同效应。②阔叶和针阔混合凋落物失重率与氮含量呈极显著正相关, 与碳氮比呈极显著负相关, 而针叶失重率与氮含量及碳氮比无显著相关性。③Olson 指数模型可有效描述凋落物分解过程($R^2>0.89$), 分解半衰期和完全分解所需时间阔叶最短(5.45 和 23.55 a), 其次是针阔混合(9.32 和 40.27 a), 针叶分解最慢(11.55 和 49.93 a)。[结论] 大兴安岭多年冻土区阔叶凋落物分解快, 主要与其氮含量高且碳氮比低有关, 其完全分解需要 20 a 以上, 而针叶与针阔混合凋落物需要 40 a 以上, 针阔混合凋落物仅在分解第 1 年表现出协同效应。凋落物分解的缓慢过程对维持冻土—植被互馈系统的碳氮平衡及提升寒区生态屏障功能具有重要作用。

关键词: 大兴安岭; 多年冻土区; 寒温带针叶林; 碳循环; 凋落物分解; 质量损失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0103-08

中图分类号: S718.5

文献参数: 黄敏, 高明亮, 李格炜, 等. 大兴安岭多年冻土区森林凋落物分解动态及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 103-110. Huang Min, Gao Mingliang, Li Gewei, et al. Dynamic and influencing factors of forest litter decomposition in permafrost region of Great Xing'an Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 103-110. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.003; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.003.

Dynamic and influencing factors of forest litter decomposition in permafrost region of Great Xing'an Mountains

Huang Min¹, Gao Mingliang², Li Gewei³, Wang Yu¹, Jia Bingrui³

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2. Heilongjiang Huzhong National Nature Reserve Administration, Huzhong, Heilongjiang 165036, China; 3. Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: [Objective] This study investigated the litter decomposition dynamics and their influencing factors of the dominant species, *Larix gmelinii*, and its associated species, *Betula platyphylla*, in the permafrost region of the Great Xing'an mountains, in order to provide scientific insights for maintaining forest ecosystem stability, enhancing carbon sequestration capacity, and formulating adaptive management strategies under permafrost

收稿日期: 2025-03-21

修回日期: 2025-05-14

采用日期: 2025-05-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“大兴安岭多年冻土区碳排放关键过程的冻融效应及其机制”(32071592); 河南科技大学青年骨干教师培养计划项目(13450009)

第一作者: 黄敏(2001—), 女(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态系统碳循环。Email: hm200118@163.com。

通信作者: 王宇(1985—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 副教授, 主要从事全球变化与陆地生态系统碳水循环研究。Email: yuwang911@163.com。

贾丙瑞(1976—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 博士, 副研究员, 主要从事典型陆地生态系统生物地球化学循环研究。Email: jiabingrui@ibcas.ac.cn。

degradation. [Methods] A litterbag experiment was conducted using three treatments of *L. gmelinii* litter (needleleaf), *B. platyphylla* litter (broadleaf), and a combined litter (3:1 ratio). Over a two-year in-situ decomposition period, litter mass loss dynamics and their relationships with C and N content were systematically analyzed. The Olson exponential model was used to calculate the times required for 50% and 95% litter decomposition. [Results] ① The litter mass loss over the two-year decomposition period was fastest for broadleaf litter (23.53%), followed by the mixed litter (16.41%), and slowest in the needleleaf litter (14.47%), with 65.11%—66.80% of the total mass loss occurring during the first year. The measured mass-loss rates of the mixed litter were significantly higher than predicted in the first year of decomposition, indicating a synergistic effect. ② Broadleaf and mixed litter mass loss showed highly significant positive correlations with N content and negative correlations with the C/N ratio. However, there were no significant correlations between needleleaf mass loss and N content or C/N ratio. ③ The Olson model effectively described the decomposition dynamics ($R^2 > 0.89$). The time required for 50% and 95% litter decomposition was shortest for broadleaf litter (5.45 years and 23.55 years), followed by mixed litter (9.32 years and 40.27 years), and slowest for needleleaf litter (11.55 years and 49.93 years). [Conclusion] The rapid decomposition of broadleaf litter may be attributed to its high N content and low C/N ratio. The complete decomposition of needleleaf and mixed litter requires over four decades, nearly double the time for complete broadleaf litter decomposition, which requires slightly over two decades. The mixed litter mass loss only exhibited synergistic effects during the first year of decomposition. These slow decomposition processes are critical for maintaining the C-N balance in the permafrost-vegetation feedback system and for enhancing the ecological barrier functions of cold region ecosystems.

Keywords: Great Xing' an Mountains; permafrost region; boreal coniferous forest; carbon cycle; litter decomposition; mass loss

全球气候变化背景下,多年冻土退化已成为高纬度地区生态系统面临的重大挑战^[1]。大兴安岭作为欧亚大陆多年冻土分布的重要区域,其冻土面积缩减显著,地温升高、活动层加深等现象日益加剧^[1-2],进而会改变地表凋落物层的水热条件及微生物活性,由此打破原有分解速率与土壤碳固存的动态平衡,引发碳排放-气候变暖正反馈效应及水土流失风险。凋落物分解是维持森林生产力与土壤肥力的关键驱动因素,作为生态系统碳循环与养分周转的核心环节,直接调控着土壤有机质积累及养分周转^[3]。同时,分解过程中产生的有机质还可以改善土壤结构,增强持水能力,减缓地表径流和土壤水分流失^[4]。凋落物分解速率与模式受凋落物化学特性、环境因子及生物因素共同调控。冻土退化通过改变凋落物基质质量、水热条件及土壤微生物活性等,可能加剧凋落物分解过程的复杂性^[5],显著影响凋落物分解速率和碳氮释放模式^[6],进而威胁区域生态稳定性。

凋落物作为森林生态系统有机碳和养分的重要储存库,在植被与土壤间的物质交换过程中发挥着关键枢纽作用^[7]。凋落物分解是森林生态系统碳氮循环的核心环节,对于高寒森林生态系统物质循环和生产力维持等过程尤为重要^[8]。研究^[9]表明,高寒地区森林凋落物高峰期通常出现在每年9—10月,恰好处于季节性冻融阶段,受冻融循环作用,可能引起

凋落物的物理结构破坏及化学性质变化,进而对凋落物分解过程产生影响。兴安落叶松和白桦是大兴安岭寒温带针叶林优势树种和主要伴生种,其凋落物分解特性对维持寒区森林生态系统功能至关重要。气候变暖可通过提升酶活性加速凋落物分解,但冻土退化导致的土壤湿度降低可能削弱温度的正效应^[5]。此外,在大兴安岭次生林恢复过程中,兴安落叶松与白桦常形成混交林,其混合凋落物的分解常表现出非加性效应,不同树种凋落物的化学性质(如C/N比、木质素含量)差异可能显著影响分解速率^[5]。大兴安岭多年冻土区有着独特的环境条件,凋落物分解过程也呈现出与其他地区森林生态系统不同的特征。虽然凋落物分解是森林生态学研究的重要领域,但针对大兴安岭多年冻土区森林凋落物分解的研究相对较少,尤其在冻土退化与气候变暖双重胁迫下的动态特征亟待阐明。因此,本研究选取大兴安岭寒温带针叶林优势种兴安落叶松和伴生种白桦凋落叶作为研究对象,采用凋落物分解袋法,结合野外观测与室内检测分析,探讨单一及混合凋落物分解的动态变化及其影响因素,揭示冻土退化背景下凋落物分解的驱动机制,为深入理解东北多年冻土区森林生态系统碳循环提供理论依据,并为退化冻土区水土保持、生态恢复及森林可持续经营管理提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究地点位于黑龙江大兴安岭呼中国家级自然保护区(122°42′—123°18′E, 51°17′—51°56′N), 海拔800~1 200 m。该地区属于高纬度寒温带大陆季风性气候, 年均温可达-4℃, 年均降水量487 mm^[10-11]。本区典型植被是以兴安落叶松为建群种的寒温带明亮针叶林, 混有少量白桦等阔叶树种, 林下植被层次明显, 常见灌木有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)和越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)等^[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地及试验材料

在黑龙江呼中国家级自然保护区内北方林生态系统定位研究站(以下简称“呼中站”)选择常见的杜香-越橘-兴安落叶松林作为研究对象, 以优势种兴安落叶松针叶和主要伴生种白桦阔叶作为试验材料。设置3个样地(51°53′N, 123°01′E, 海拔高度为1 006 m), 分别放置不同类型凋落物(针叶、阔叶及针阔叶混合凋落物), 3个样地间距5 m。对两个树种单一凋落物及其混合凋落物的分解动态进行研究。

1.2.2 试验设计

于2021年凋落高峰期(9月中旬)收集兴安落叶松和白桦凋落物新鲜落叶带回实验室自然风干。采用凋落物分解网袋法, 将风干后的凋落物分别装入凋落物袋(25 cm×15 cm, 孔径0.5 mm, 尼龙材质)。设计3个处理: ①兴安落叶松针叶凋落物(30 g/袋, 以下简称针叶); ②针阔混合凋落物(根据当地年凋落物量针阔比例设置为3:1, 20 g/袋, 以下简称针阔混合); ③白桦阔叶凋落物(10 g/袋, 以下简称阔叶)。针叶质地密实, 体积小, 在相同袋容下可装入30 g; 而阔叶叶片蓬松, 体积大, 在保证叶片完整的情况下同等空间仅能装入10 g。

试验开始前, 每种凋落物各选取3袋称重, 并烘干至恒重, 计算凋落物样品的初始干重、含水率。2021年10月17日将凋落物袋放于样地中, 每个样地放置同一类型凋落物。生长季每月取样1~2次, 冬季大雪封山后取样次数减少, 每次取样随机从3个样地各取3袋凋落物, 共计288袋。小心去除泥土杂物及新生根系, 带回实验室测定湿重并放置于烘箱内70℃烘干至恒重, 用天平称量干重, 计算凋落物失重率和含水量, 并采用元素分析仪(vario MACRO cube, Elementar, Germany)测定碳、氮含量。土壤湿度数据来自呼中站小气候梯度观测系统 Hydra

Probe II 土壤含水量传感器(Stevens Inc., USA), 观测频率为每30 min自动记录1次。

1.2.3 凋落物分解计算

失重率^[3]的计算公式为:

$$W = (W_0 - W_t) / W_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_0 为样品的初始干重, W_t 为 t 时刻取样时的烘干净重。

混合凋落物失重率预期值^[13]的计算公式为:

$$P_w = W_1 \cdot n_1 + W_2 \cdot n_2 \quad (2)$$

式中: W_1, W_2 分别是来自针叶、阔叶凋落物在实际分解过程中的失重率; n_1, n_2 分别是针叶、阔叶在针阔混合凋落物中的比例。

混合效应(Δ)^[14]可以通过比较混合凋落物失重率观测值(O_w)与预期值(P_w)的差异来评估, 计算公式为:

$$\Delta = (O_w - P_w) / P_w \times 100\% \quad (3)$$

分解系数采用凋落物分解Olson指数衰减模型^[4]计算:

$$y = ae^{-kt} \quad (4)$$

式中: y 为 t 时间回收凋落物袋的残留率(%); t 为分解时间(月); k 为凋落物的分解系数。分解半衰期(50%分解): $t_{0.5} = \ln 0.5 / (-k)$, 完全分解时间(95%分解): $t_{0.95} = \ln 0.05 / (-k)$ 。

1.3 数据统计与分析

运用SPSS 26.0软件进行数据分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA), Duncan多重区间检验法对凋落物含水量、失重率、分解速率、碳氮比等指标进行统计学分析, 判断差异性显著水平($p=0.05$)。针阔混合凋落物失重率观测值和预期值之间的差异使用 α 水平为0.05的独立 t 检验。凋落物失重率与养分含量的关系采用Pearson相关性分析。使用Origin 2024b绘图。

2 结果与分析

2.1 凋落物分解过程中的水分动态与初始特性

由图1可知, 2022年5月随着气温回暖, 雪被融化, 水分渗入地下, 表层土壤(0—10 cm)含水量由10%左右逐渐增加, 6—7月土壤含水量随着降雨呈现波动式起伏, 最高接近60%; 凋落物含水量波动也较大, 其中阔叶含水量最高, 针叶与针阔混合含水量差异较小。8—10月土壤含水量呈现平稳状态, 在18%~32%波动; 3种类型凋落物含水量变化差异不显著。

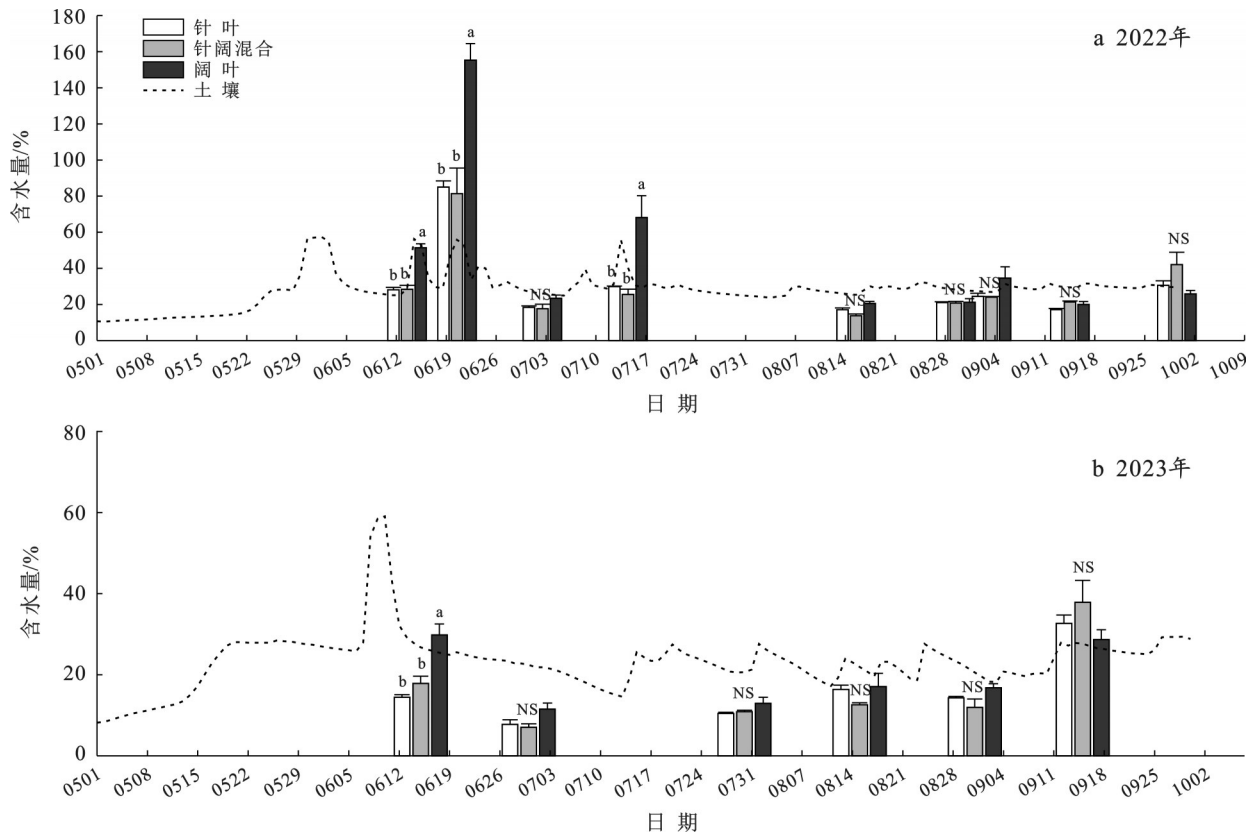
由表1可以看出, 3种类型凋落物的初始碳含量无明显差异, 变动于474.49~484.54 g/kg。针叶与针阔混合初始氮含量无显著差异(10.99~11.34 g/kg),

均明显小于阔叶(14.54 g/kg)。针叶与针阔混合初始碳氮比无显著差异(42.15~44.22),明显大于阔叶(30.50)。

2.2 凋落物分解失重率

图2为2a分解过程中3种类型凋落物失重率的动态变化特征,整体呈现随时间推移而上升的趋势。针叶失重率表现为快—慢—快的趋势,试验开始第1年分解较快,随后几个月失重率基本维持稳定,2023年8月以后失重率开始继续增加,分解加速。针阔混合失重率变化趋势与针叶基本一致,阔叶失重率变化呈现持续上升的趋势,试验开始到2023年6月失重率上升明显,分解快速;随后失重率增长变缓,进入缓慢分解阶段。分解试验第1年冻融季至生长季初期(2022年4—6月),只有阔叶失重率表现出增长

趋势,说明冻融作用对针叶与针阔混合无明显影响;第2年冬季至次年生长季初期(2022年11月至2023年6月),阔叶失重率显著上升,而针阔混合失重率增加较小,针叶基本没有变化,同样说明冻融作用对第2年针叶与针阔混合分解影响不大。针叶、针阔混合和阔叶两年失重率分别为14.47%,16.41%和23.53%,其中阔叶分解最快,针叶分解最慢。第1年质量损失比第2年多,占分解总量的65.11%~66.80%。3种类型凋落物失重率相比较,分解试验开始的第1年非生长季,不同类型凋落物间失重率差异较小,针阔混合表现出快速分解的特性;第2年生长季节开始阔叶分解加速,显著高于其他两个类型($p < 0.05$)。整个试验期间针阔混合失重率通常高于针叶,且大多达到显著差异水平($p < 0.05$)。



注:①数值为平均值±标准误;②不同小写字母表示不同凋落物类型间差异显著($p < 0.05$),NS表示差异不显著。下同。

图1 2022年和2023年3种凋落物含水量(平均值±标准误)与土壤含水量变化

Fig.1 Changes in water content of different litter types and soil moisture in 2022 and 2023

表1 不同类型凋落物初始养分含量和土壤理化特性

Table 1 Initial nutrient content of different litter types and soil physicochemical properties

项目	碳/(g·kg ⁻¹)	氮/(g·kg ⁻¹)	碳氮比	容重/(g·cm ⁻³)	pH值
凋落物					
针叶	484.54±1.12 ^a	10.99±0.40 ^b	44.22±1.62 ^a	—	—
针阔混合	474.49±6.53 ^a	11.34±0.73 ^b	42.15±2.36 ^a	—	—
阔叶	481.60±8.04 ^a	14.54±0.68 ^a	30.50±1.84 ^b	—	—
土壤	51.54	2.33	22.15	0.81	5.11

注:①数值为平均值±标准误;②同列不同小写字母表示不同凋落物类型间具有显著性差异($p < 0.05$)。

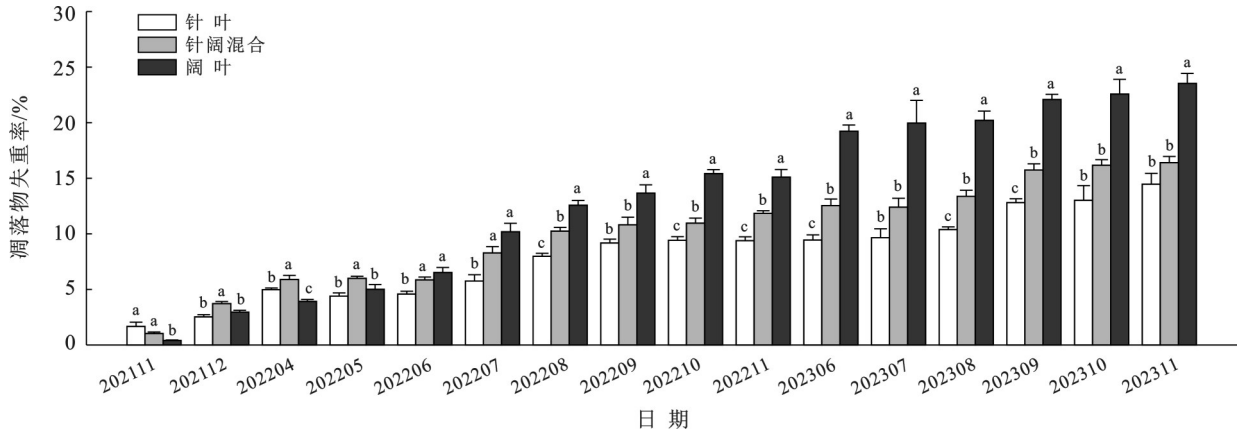
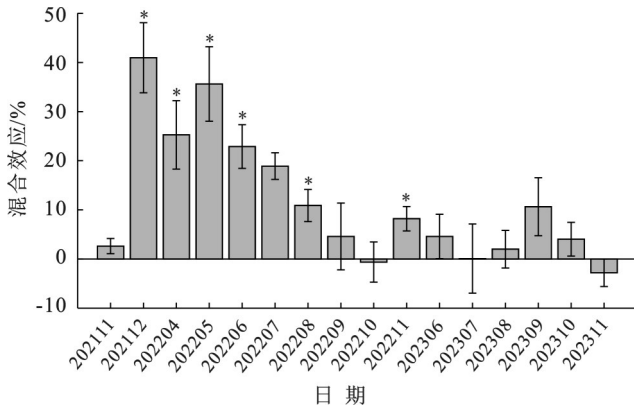


图 2 分解过程中 3 种类型凋落物的失重率变化

Fig.2 Changes in mass loss rates of three litter types during decomposition

混合效应分析表明(图 3),凋落物分解试验前 11 个月除刚开始的第 1 个月外,均呈现针阔混合失重率的观测值高于预期值,且大多达到显著水平,表现为协同效应。后期二者差异小,除 2022 年 11 月外均未达到显著水平,表现为加和效应。



注:①柱形代表凋落物失重率观测值与预期值(Δ)的差异;②*表示差异显著($p < 0.05$)。

图 3 凋落物混合效应评估

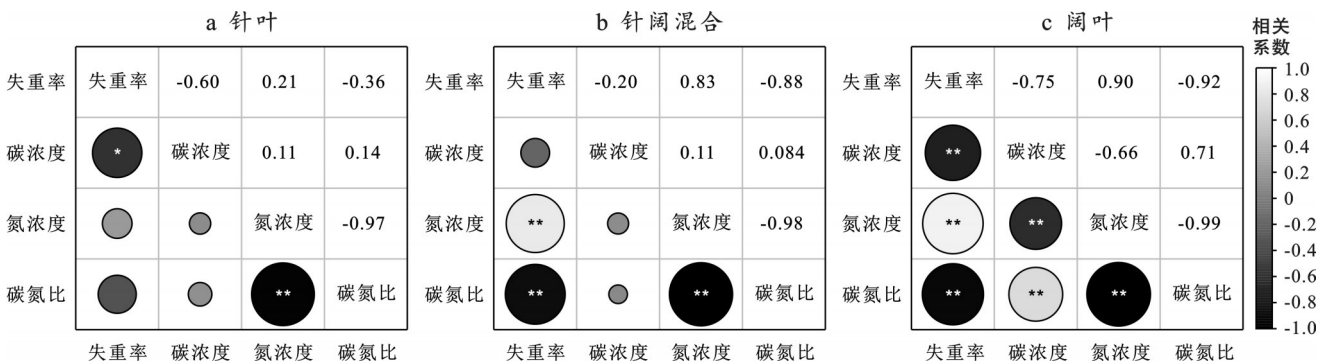
Fig.3 Assessment of litter mixing effects

2.3 凋落物失重率与碳氮含量的关系

3 种凋落物失重率与碳氮含量的相关性分析表明(图 4),针叶失重率与碳含量呈显著负相关,与氮含量及碳氮比无显著相关性;与针叶相反,针阔混合失重率与氮含量和碳氮比相关性均达到极显著水平,与碳含量相关性则不显著;阔叶失重率与碳含量及碳氮比呈极显著负相关,与氮含量呈极显著正相关。另外,3 种凋落物碳氮比主要由氮含量决定,均呈极显著负相关。

2.4 凋落物分解模型

根据针叶、针阔混合、阔叶随时间分解变化的残留率,通过 Olson 指数模型拟合凋落物整个分解过程, R^2 达到 0.898~0.958,其中针阔混合和阔叶拟合效果好于针叶(表 2)。分解系数从高到低依次为:阔叶(0.011) > 针阔混合(0.006) > 针叶(0.005)。阔叶分解半衰期($t_{0.5}$)和完全分解($t_{0.95}$)所需时间最短,分别为 5.45 和 23.55 a;其次是针阔混合,分别需要 9.32 和 40.27 a;针叶分解最慢,分别需要 11.55 和 49.93 a。



注:*,**分别表示在 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 水平显著相关。

图 4 不同类型凋落物失重率与碳氮含量相关性分析

Fig.4 Correlation analysis of litter mass loss rate with carbon and nitrogen content among litter types

表 2 不同类型凋落物的分解方程

Table 2 Decomposition equations of different litter types

凋落物类型	分解方程	分解系数(k)	相关系数(R^2)	半衰期/ a	完全分解期/ a
针叶	$y=98.50e^{-0.005t}$	0.005	0.898	11.55	49.93
针阔混合	$y=98.06e^{-0.006t}$	0.006	0.921	9.32	40.27
阔叶	$y=100.10e^{-0.011t}$	0.011	0.958	5.45	23.55

3 讨论

凋落物分解过程受自身理化特性(如碳、氮、木质素、纤维素等)和环境条件(如土壤理化性质、温度、降水等)共同影响^[15-16]。基于为期 2 a 的分解试验,本研究发现阔叶失重率(23.53%)明显快于针叶(14.47%)及针阔混合(16.41%),可能与其初始化学特性的差异有关。阔叶初始氮含量(14.54 g/kg)显著高于针叶和针阔混合(10.99~11.34 g/kg),且其碳氮比最低(30.50),故其分解速率也最快。凋落物的初始碳氮比是影响其分解速率的重要因素,低碳氮比的凋落物更易被微生物快速利用,从而加速分解;而高碳氮比意味着微生物需要从外界吸收氮来进行分解^[17]。对中国东北温带森林 62 种树木凋落物 10 a 分解试验研究表明,凋落物氮含量与分解速率初期呈正相关,而分解 5 a 后,高氮含量凋落物前期快速分解积累的微生物残体可能会抑制后期分解^[18]。另外,由于兴安落叶松针叶质地紧实,不利于土壤动物和微生物的粉碎利用,且与环境接触面小,不易于分解;而白桦阔叶凋落物质地疏松,叶片单薄宽大,更有利于分解。

不同组合凋落物分解试验研究表明,76% 以上的混合凋落物表现出显著的混合效应^[19-20]。混合凋落物为分解者提供更为多样的营养元素,改善分解微环境,同时促进分解者在资源利用上的互补性。研究^[21-22]表明,混合凋落物相比单一凋落物能通过菌丝连接将营养物质从高质量凋落物向低质量凋落物迁移,从而促进低质量凋落物的分解。本研究针阔混合(3:1)仅在分解第一年表现出协同效应(图 3),表明针阔混合凋落物在分解初期通过组分间的正向互作加速分解,后期则主要表现为加和效应。不同分解阶段表现出来的混合效应可能有所差异,如 3 种混合凋落物在分解前 9 个月为正效应,再经过 10 个月的分解则表现为负效应^[23]。此外,混合效应也与混合比例有关,何丹研究^[24]表明,马尾松与樟树 1:3 表现出混合正效应,而其他两组比例(1:1, 3:1)均无明显混合效应。贺红月等^[25]研究发现,随着白桦叶凋落物比例的增加,分解速率加快,华北落叶松与白桦 1:1 时表现最优。张娟娟^[14]研究表明,刺槐与沙棘

5:5 混合凋落物表现出加和效应,而 8:2 混合比例表现出更多的非加和效应。

3 种凋落物分解第 1 年的失重率大于第 2 年,表现出前期分解较后期快的特点,与张娟娟^[14]研究结果相一致。这可能是由于分解初期在土壤冻融作用下调落物破碎、接触面积增加,其中易分解和可溶性物质快速分解或出现淋失现象,所以凋落物损失较多。凋落物分解后期由于易分解和可溶性物质损失较多,剩下大多数为难分解和难溶性物质如木质素、纤维素等,导致凋落物分解缓慢。后期分解缓慢的另一原因可能是分解者数量的减少,由于后期凋落物难分解成分增加,分解者开始转向分解土壤中的易分解成分而减少分解凋落物。

通过 Olson 指数模型拟合发现,阔叶分解 50% 和 95% 所需时间(5.45 和 23.55 a)均显著短于针叶(11.55 和 49.93 a)与针阔混合(9.32 和 40.27 a)。对于分解 50% 和 95% 所需时间,不同研究结果差异较大,大兴安岭兴安落叶松分别为 12.65 和 54.67 a^[26],接近于本研究针叶的结果;黑龙江帽儿山红松分别为 2.03 和 8.65 a,蒙古栎分别为 1.71 和 7.35 a^[27];内蒙古呼伦贝尔市毕拉河自然保护区兴安落叶松分别为 7.37 和 31.87 a^[28];祁连山青海云杉分别为 5.3 年和 22.7 a^[29]。吴鹏等^[30]对东北 5 个林型凋落叶分解速率研究表明,分解 95% 所需时间在 9.2~24.6 a。这些研究结果与本研究的差异可能与物种特性、地理位置、气候条件及分解试验持续时间等有关。

目前,中国冻土区凋落物分解研究多集中于短时间尺度(<3 a)^[27-28,31-34]。而且,这些研究观测频率较低,未来应加强长期观测并提高观测频率,以更深入地理解凋落物分解过程的动态变化规律。凋落物分解是一个复杂的动态过程,已有研究^[32,35]多关注累积失重率,而对分解过程中各阶段速率的研究相对不足,特别是一些关键时期(如冻融循环期、干湿交替期等)。由于取样间隔时间较长,这些关键阶段的分解特征可能被忽略,因此,需加强这方面的研究工作,以全面揭示凋落物分解的动态机制。

4 结论

(1) 通过对大兴安岭多年冻土区优势树种兴安

落叶松针叶、伴生树种白桦阔叶及其混合凋落物(3:1)进行研究,发现2 a分解期内质量损失在14.47%(针叶)~23.53%(阔叶),针阔混合失重率(16.41%)略高于针叶,仅在分解第1年表现出协同效应。

(2)阔叶和针阔混合凋落物失重率与氮含量及碳氮比极显著相关,而针叶与二者无显著相关性。

(3)阔叶分解半衰期和完全分解所需时间最短(分别为5.45和23.55 a),其次是针阔混合(分别为9.32和40.27 a),针叶分解最慢(分别为11.55和49.93 a)。

参考文献(References)

- [1] 金会军,李述训,王绍令,等.气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J].地理学报,2000,55(2):161-173. Jin Huijun, Li Shuxun, Wang Shaoling, et al. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (2):161-173.
- [2] 周晓宇,赵春雨,李娜,等.东北地区冬半年积雪与气温对冻土的影响[J].冰川冻土,2021,43(4):1027-1039. Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Li Na, et al. Influence of snow and temperature on the depth of frozen soil in winter half year in northeast China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021,43(4):1027-1039.
- [3] 窦百强,容丽,俞国松,等.茂兰喀斯特森林自然保护区凋落叶分解动态[J].水土保持通报,2019,39(2):94-100. Dou Baiqiang, Rong Li, Yu Guosong, et al. Decomposition dynamics of leaf litters in Maolan karst forest nature reserve [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(2):94-100.
- [4] 魏强,凌雷,王多锋,等.甘肃省兴隆山森林主要树种凋落叶分解速率与初始质量的关系[J].水土保持通报,2019,39(1):9-15. Wei Qiang, Ling Lei, Wang Duofeng, et al. Relationships between decomposition rate of leaf litter and initial quality of main tree species in Xinglong Mountain of Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(1):9-15.
- [5] 刘瑞鹏.气候变化背景下东北东部山区红松和蒙古栎凋落叶分解特征[D].黑龙江哈尔滨:东北林业大学,2014. Liu Ruipeng. Study on the impact of climate change on litter decomposition of *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* in the eastern mountainous region in northeast China [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2014.
- [6] Hobbie S E, Schimel J P, Trumbore S E, et al. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils [J]. Global Change Biology, 2000,6(Suppl. 1):196-210.
- [7] 杨玉盛,郭剑芬,林鹏,等.格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库[J].生态学报,2004,24(2):359-367. Yang Yusheng, Guo Jianfen, Lin Peng, et al. Carbon and nutrient pools of forest floor in native forest and monoculture plantations in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(2):359-367.
- [8] 杨万勤,邓仁菊,张健.森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J].应用生态学报,2007,18(12):2889-2895. Yang Wanqin, Deng Renju, Zhang Jian. Forest litter decomposition and its responses to global climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007,18(12):2889-2895.
- [9] Withington C L, Sanford R L. Decomposition rates of buried substrates increase with altitude in the forest-alpine tundra ecotone [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007,39(1):68-75.
- [10] 吴迪,崔晓阳,郭亚芬.寒温带林区不同林型下土壤中氮矿化特征[J].北京林业大学学报,2019,41(9):122-129. Wu Di, Cui Xiaoyang, Guo Yafen. Characteristics of nitrogen mineralization in soils under different forest types in cold-temperate forest region [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019,41(9):122-129.
- [11] 张鹏,贾丙瑞.大兴安岭北部寒温带针叶林表层土壤冻融变化特征[J].土壤,2023,55(5):1122-1128. Zhang Peng, Jia Bingrui. Characteristics of topsoil freeze-thaw cycles in cold temperature needle-leaved forest of northern Daxing'anling in northeast China [J]. Soils, 2023,55(5):1122-1128.
- [12] 刘思琪,满秀玲,张嶝,等.寒温带4种乔木树种不同径级根系分解及碳氮释放动态[J].北京林业大学学报,2023,45(7):36-46. Liu Siqi, Man Xiuling, Zhang Di, et al. Dynamics of root decomposition and carbon and nitrogen release of four tree species with different diameter classes in the cold temperate zone [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(7):36-46.
- [13] 李勋,张艳,宋思梦,等.马尾松与乡土阔叶树种凋落叶分解氮磷释放的混合效应[J].应用与环境生物学报,2022,28(2):308-318. Li Xun, Zhang Yan, Song Simeng, et al. Effects of mixed leaf litter on nitrogen and phosphorus release in *Pinus massoniana* and native broad-leaved tree species [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022,28(2):308-318.
- [14] 张娟娟.刺槐沙棘纯林与混交林凋落物分解及养分释放动态特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2023. Zhang Juanjuan. Dynamic characteristics of litter decomposition and nutrient release in pure and mixed forests of

- Robinia pseudoacacia* and *Hippophae rhamnoides* [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2023.
- [15] Liski J, Nissinen A, Erhard M, et al. Climatic effects on litter decomposition from Arctic tundra to tropical rainforest [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 575-584.
- [16] 贾丙瑞. 凋落物分解及其影响机制[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(8):648-657.
Jia Bingrui. Litter decomposition and its underlying mechanisms [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(8):648-657.
- [17] Berg B, McClaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration* [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [18] Sun Tao, Dong Lili, Zhang Yunyu, et al. General reversal of N-decomposition relationship during long-term decomposition in boreal and temperate forests [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(20): e2401398121.
- [19] Wardle D A, Bonner K I, Nicholson K S. Biodiversity and plant litter: Experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function [J]. *Oikos*, 1997, 79(2):247.
- [20] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter [J]. *Oikos*, 2004, 104(2): 230-246.
- [21] Briones M J I, Ineson P. Decomposition of eucalyptus leaves in litter mixtures [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(10/11):1381-1388.
- [22] 潘禹, 王克勤, 宋娅丽, 等. 华山松林凋落物养分释放及土壤生态化学计量特征对模拟氮沉降的短期响应[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(3):492-502.
Pan Yu, Wang Keqin, Song Yali, et al. Short-term responses of litter nutrient release and soil ecological stoichiometry to simulated nitrogen deposition in *Pinus armandii* forest in central Yunnan, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3):492-502.
- [23] Hansen R A, Coleman D C. Litter complexity and composition are determinants of the diversity and species composition of oribatid mites (Acari: Oribatida) in litterbags [J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/2/3): 17-23.
- [24] 何丹. 马尾松、樟树凋落物混合分解及养分释放[D]. 湖南长沙: 中南林业科技大学, 2015.
He Dan. Decomposition and nutrient release of mixed litterfall of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2015.
- [25] 贺红月, 马长明, 牟洪香, 等. 华北落叶松和白桦叶凋落物混合分解特征及土壤养分动态[J]. *林业资源管理*, 2018(3):93-100.
He Hongyue, Ma Changming, Mu Hongxiang, et al. The decomposition characteristics and soil nutrient dynamics of leaf litter mixture of *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* [J]. *Forest Resources Management*, 2018(3):93-100.
- [26] 赵鹏武. 大兴安岭兴安落叶松林凋落物动态与养分释放规律研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
Zhao Pengwu. Studies on litterfall dynamics and nutrient release regularity of *Larix gmelinii* in Greet Xingan Mountains [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- [27] 武启骞, 王传宽. 控雪处理下红松和蒙古栎凋落叶分解动态[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(2):153-163.
Wu Qiqian, Wang Chuankuan. Dynamics in foliar litter decomposition for *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* in a snow-depth manipulation experiment [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(2):153-163.
- [28] 史哲. 火干扰和黑碳添加对兴安落叶松林凋落物分解的影响[D]. 黑龙江哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Shi Zhe. Effects of fire disturbance and black carbon addition on litter decomposition of *Larix gmelinii* forest [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2023.
- [29] 李娜, 赵传燕, 郝虎, 等. 海拔和郁闭度对祁连山青海云杉林叶凋落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(11):4493-4502.
Li Na, Zhao Chuanyan, Hao Hu, et al. Decomposition and its nutrients dynamic of Qinghai spruce leaf litter with elevation gradient in Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11):4493-4502.
- [30] 吴鹏, 王襄平, 张新平, 等. 东北地区森林凋落叶分解速率与气候、林型、林分光照的关系[J]. *生态学报*, 2016, 36(8):2223-2232.
Wu Peng, Wang Xiangping, Zhang Xinping, et al. Effects of climate, forest type and light availability on litter decomposition rate in forests of northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8):2223-2232.
- [31] Zhu Jianxiao, He Xinhua, Wu Fuzhong, et al. Decomposition of *Abies faxoniana* litter varies with freeze-thaw stages and altitudes in subalpine/alpine forests of southwest China [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, 27(6):586-596.
- [32] Wu Fuzhong, Yang Wanqin, Zhang Jian, et al. Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season [J]. *Acta Oecologica*, 2010, 36(1): 135-140.