

长白山白桦 (*Betula platyphlla*) 纯林和
白桦山杨 (*Populus davidiana*) 混交林凋落物的分解

李雪峰¹, 张 岩¹, 牛丽君², 韩士杰^{1,*}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所 沈阳 110016 2. 长白山保护开发管理委员会 延吉 133613)

摘要 采用交互分解实验,研究长白山白桦叶片和白桦、山杨与水曲柳混合叶片在白桦纯林和白桦山杨混交林内的分解过程。两年的分解实验结果表明,两种类型叶片均存在一个快速分解阶段和一个慢速分解阶段,森林类型和凋落物类型对凋落物分解率的影响在快速分解阶段不显著而在慢速分解阶段显著,混交林内的环境促进了凋落物分解和养分元素释放,在同一林型内,底物质量高的混合叶片其分解率和养分元素释放率均大于底物质量低的白桦叶片,凋落物的底物质量在一定程度上可以抵消森林类型对凋落物分解的影响,白桦山杨混交林混合叶片分解速率和养分元素释放率要显著大于白桦纯林内的白桦叶片,说明白桦山杨混交林的物质循环速度和养分元素供应能力要显著大于白桦纯林。

关键词 凋落分解;森林类型;白桦;山杨;交互分解实验

文章编号:1000-0933 (2007) 05-1782-09 中图分类号:Q948.5718.5 文献标识码:A

Litter decomposition processes in the pure birch (*Betula platyphlla*) forest and the birch and poplar (*Populus davidiana*) mixed forest

LI Xue-Feng¹, ZHANG Yan¹, NIU Li-Jun², HAN Shi-Jie^{1,*}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 Changbai Mountain Committee of Development and Protection, Yanji 133613, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1782 ~ 1790.

Abstract : Birch (*Betula platyphlla*) and poplar (*Populus davidiana*) are the typical heliophilous, fast growing species and frequently form the pure birch forest (BF) or birch and poplar mixed forest (BPF) in North China. A reciprocal litter bag experiment was carried out to investigate the leaf litter decomposition process in BF and BPF and the effect of forest types on litter decomposition using pure birch leaves litter and the mixed litter of birch, poplar and ash (*Fraxinus mandshurica*) leaves. The results of the two year decomposition showed that the effect of forest types and litter type on litter decomposition was not significant at the fast decomposing stage but at the slow decomposing stage. The environmental conditions of BPF contribute to the nutrient release and decay of the two litter types. Compared with birch leaves, mixed leaves had a significantly higher substrate quality and showed a substantially faster decomposing rate and nutrient release rate. Litter quality to some degree can mask the effect of forest type on litter decomposition. In conclusion, BPF exhibits a faster carbon and nutrient cycling rate than BF does.

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (90411020);中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX2-YW-416)

收稿日期 2006-01-19;修订日期 2006-10-07

作者简介 李雪峰 (1976~),男,吉林永吉人,博士生,主要从事森林碳循环研究. E-mail: lisnowmount@163.com

* 通讯联系人 Corresponding author. E-mail: hansj@iae.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90411020); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-03)

Received date 2006-01-19; **Accepted date** 2006-10-07

Biography LI Xue-Feng, Ph. D. candidate, mainly engaged in forest carbon cycling. E-mail: lisnowmount@163.com

Key Words : Litter decomposition ; Forest types ; *Betula platyphlla* ; *Populus davidiana* ; reciprocal decomposition experiment

凋落物分解是森林生态系统物质循环的重要过程 ,其分解的快慢不仅制约林木的养分供应状况而且影响林地有机质的形成和积累以及土壤的理化性质^[1~5]。凋落物的分解过程受内因和外因共同制约。前者指凋落物自身的物理和化学性质^[2,6~11] ,后者指各种生物和非生物环境条件如土壤微生物、土壤理化性质、温度以及降水等^[12~17]。生态系统之间由于物种组成不同往往会影响凋落物的分解过程 ,进而改变土壤的理化性质^[14,15,18,19]。这种影响有时候使同一林型内部不同斑块之间土壤中碳和养分元素循环产生差异^[20]。同一类型凋落物的分解过程会由于不同生态系统之间环境条件上的差异而发生改变^[18,19,21]。

白桦和山杨为我国东北地区典型的先锋树种 ,它们往往在弃耕地和皆伐迹地上形成大面积的白桦纯林或白桦山杨混交林。但是目前对这两种森林类型凋落物分解过程的研究较少 ,现有对我国温带凋落物分解的研究中通常只关注单一种类凋落物的分解过程而没有研究混合叶片的分解过程^[22] ,而在混交林中 ,凋落物是由各种叶片混合形成的。本文通过交互分解实验来研究长白山白桦纯林和白桦山杨混交林内凋落物叶失重率和 N、P 和 K 等养分元素的释放方式 ,并探讨森林类型是否会影响白桦叶片和混合叶片凋落物的分解过程 ,为进一步了解森林类型间物质循环速率差异的原因提供初步研究结果。

1 研究区域概况

研究地点位于我国吉林省东南部长白山自然保护区 ,地理坐标 42°25'N ,128°05'W ,该区属于受季风影响的温带大陆性季风气候 ,冬季漫长寒冷 ,夏季短暂温暖多雨 ,春季风大干燥 ,秋季凉爽多雾。全区年平均气温在 3.3℃ 左右 ,年降水量一般为 700mm 左右。土壤类型为暗棕色森林土。该区域原始植被为红松阔叶林 ,20 世纪 40 年代以来原始红松阔叶林遭到砍伐 ,在其皆伐迹地上形成许多斑块状的白桦纯林或白桦山杨混交林。本实验中选择白桦纯林和白桦山杨混交林各 3 块。白桦纯林和白桦山杨混交林的面积在 3~5hm² 之间 ,坡度在 5°以下。所有实验森林之间的距离在 10km 范围之内 ,海拔为 700~750 m 之间 ,这样使各实验样地内温度和降水条件尽量一致。

白桦纯林中白桦占 90% 以上 ,林龄在 50a 以上 ,密度为 900 株·hm⁻² 左右。白桦平均高约为 16m 左右 ,平均胸径为 20cm ,郁闭度为 0.7 ,林下已有红松幼苗 ;主要灌木为东北溲疏 (*Deutzia amurensis*)、色木槭 (*Acer mono*)、青楷槭 (*A. tegmentosum*) 等。

混交林中白桦和山杨分别占整个林分树种组成的 40% 左右 ,水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 占整个林分树种组成的 15% 左右。此外 ,林中零星散生胡桃楸 (*Juglans mandshurica*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、黄檗罗 (*Phellodendron amurense*)、色木槭 (*Acer mono*) 等其它阔叶树种。林分密度为 1000 株·hm⁻² 左右 ,林龄在 50a 以上。白桦和山杨平均高约为 15m 左右 ,平均胸径为 18cm 左右 ,水曲柳平均高约为 8m ,平均胸径为 7cm 左右。整个林分郁闭度在 0.8 以上。灌木层的主要树种有青楷槭 (*A. egmentosum*)、假色槭 (*A. pseudo-siboldianum*)、东北溲疏 (*Deutzia amurensis*) 和刺五加 (*Eleutherococcus senticosus*) 等。

2 研究方法

2.1 分解试验

于 2002 年 10 月凋落高峰期内收集白桦纯林和白桦山杨混交林中的落叶 ,将收集来的落叶一部分于 55℃ 条件下烘干至恒重 ,用作初始化学成分分析和测定烘干风干系数 ,另一部分在室温下风干用做分解实验。采用常规的分解袋法 ,分解袋网孔为 1 mm ,大小为 20 cm×15cm。分解实验中 ,共 300 袋白桦叶 ,每个分解袋装 6g 白桦叶 ;混合叶 300 袋 ,分解袋中 3 种叶片添装比例依据 3 种优势树种在混交林中所占的比例而定。因此 ,每个分解袋装 2.5g 白桦叶、2.5g 山杨叶和 1.0g 水曲柳叶片。于 2002 年 11 月初即阔叶树种叶片落净之后在每个白桦纯林和白桦山杨混交林林地上各随机选取 5 个样点进行布置。在 3 个白桦林中的每个样点上布置 10 袋白桦叶和 10 袋混合叶片 ,将装有同样数量白桦落叶和混合叶片落叶分解袋布置在白桦山杨混交林

内。每个分解袋都放在当年形成的凋落物层中。取样时间为 2002 年 11 月初,2003 年 5 月初,2003 年 8 月初,2003 年 11 月初,2003 年 5 月初,2004 年 8 月初,2004 年 11 月初,对应的分解时间分别为 0、172、237、290、344、654、729 d。每次每个样点内各取 1 袋。取样后将分解袋上的杂物洗净、于 55℃ 条件下烘干至恒重,称重。然后将同一林地上的同种类型的叶混合,粉碎过 0.5mm 左右的筛网。对样品进行化学成分分析,分析的指标有 C、N、P、K。碳浓度用重铬酸钾和硫酸 ($K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$) 氧化法测定。氮用半微量凯氏定氮法测定,磷用钼钒黄比色法测定。钾用火焰燃烧法测定,灰分含量采用高温炉燃烧法测定。

2.2 统计分析

分解速率采用指数模型来计算：

$$X_t/X_0 = \exp(-kt),$$

式中, X_t 为凋落物在 t 时刻的重量, X_0 为初始重量, k 为分解速率 (a^{-1}) t 为分解时间 (a)。凋落物袋中干物质和化学成分含量用剩余百分率来表示,即凋落物袋中剩余物质含量占该物质初始含量的百分比。某一时期化学元素含量表示为某种元素浓度与此时剩余干重之积。元素浓度以烘干样品为准。凋落物分解过程中的干物质分解率由去除灰分后的剩余干重表示。不同类型凋落物叶干物质、N、P、K 的剩余百分率间的差异用 one way ANOVA 和 Turkey's HSD 分析方法来判定,两组数据平均值间的差异用 t 检验方法进行检验。显著性水平均为 0.05。所有统计分析用 SPSS (SPSS inc., 2001) 软件来完成。

3 结果与分析

3.1 分解率

白桦叶和混合叶都存在快慢两个分解阶段 (图 1),凋落物在这两种林型内的分解模式相同。白桦林白桦叶和混合叶以及混交林白桦叶和混合叶在第 1 年 (0 ~ 344d) 里的分解率 (等于 1 - 凋落物剩余百分率) 分别为 $37.1\% \pm 4.5\%$, $45.7\% \pm 4.1\%$, $47.2\% \pm 5.9\%$ 和 $49.1\% \pm 5.5\%$,而它们在第 2 年 (344 ~ 729d) 的分解率分别为 $10.8\% \pm 2.8\%$, $11.3\% \pm 3.1\%$, $8.1\% \pm 2.3\%$ 和 $9.6\% \pm 3.6\%$,所有供试验凋落物在第 1 年的分解率要显著大于第 2 年 (t 检验 $p < 0.05$ $n = 15$)。原因在于分解初期可溶性物质大量淋失,易分解的物质被大量消耗,随着分解的进行,难分解的物质含量逐渐增加导致凋落物分解速率下降 [28,19,23]。

在分解实验初期 (0 ~ 290d),白桦叶片和混合叶片在 2 个森林类型之间的分解率差异不显著,并且在同一森林类型内白桦叶片和混合叶片之间分解率差异不显著 (图 1)。快速分解阶段结束后,森林类型和凋落物质量对分解的影响逐渐显现出来。两种类型中,凋落物在白桦山杨混交林的分解率要快于在白桦纯林内的分解率,但是白桦叶片分解率在这两个林型之间的差异显著,而混合叶片分解率在这两个林型之间的差异不显著 (图 1)。在同一森林中,混合叶片的分解率高于白桦叶片,但是两者之间的差异在白桦林中显著,而在混交林中不显著 (图 1)。白桦叶片的分解速率 (k 值) 小于混合叶片,但是二者之间的差异在白桦林内显著而在混交林内不显著 (表 1)。白桦林内白桦叶片的分解率和 k 值显著低于混交林内混合叶片,表明自然状态下白桦林内的凋落物有机物质循环速率显著低于白桦山杨混交林,混交林的林地环境促进白桦叶片分解。

同一林型内混合叶片的分解率和 k 值高于白桦叶片则与叶片内化学物质浓度有关。通常认为高的 N 浓

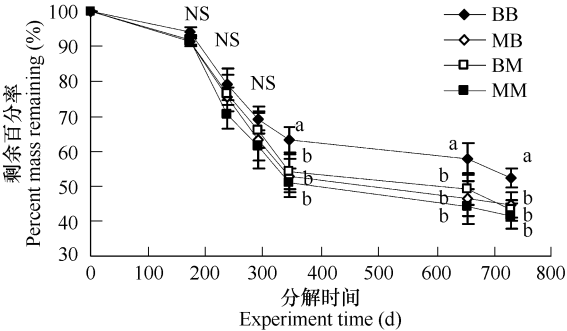


图 1 白桦叶片和混合叶片在白桦纯林和白桦山杨混交林的失重过程

Fig. 1 Decomposition of birch leaves and leaf mixture in pure birch forest and poplar and birch mixed forest

BB:白桦林白桦叶 birch leaves in the birch forest;BM:白桦林混合叶 mixed leaves in the birch forest;MB:混交林白桦叶 birch leaves in the birch and poplar forest;MM:混交林混合叶 mixed leaves in the birch and poplar forest;NS表示方差分析结果不显著 NS indicates that no significant differences were found;同一列内不同字母代表平均值之间差异显著 The same letter in each row means no significant difference in the litter mass remaining.;下同 the same below

度和低的 C/N 有利于凋落物分解^[6-8,17,18]。表 2 显示混合叶片的 N、P 和 K 元素浓度高于白桦叶片,而 C/N 和 C/P 则显著低于白桦叶片。山杨叶片 C 和 N 浓度与白桦叶片相当。水曲柳叶片内 N、P 和 K 元素浓度显著高于白桦叶片,而 C 浓度与显著低于白桦叶片,由此导致混合叶片具有高于白桦叶片的底物质量。

表 1 两种森林类型内凋落物分解速率 (*k*) ± S. E 和平均滞留时间

Table 1 The decomposition rate constants (*k*) ± S. E and mean residence time for birch leaves and leaves mixture in birch forest and birch and poplar mixed forest

森林类型 Forest types	凋落物 Litter types	<i>k</i> 值 <i>k</i> value (a ⁻¹)	<i>R</i> ²	<i>p</i> 值 <i>p</i> Value	滞留时间 Residence time (a)
白桦林 Birch forest	白桦叶 Birch leaves	0.3409 ± 0.0302a	0.88	<0.001	2.934
	混合叶 Leaves mixture	0.4454 ± 0.0289b	0.91	<0.001	2.296
白桦山杨混交林 Birch and poplar mixed forest	白桦叶 Birch leaves	0.4354 ± 0.0374b	0.89	<0.001	2.245
	混合叶 Leaves mixture	0.4831 ± 0.0563b	0.87	<0.001	2.096

同一列内不同字母代表平均值之间差异显著 The same letter in each column means no significant difference

表 2 白桦落叶和白桦山杨落叶内化学物质特征的初始值

Table 2 Initial chemistry characteristics of birch leaves , poplar leaves , ash leaves and mixed leaves (mg · g⁻¹)

凋落物类型 Litter type	全 C Total carbon	全 N Total nitrogen	全 P Total phosphorus	全 K Total potassium	C/N	C/P
白桦叶 Birch leaves						
平均值 Average	491.9a	9.89a	0.85a	0.86a	49.7a	578.7a
标准误差 S. E.	3.6	0.26	0.02	0.05	3.2	26.9
山杨叶 Poplar leaves						
平均值 Average	485.7ab	10.51ab	0.56b	0.47b	46.2a	867.32b
标准误差 S. E.	5.5	0.11	0.04	0.11	2.8	30.18
水曲柳叶 Ash leaves						
平均值 Average	476.6b	15.42c	1.25c	0.83a	30.9b	381.28c
标准误差 S. E.	3.8	0.32	0.03	0.17	1.5	22.54
混合叶 Leaves mixtures						
平均值 Average	479.1b	11.26b	1.04d	0.89a	42.5a	460.7d
标准误差 S. E.	7.8	0.39	0.08	0.08	2.5	18.3

同一列内不同字母代表平均值之间差异显著 The same letter in each column means no significant difference

3.2 养分元素浓度变化趋势

两种类型叶片 N 浓度在分解初期呈快速增加的趋势,在第 344 天达到峰值,而后 N 浓度略有下降(图 2)。两种类型叶片中 P 浓度呈现出不规则的变化趋势,白桦叶片在分解结束后 P 浓度略有增加,而混合叶片 P 浓度增加趋势不明显(图 2)。而 C 和 K 浓度随着分解的进行呈现逐渐下降的趋势(图 2)。分解结束后,林型对白桦叶 N 浓度的影响不显著而对混合叶 N 浓度的影响显著,白桦叶片和混合叶片的 P 和 K 浓度在两种林型之间差异不显著,但是在同一林型内差异显著,凋落物 C 浓度在两个林型间差异不显著(表 3)。

3.3 养分元素释放过程

在分解过程中两种类型叶片在白桦林和白桦山杨混交林均存在显著的 N 固持现象(accumulation),在分解后期呈现出 N 净矿化现象(mineralization)。白桦叶 N 元素动态在两种林型存在明显差异(图 3)。混交林白桦叶在分解初始阶段即 0 ~ 237d 便呈现 N 固持,而在相同时期内白桦林中白桦叶 N 固持现象不明显(图 3)。混合叶片在两个林型中 N 元素动态基本一致。混合叶片 N 固持时间短于白桦叶片(图 3)。分解实验结束后,白桦林中白桦叶片和混合叶片 N 元素的剩余百分率分别为 88.5% ± 2.8% 和 76.8% ± 6.1%,而混交林中

N 元素的剩余百分率分别为 $82.5\% \pm 5.5\%$ 和 $73.8\% \pm 4.7\%$ 。同种林型中混合叶片 N 元素的剩余百分率要低于白桦叶。与混交林内混合叶片相比,白桦林内白桦叶片 N 的固持时间长而矿化率低。说明天然状态下,混交林的 N 元素供应能力要显著大于白桦纯林。

表 3 分解实验结束后白桦林和混交林内白桦叶和混合叶养分元素浓度

Table 3 Nutrient concentrations ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) of birch leaves and mixed leaves in Birch forest and birch and polar mixed forest at the end of decomposition experiment

凋落物类型 Litter type	全 C Total carbon	全 N Total nitrogen	全 P Total phosphorus	全 K Total potassium
白桦林白桦叶 BB				
平均值 Average	450.0a	16.8ab	0.99a	0.56a
标准误差 S. E.	9.6	0.7	0.05	0.02
白桦林混合叶 BM				
平均值 Average	450.4a	17.5a	1.26b	0.75b
标准误差 S. E.	9.0	0.5	0.06	0.03
混交林白桦叶 MB				
平均值 Average	454.0a	17.2ab	1.02a	0.58a
标准误差 S. E.	8.8	0.5	0.03	0.03
混交林混合叶 MM				
平均值 Average	449.4a	16.1b	1.18b	0.73b
标准误差 S. E.	8.9	0.5	0.04	0.02

同一列内不同字母代表平均值之间差异显著 The same letter in each column means no significant difference

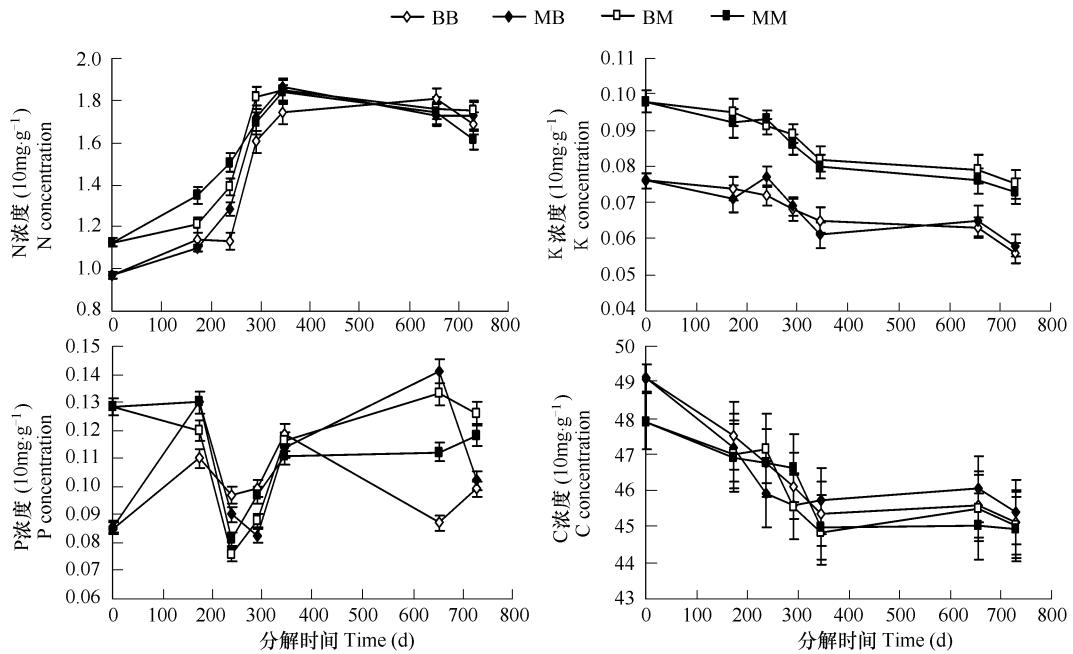


图 2 养分元素浓度变化趋势

Fig. 2 Changes of concentrations of N , P , K , and C in litter

两种类型叶片在白桦林和白桦山杨混交林均存在显著的 P 固持现象,200d 后两种凋落物呈现出 P 净矿化现象(图 3)。但是在分解初期混合叶片 P 固持率显著小于白桦叶片。在 0~237d 分解时间内叶片 P 元素动态在两种林型间基本一致,随着分解的进行林型之间 P 元素动态差异逐渐变大。分解实验结束后,白桦林中白桦叶片和混合叶片 N 元素的剩余百分率分别为 $50.17\% \pm 3.5\%$ 和 $49.80\% \pm 5.2\%$,而混交林中 N 元素的剩余百分率分别为 $46.99\% \pm 3.9\%$ 和 $44.49\% \pm 3.1\%$ (图 3)。与 N 释放过程相比,P 的固持时间短,释放

率高。

两种类型叶片在白桦林和白桦山杨混交林 K 元素动态基本一致。相同林型内混合叶片和白桦叶 K 元素的剩余百分率差异不显著 (图 3)。分解实验过程中 K 元素并没有发生固持现象,分解实验结束后,白桦叶片和混合叶片在白桦林中 K 元素的剩余百分率分别为 $32.7\% \pm 1.1\%$ 和 $30.8\% \pm 2.6\%$,而混交林中 K 元素的剩余百分率分别为 $31.1\% \pm 1.9\%$ 和 $29.2\% \pm 1.1\%$ (图 3)。所有叶片 K 元素的剩余百分率要显著低于 P 元素和 N 元素的剩余百分率 (t 检验 $p < 0.05$ $n = 15$)。

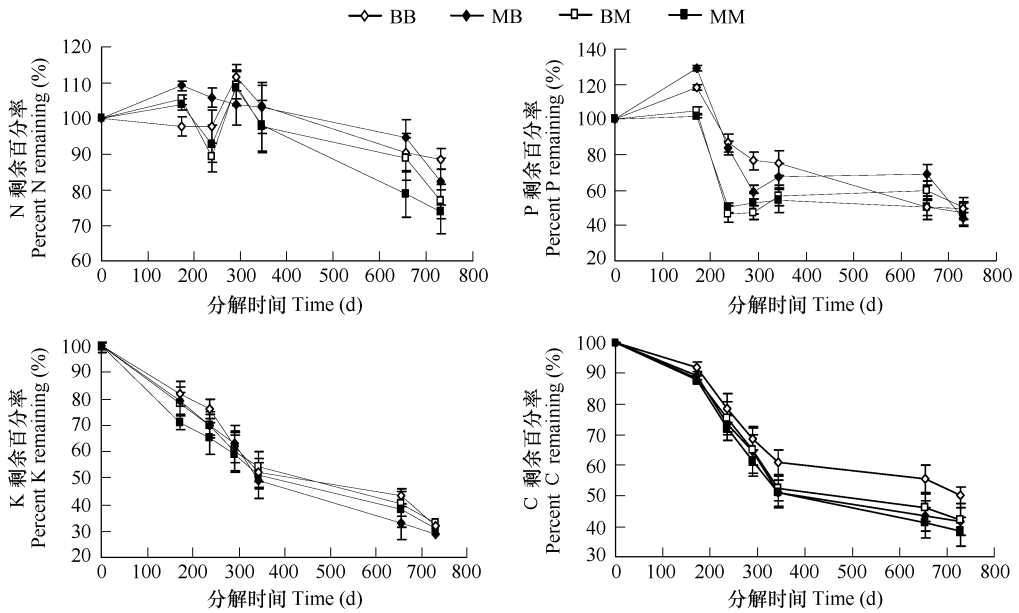


图 3 叶片养分元素释放动态
Fig. 3 Nutrient release dynamics of leaf litter

随着分解的进行,凋落物中 C/N 逐渐降低,在分解后期两种类型叶片的 C/N 值近似相同。2a 分解时间后,白桦叶片的 C/N 由最初的 49.16 降至 26 左右,而混合叶片的 C/N 由最初的 42.53 降至 23 左右 (图 4)。

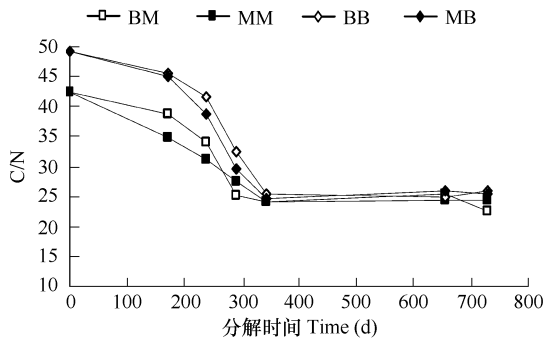


图 4 叶片分解过程 C/N 比的变化趋势
Fig. 4 Dynamics of litter C/N ratio

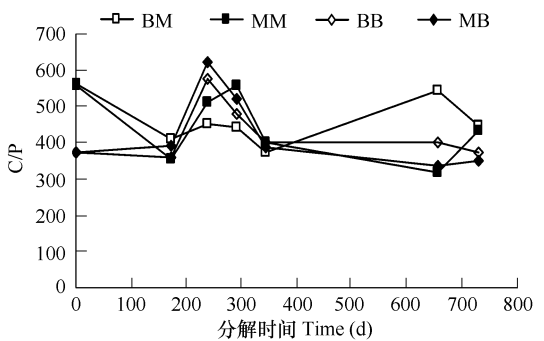


图 5 叶片分解过程 C/P 比的变化趋势
Fig. 5 Dynamics of litter C/P ratio

两种类型叶片 C/P 的变化趋势存在差异,在分解结束后,混合叶片的 C/P 大于初始值,而白桦叶片 C/P 则小于初始值 (图 5)。

4 讨论

不同类型凋落物分解率之间的差异在分解初期 (0 ~ 290 d) 不显著而在后期显著 (344 ~ 729 d)。张德强等^[21]对鼎湖山几种森林类型凋落物分解研究表明同种类型凋落物在不同森林类型间的分解率存在显著差

异,并且这种差异在分解初期显现出来。原因在于鼎湖山地处南亚热带,温度和降水量远大于长白山,微生物一年四季对凋落物进行有效分解,不同林型之间由于微生物种类和数量不同致使同种类型凋落物分解率呈现显著差异。长白山地处中温带,秋末至第二年初春阶段气温在 0°C 以下,微生物活动微弱,凋落物分解主要以淋溶为主,此时所有供实验凋落物之间分解率差异不显著(图1)。随着气温的升高,微生物的活动逐渐增强,凋落物分解率在不同林型之间的差异逐渐加大直至达到显著差异的水平。白桦叶片在白桦纯林内分解速率(k 值)显著低于白桦山杨混交林内的分解率,该结果表明森林类型可以显著影响凋落物分解速率。此外,混合叶片的分解速率(k 值)在这两种森林类型之间的差异不显著,说明凋落物的底物(substrate)质量在某种程度上可以抵消森林类型对凋落物分解的效应。由此可见,林型对凋落物分解影响不具有普遍性。造成这种现象的原因在于装有白桦叶片的分解袋置于混交林中相当于与林地叶片混合,导致它与混合叶片在底物质量方面的差异减小,进而缩小两者之间分解率的差异。在白桦纯林中,林地凋落物基本由白桦叶片构成,底物质量低,在这种环境条件下凋落物底物质量对分解的影响显现出来,混合叶片中N浓度高于白桦叶片,在一定程度上满足微生物分解活动对N的需求,因此具有更快的分解速率,故而使两者分解率差异加大。Austin and Vitousek^[12]采用交互实验方法对夏威夷不同降水量上的凋落物分解研究表明凋落物质量和森林类型均可显著影响凋落物分解率,这与本文的结果一致。

凋落物在分解过程中N、P元素存在先固持后矿化的现象,这与许多研究相同,通常认为凋落物N、P元素固持现象主要发生在第一年分解时间内,之后即进入矿化阶段。然而,由于凋落物底物质量不同导致不同类型叶片N、P元素的固持和矿化时间长短不同,有些研究认为凋落物内N、P元素浓度越高则固持时间越短^[7, 17, 18, 24~26, 31]。本研究中混合叶片高的初始N、P元素浓度对应于短的固持时间则说明凋落物底物质量与N、P元素的固持时间存在某种相关关系。

本研究中,两种类型叶C/N在分解过程中逐渐降低,在分解后期降至25左右。而刘强等^[28]对海南尖峰岭地区凋落物分解研究发现有些凋落物的C/N在分解后期有显著升高的现象,这与本文的结果不同。凋落物在分解过程中,微生物对N有较高的需求,微生物的C/N值通常在10以下,而凋落物中通常缺乏N导致多数N被微生物所固持,因此凋落物中N浓度增加,C/N降低。有些学者认为发生N固持的C/N的关键值为30,当C/N大于30时发生固持,小于30发生矿化^[23, 27]。Scheffer^[19]对荷兰处于不同演替阶段的两个泥炭沼泽上生长的植物凋落物分解进行研究发现,当C/N比低于30时才能发生矿化作用。Killham^[29]认为C/N降至25以下,N的释放才加快。本研究中除混交林中的白桦叶外其余供试验凋落物的C/N接近30时发生N矿化现象即凋落物内N含量开始下降,所有供试验凋落物的C/N接近25时发生N净矿化现象。这与上述的研究结果基本一致。多数凋落物分解实验并没有关注P浓度和C/P之间的关系,原因在于在多数生态系统凋落物中P元素相对充足,只有在P元素缺乏的环境条件下,凋落物分解才受P元素所制约^[11, 23]。本研究中C/P对P的固持和矿化过程没有产生影响。

同种类型叶片在白桦林和白桦山杨混交林林内N和P元素释放方式存在显著差异,这表明森林类型不同将改变凋落物养分元素的释放方式。这可能是由于两种森林类型之间林地物理化学性质和微生物区系存在差异,不同种类微生物对凋落物的侵染方式和分解产物不同将形成不同的凋落物分解产物^[14, 18, 19]。然而林型对两种类型叶片K元素释放方式的影响不显著则说明林型对养分元素释放方式的影响不具有普遍性。其原因有待于进一步研究。杨玉盛^[30]等对杉木纯林和杉木观光木混交林内凋落物分解研究显示,在整个510d分解期间内杉木枝、叶分解率和C、N、P和K养分元素的释放率在两个林型之间差异不显著。这与本文对凋落物C、N和P释放动态的研究结果不同,但是与K元素释放动态的结果相同。

理论上认为,混交林的N浓度和C/N物质循环速率要高于纯林,因为混交林中凋落物种类丰富,可为更多种类的微生物和土壤动物提供代谢物质,增加了食物链数量,进而促进物质循环速率。白桦林内白桦叶片分解率和N元素剩余百分率均显著高于混交林内的混合叶片,由此证明白桦林物质循环速率要显著低于白桦山杨混交林。此外,不同类型叶片进行混合往往会使某种叶片分解速率加快。廖利平等^[32]对杉木与主要

造林树种叶进行混合分解实验发现杉木与火力楠进行混合分解时其分解速率和养分元素释放率得到加强,而与其它树种叶片进行混合时则不存在相互作用。林开敏等^[33]对杉木与其它植物进行混合分解实验证明不同植物对杉木凋落物分解具有不同的促进作用,而杉木凋落物则会抑制其它植物凋落物分解。本实验表明白桦叶片在白桦纯林内的分解速率(*k*值)和N释放率要显著低于白桦山杨混交林,说明白桦叶片与混交林内其它树种叶片进行混合有可能会促进白桦叶片的分解率和养分元素释放率。因此,不同类型叶片在分解过程中的相互促进作用也是导致混交林凋落物分解率快于白桦纯林的原因之一。

白桦落叶在两种不同的森林类型中分解率和N、P元素释放方式均存在显著差异。然而在森林生态系统中,同一树种往往分布在不同森林类型中,其凋落物分解过程可能会随着其伴生树种凋落物类型的变化而变化。对此问题进行研究可以进一步从机理上解释不同森林类型之间养分元素循环速率存在差异的原因。

References :

[1] Aerts R, Verhoeven J T A, Whigham D F. Plant mediated controls on nutrient cycling in temperate fens and bogs. *Ecology*, 1999, 80 : 2170 — 2181.

[2] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *For. Ecol. Manage.*, 2000, 133 : 13 — 22.

[3] Berg B, McClaugherty C, De Santo A V, *et al.* Humus buildup in boreal forests : effects of litter fall and its N concentration. *Can. J. For. Res.*, 2001, 31 : 988 — 998.

[4] Edwards P J. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. *Journal of Ecology*, 1977, 65 : 971 — 992.

[5] Edwards P J. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea V. Rates of cycling in throughfall and litter fall. *Journal of Ecology*, 1982, 65 : 971 — 992.

[6] Aber J D, Melillo J M, McClaugherty C A. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Can. J. Bot.*, 1990, 68 : 2201 — 2208.

[7] Limpens L, Berendse L. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing Sphagnum. *Oikos*, 2003, 103 : 537 — 547.

[8] Melillo J M, Aber J D, Muratore J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, 63 : 621 — 626.

[9] Melillo J M, Aber J D, Linkins A E *et al.* Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum. *Plant and Soil*, 1989, 115 : 189 — 198.

[10] Vitousek P M. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, 1984, 65 : 285 — 298.

[11] Vitousek P M, Turner D R, Parton W. Litter decomposition on the Mauna Loa environment matrix, Hawai'i : patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, 1994, 75 : 418 — 429.

[12] Austin A T, Vitousek P. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawai'i. *Journal of Ecology*, 2000, 88 : 129 — 138.

[13] Liski J, Nissinen A, Erhard M, Taskinen O. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology*, 2003, 9 : 575 — 584.

[14] Prescott C E, Vesterdal L, Preston C M, *et al.* Influence of initial chemistry on decomposition of foliar litter in contrasting forest types in British Columbia. *Can. J. For. Res.*, 2004, 34 : 1714 — 1729.

[15] Moore T R, Trofymow J A, Taylor B, *et al.* Litter decomposition rates in Canadian forests. *Global Change Biology*, 1999, 5 : 75 — 82.

[16] Yin C J, Huang D H, Chen Z Z. Quantitative relationships between the litter decomposition of four species in inner mongolia grassland and climatic factors. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14 (2) : 149 — 154.

[17] Chen H, Mark E H, Tian H Q. Effects of global change on litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (9) : 1549 — 1563.

[18] Hobbie S, Gough L. Litter decomposition in moist acidic and non-acidic tundra with different glacial histories. *Oecologia*, 2004, 140 : 113 — 124.

[19] Scheffer R A, P van Logtestijn R S P, Verhoeven J T A. Decomposition of *Carex* and *Sphagnum* litter in two mesotrophic fens differing in dominant plant species. *Oikos*, 2001, 92 : 44 — 54.

[20] James B F. Fine-scale patterns of leaf litterfall and nitrogen cycling in an old-growth forest. *Can. J. For. Res.*, 1999, 29 : 291 — 302.

[21] Zhang D Q, Ye W H, Yu Q F, *et al.* The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (6) : 938 — 944.

[22] Xu Z B, Dai L M, Zhang Y J, *et al.* Decomposition process of *Tilia amurensis* leaves in the Changbai Mountain forest ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (4) : 501 — 504.

[23] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in terrestrial ecosystem*. Oxford : Blackwell Scientific Publication, 1979. 56 — 57.

[24] Joseph J H , Wilson C A , Boring L R. Foliar litter position and decomposition in a fire-maintained longleaf pine- wiregrass ecosystem. Can. J. For. Res. ,2002 ,32 :928 — 941.

[25] Taylor B R , Parkinson D , Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates : a microcosm test. Ecology ,1989 ,70 :97 — 104.

[26] Tian G , Kang B T , Brussard L. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions decomposition and nutrient release. Soil Biology and Biochemistry ,1992 ,24 :1051 — 1060.

[27] Parnas H. Model for decomposition of organic material by microorganisms. Soil Biology and Biochemistry ,1975 ,7 :161 — 169.

[28] Liu Q , Peng S L , Bi H , *et al.* Nutrient dynamics of foliar litter in reciprocal decomposition in tropical and subtropical forests. Journal of Beijing Forestry University ,2005 ,27 (1) :24 — 32.

[29] Killham K , Foster R. Soil ecology. Cambridge : Cambridge University Press ,1994.

[30] Yang Y S , Chen G S , Guo J F , *et al.* Litter decomposition and nutrient release in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. Acta Phytocologica Sinica 2002 ,26 (3) 275 — 282.

[31] Sundarapandian S M , Swamy P S. Litter production and leaf-litter decomposition of selected tree species in tropical forests at Kodayar in the Western Ghats , India . For. Ecol. Manage. ,1999 ,123 :231 — 244.

[32] Liao L P , Ma Y Q , Wang S L , *et al.* Decomposition of leaf litter of Chinese fir in mixture with major associated broad-leaved plantation species. Acta Phytocologica Sinica ,2000 24 (1) :27 — 33 .

[33] Lin K M , Hong W , Yu X R , *et al.* Decomposition interaction of mixed litter between Chinese fir and various accompanying plant species. Chinese Journal of Applied Ecology ,2001 ,12 (3) :321 — 325.

参考文献：

[16] 尹承军 ,黄德华 ,陈佐忠. 内蒙古典型草原 4 种植物凋落物分解速率与气候因子之间的定量关系. 生态学报 ,1994 ,14 (2) :149 ~ 154.

[17] 陈华 ,Mark E H ,田汉勤. 全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响. 生态学报 2001 ,21 (9) :1549 ~ 1563.

[21] 张德强 ,叶万辉 ,余清发 ,等. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究. 生态学报 2000 ,20 (6) 938 ~ 944.

[22] 徐振邦 ,代力民 ,张扬建 ,等. 长白山森林生态系统椴树叶分解进程的研究. 应用生态学报 2001 ,12 (4) 501 ~ 504.

[28] 刘强 ,彭少麟 ,毕华 ,等. 热带亚热带森林凋落物交互分解的养分动态. 北京林业大学学报 ,2005. 27 (1) 24 ~ 32.

[30] 杨玉盛 ,陈光水 ,郭建芬 ,等. 杉木观光木混交林凋落物分解及养分释放的研究. 植物生态学报 2002 ,26 (3) 275 ~ 282.

[32] 廖利平 ,马越强 ,汪思龙 ,等. 杉木与主要阔叶造林树种叶凋落物的混合分解. 植物生态学报 2000 , 24 (1) :27 ~ 33.

[33] 林开敏 ,洪伟 ,俞新妥 ,等. 杉木与伴生植物混合分解的相互作用研究. 应用生态学报 2001 ,12 (3) 321 ~ 325.