

千岛湖生态公益林主要树种凋落物分解及碳素动态变化研究

李红俊¹, 高海力², 周卫青¹, 向新年¹, 徐剑青¹, 徐高福³

(1. 淳安县林业局, 浙江 淳安 311700; 2. 浙江省公益林和国有林场管理总站, 浙江 杭州 310020;
3. 淳安县新安江生态开发集团有限公司, 浙江 淳安 311700)

摘要: 采用分解袋法, 对千岛湖生态公益林主要树种木荷 *Schima superba*, 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*, 马尾松 *Pinus massoniana* 和杉木 *Cunninghamia lanceolata* 凋落物的分解速率和碳元素变化动态进行了研究。结果表明, 凋落物的分解速率顺序为青冈 > 木荷 > 马尾松 > 杉木, 凋落物 95% 分解时间集中在 5.99 ~ 7.49 a。木荷和马尾松凋落物分解特性为先快后慢, 青冈整体分解速率较快, 且出现了 3 个快速分解期, 杉木凋落物在整个试验过程中分解速率变化不大。4 个树种凋落物的碳元素剩余率整体均呈下降趋势, 但是木荷、青冈和马尾松的碳元素均存在释放停滞期, 导致碳元素含量呈现“W”型变化, 而杉木碳元素含量没有明显的释放停滞期, 碳元素含量阶梯式下降。表明木荷、青冈和马尾松的碳素分解可能为淋溶-富集-释放模式, 杉木碳元素分解可能为淋溶-释放模式。

关键词: 凋落物; 碳元素; 木荷; 青冈; 马尾松; 杉木; 千岛湖; 生态公益林

中图分类号: S718.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776(2019)06-0038-07

Study on Decomposition of Litter and Carbon Dynamics of Major Tree Species in Ecological Forest of Qiandao Lake

LI Hong-jun¹, GAO Hai-li², ZHOU Wei-qing¹, XIANG Xin-nian¹, XU Jian-qing¹, XU Gao-fu³

(1. Chun'an Forestry Bureau of Zhejiang, Chun'an 311700, China; 2. Zhejiang Ecological Forest and State-Owned Forest Farm Administration, Hangzhou 310020, China; 3. Chun'an Xin'anjiang Ecological Development Company of Zhejiang, Chun'an 311700, China)

Abstract: During March and April of 2016, litter from forest of *Schima superba*, *Cyclobalanopsis glauca*, *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* was collected in Qiandao Lake, Zhejiang province. It was air dried, put into litter bag with 10g each and placed in 3 sample plots with 20 m×20 m each to study litter decomposition and carbon change within 840 days. The results showed that litter decomposition rate was in the order of *C. glauca*>*S. superba*>*P. massoniana*>*C. lanceolata*, and 95% of litter decomposed within 5.99-7.49 year. Decomposition rate of litter from *S. superba* and *P. massoniana* forest had characters of fast in the first and slow later, while that from *C. glauca* was relatively fast with three fast periods. The decomposition rate of litter from *C. lanceolata* forest had no evident change. The carbon content in litter of the four tree species decreased with decomposition duration, but that of *S. superba*, *C. glauca* and *P. massoniana* had lag phases during the whole process.

Key words: litter; carbon; *Schima superba*; *Cyclobalanopsis glauca*; *Pinus massoniana*; *Cunninghamia lanceolata*; Qiandao Lake; ecological forest

浙江省已经开展了近 20 年的生态公益林建设工作, 在生物量时空分布特征^[1]、群落结构特征^[2]、生态效益评价^[3]等方面开展了较多的研究。随着全球气候变化对陆地生态系统影响的加剧, 凋落物分解及碳素动态变化

收稿日期: 2019-04-21; 修回日期: 2019-09-07

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027)

作者简介: 李红俊, 林业工程师, 从事营林生产与公益林管理工作; E-mail:2413711077@qq.com。

成为了气候变化对森林生态系统影响研究的重要内容。这是因为陆地生态系统每年产生的有机物中约有 90% 以不同的凋落物形式回到生态系统中^[4], 而且凋落物分解是生态系统物质循环的关键环节。生态公益林经过多年的建设, 动植物种群结构和群落结构均发生了一些变化, 开展凋落物分解和碳素动态研究对于进一步探索生物地球化学循环特性和评价生态公益林建设成效具有重要作用。

浙江千岛湖湖区拥有生态公益林 2.32 万 hm^2 , 占该区域森林总经营面积的 73.40%。其建设成效直接关系着浙西北 300 多万人饮用水安全、新安江至钱塘江全流域工农业生产和城市建设, 同时也是区域旅游和电力工业发展的基础^[5]。因此本文对千岛湖生态公益林中的 4 种主要树种凋落物分解过程特性开展了 2.5 年的研究, 试图揭示该区域主要树种凋落物分解过程的碳素动态变化规律, 为亚热带森林碳循环机理研究和生态公益林建设工作提供一些数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为浙江省杭州市西南部的千岛湖姥山林场, $29^{\circ}32'34'' \text{N}$, $119^{\circ}04'04'' \text{E}$, 属亚热带季风气候, 温暖湿润。年均降水量 1 430 mm, 年均气温 17.0°C , 1 月平均气温 5.0°C , 7 月平均气温 28.9°C , 年平均无霜期 263 d, 年均相对湿度 76%, 土壤类型为黄红壤, 土层厚度 50 ~ 120 cm, 凋落物厚度 2 ~ 15 cm。地貌以低山丘陵为主。

林场总面积 3 505.27 hm^2 , 天然林 2 393.82 hm^2 , 人工林 918.52 hm^2 , 经济林 121.39 hm^2 。其中生态公益林中的天然林以马尾松 *Pinus massoniana* 林占优势地位, 人工林以马尾松人工林和杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林为主。木荷 *Schima superba*, 青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 等为该林场常绿阔叶林的建群树种, 间有麻栎 *Quercus acutissima*, 毛竹 *Phyllostachys edulis* 等植物。马尾松是我国南方主要的用材树种, 也是我国长江流域各省重要的荒山造林的先锋树种, 不但具有重要的经济意义、防护效能及美学价值, 而且在维护生态平衡方面发挥了明显的作用^[6]。木荷是我国亚热带常绿阔叶林的重要建群种, 是生物防火的珍贵优质阔叶用材树种^[7]。青冈是常绿阔叶林的主要树种, 可以保持水土、改善土壤肥力, 有重要的生态效益^[7]。杉木是我国南方重要的用材树种之一, 自然分布和人工栽培都很广^[8]。林下灌木层主要有白檀 *Symplocos paniculata*, 白栎 *Quercus fabri*, 白背叶 *Mallotus apelta*, 山胡椒 *Lindera glauca* 等。草本层主要为芒萁 *Dicranopteris dichotoma*, 黑足鳞毛蕨 *Dryopteris fuscipes* 和山麦冬 *Liriope spicata* 等。

1.2 凋落物收集及化学组分测定

2016 年 3—4 月, 在姥山林场生态公益林收集马尾松、木荷、青冈和杉木 4 个主要树种的新鲜凋落物, 自然风干后, 分别装入分解袋。根据前人开展的亚热带地区凋落物分解试验, 选择的分解袋孔径为 1.0 mm \times 1.5 mm, 大小为 15 cm \times 15 cm, 由尼龙网制成^[9]。每个分解袋内装有风干凋落物 10 g。在姥山林场内选择林分条件基本一致的常绿阔叶林, 随机设置 3 个 20 m \times 20 m 的样地用于放置分解袋。分解袋置于地表, 与下面的凋落物层接触。每个样地放置 56 个分解袋 (每种凋落物类型 14 个)。每 2 个月随机从每个样地取回凋落物分解袋 4 个 (每种凋落物类型 1 个), 共计 12 个, 共收集 14 次, 为期 840 d。

将取回的凋落物分解袋表面附着的泥沙冲洗干净, 清除长入袋内的根系, 然后把凋落物置于 70°C 烘箱中烘干至恒质量, 称量后粉碎, 过 100 目筛, 用重铬酸钾-浓硫酸氧化法测定碳含量。

1.3 计算公式

凋落物干物质剩余率 (y):

$$y = (M_t / M_0) \times 100\%$$

式中, y 为凋落物干物质剩余率 (%), M_0 为凋落物初始干物质质量 (g), M_t 为凋落物在 t 时的干质量 (g)。

凋落物分解速率 (k) 常用 Olson 指数模型 $M_t / M_0 = e^{-kt}$ 中的分解系数 k 来描述^[10], 该模型转化后为:

$$\ln(M_t / M_0) = -kt$$

式中, k 为凋落物分解系数, t 为凋落物分解时间 (a), 根据试验数值进行曲线拟合, 可计算得到 k 值。

碳素剩余率 (NR) :

$$NR = [(N_t \times M_t) / (N_0 \times M_0)] \times 100\%$$

式中, N_t 为 t 时凋落物的碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), M_t 为凋落物在 t 时的干质量 (g), N_0 为凋落物初始碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), M_0 为凋落物初始干物质质量 (g)。

1.4 数据分析

数据分析采用 SPSS 20.0 软件, 不同树种凋落物分解速率和碳损失量比较采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD), 并采用 Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 不同树种凋落物的分解速率变化特征

4 种凋落物分解速率大致呈先快后慢的特性, 但是不同树种存在一定差异。木荷干物质剩余率基本呈直线下降趋势。分解 360 d 后, 干物质剩余率为 53.53%, 分解 840 d 后, 干物质剩余率为 35.12%, 整体呈现先快后慢的趋势。青冈凋落物出现了 3 个快速分解阶段, 分别为 0~60 d (5-7 月), 360~480 d (5-9 月) 和 600~720 d (1-5 月), 分解至 840 d 时, 干物质剩余率为 30.84%。

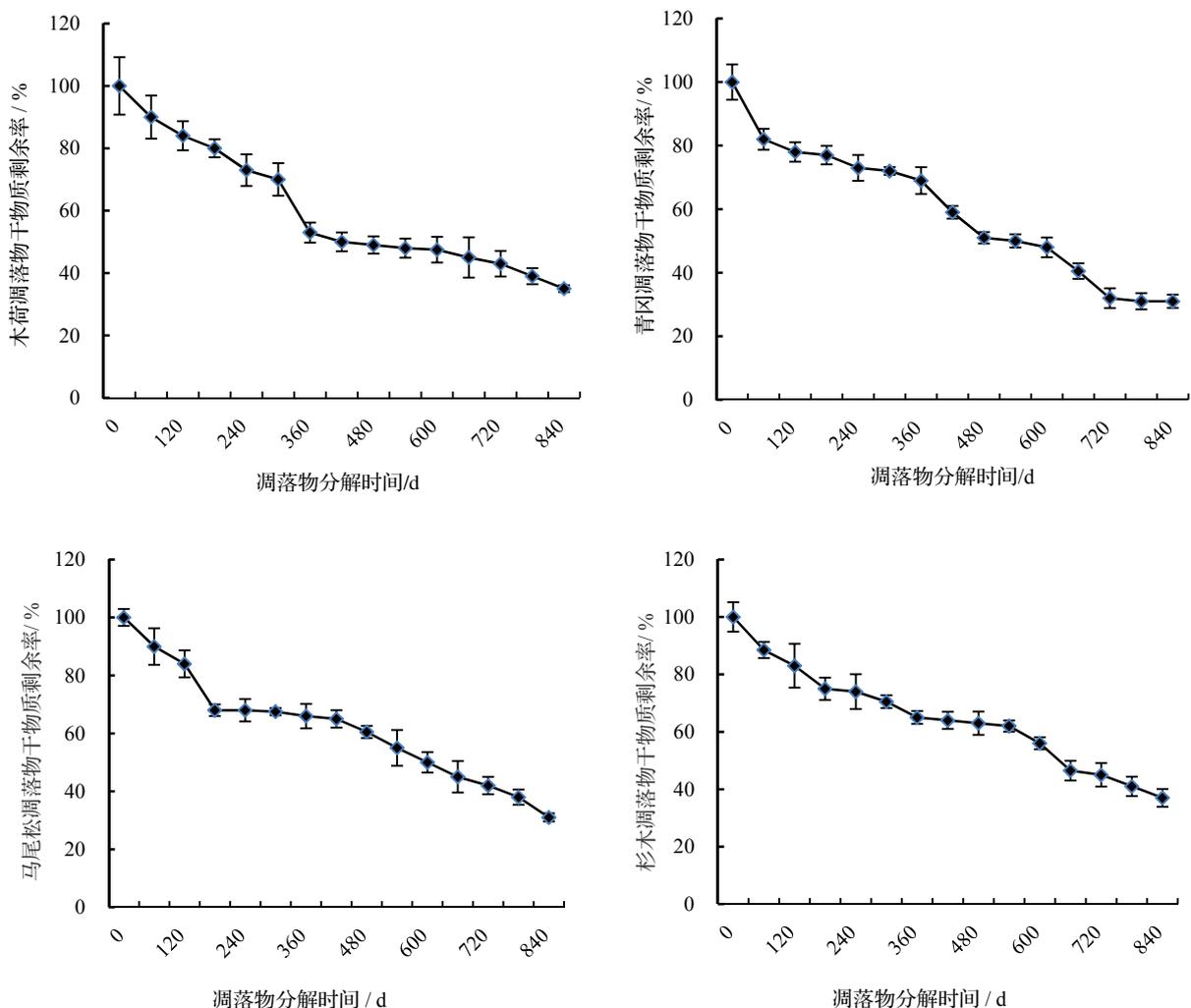


图 1 凋落物分解过程中干物质剩余率的变化

Figure 1 Changes of dry matter residual rate of litterfall in the decomposition process

前 2 个阶段正好处于春末夏初和夏季, 温湿度较高, 有利于分解; 而第 3 个快速分解阶段为冬季和春季, 温度较低, 为何产生快速分解现象还需要进一步研究。马尾松凋落物的分解特征为先快后慢再快。分解 180 d 后, 马尾松凋落物的干物质剩余率为 67.69%; 180 ~ 420 d 期间分解缓慢, 干物质剩余率仅比分解 180 d 后降低了 2.69%; 分解 840 d 后, 干质量剩余率为 30.60%。杉木凋落物分解过程与马尾松类似, 但是分解速率较马尾松低。分解 180 d 后, 干质量剩余率为 75.15%, 分解 540 d 后, 干质量剩余率为 62.03%, 分解 840 d 后, 干质量剩余率为 36.76%。虽然 4 个树种凋落物分解特性各不相同, 但分解 840 d 后的干质量剩余率之间差异不显著。

Olson 指数模型能够很好地模拟了 4 个树种凋落物的分解过程, 各树种凋落物相关系数均在 0.9 以上(表 1)。总体而言, 各树种凋落物分解 95% 所需时间大致在 6 a 左右, 分解 50% 所需时间大致为 1.5 a 左右。分解系数 k 值越大, 说明分解速率越高。根据表 1 可知, 青冈凋落物分解速率最高, 木荷和马尾松其次, 杉木最低, 其中青冈凋落物的分解系数显著高于杉木 ($P < 0.05$)。

表 1 4 个树种凋落物干物质剩余率与时间的回归分析
Table 1 Regression analysis on decomposition rate of litter from 4 plantations and time

树种	回归方程	分解系数 k	相关系数 R^2	半衰期 $t_{0.5}/a$	周转期 $t_{0.95}/a$
木荷	$y=100e^{-0.47t}$	$0.47 \pm 0.03ab$	0.966	$1.47 \pm 0.08ab$	$6.37 \pm 0.11ab$
青冈	$y=100e^{-0.50t}$	$0.50 \pm 0.02a$	0.963	$1.39 \pm 0.03a$	$5.99 \pm 0.09a$
马尾松	$y=100e^{-0.45t}$	$0.45 \pm 0.02ab$	0.954	$1.54 \pm 0.05ab$	$6.66 \pm 0.07ab$
杉木	$y=100e^{-0.40t}$	$0.40 \pm 0.04b$	0.937	$1.73 \pm 0.06b$	$7.49 \pm 0.14b$

注: y 为凋落物的干物质剩余率, t 为凋落物分解时间; 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 不同树种凋落物分解过程中碳含量动态变化特征

根据图 2 可知, 4 个树种凋落物的碳含量均整体呈下降趋势, 但是不同树种变化趋势存在一定差异。木荷和青冈凋落物的碳含量变化呈“W”型, 即先降低后升高再降低再升高的趋势。木荷凋落物的初始碳含量为 $477.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分解 180 d, 660 d 和 840 d 后达到 3 个最低点, 碳含量分别为 338.75 , 237.78 和 $237.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分解 360 d 和 780 d 后达到 2 个高峰, 碳含量分别为 443.40 和 $307.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。青冈凋落物初始碳含量为 $467.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分解 360 d、660 d 和 840 d 后达到 3 个最低点, 碳含量分别为 320.29 , 286.42 和 $270.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在分解 420 d 和 720 d 后达到 2 个高峰, 碳含量分别为 374.58 和 $393.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

马尾松凋落物碳含量变化呈先降低后升高再降低。马尾松凋落物初始碳含量为 $512.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分解 120 d 后显著下降, 而后显著升高, 在 180 ~ 360 d 之间维持在 $485 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 接着逐渐降低至 $485 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 仅在第 660 d 有显著升高。杉木凋落物碳含量呈阶梯式下降趋势。杉木凋落物的初始碳含量为 $483.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分解 60 d 后显著降低, 在 180 ~ 480 d 期间维持在 $450 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 随后显著下降至 $300 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, 在 720 d 后又显著下降至 $210 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。

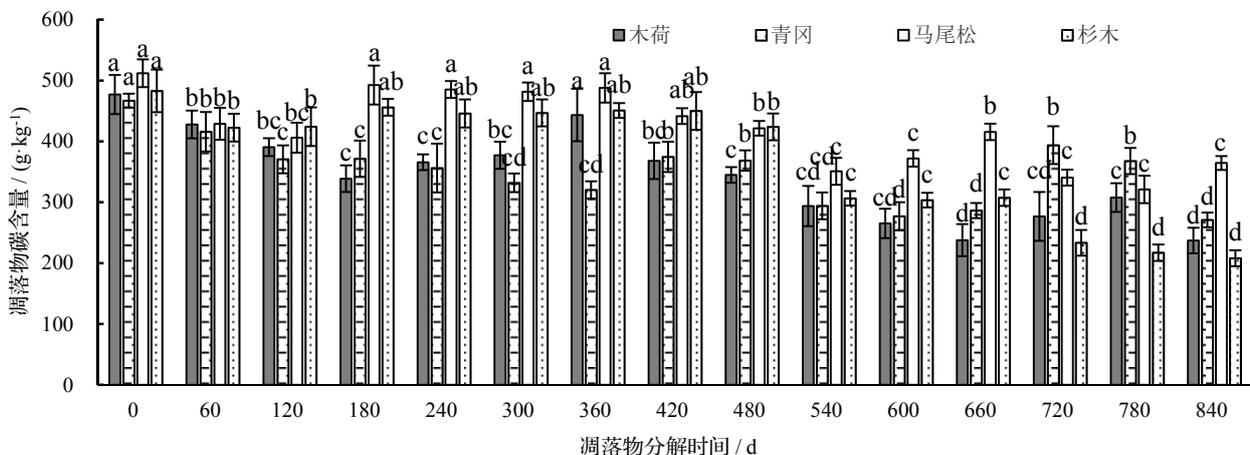


图 2 凋落物分解过程中碳含量变化

Figure 2 Dynamics of carbon content in decomposing litter

2.3 不同树种凋落物分解过程中碳元素释放规律

4种凋落物的碳元素动态变化均呈现前期释放较快,后期释放较慢的特点。木荷凋落物的碳元素释放快速期为0~180 d,期间释放的碳元素量将近凋落物初始碳元素量的50%,180~360 d碳素剩余率维持在50%左右,360 d之后又持续释放碳元素,但是释放速率小于0~180 d,在660 d后又出现一个碳素释放缓慢期,剩余碳元素含量维持在22%左右。青冈凋落物的碳元素释放快速期为0~120 d,期间释放的碳元素量将近凋落物初始碳素量的40%,随后持续释放碳素,至840 d时,碳元素剩余率为17.99%。马尾松凋落物的碳素释放快速期为0~120 d和360~540 d,释放的碳元素量分别为凋落物初始碳素量的33.40%和25.19%,至840 d时,碳元素剩余率为22.07%。杉木凋落物的碳元素释放快速期时间较短,为0~60 d,释放的碳元素量为凋落物初始碳素量的22.57%,但是其后碳元素一直持续释放,且在480 d后释放速率略有增加,至840 d时,碳元素剩余率为15.94%。

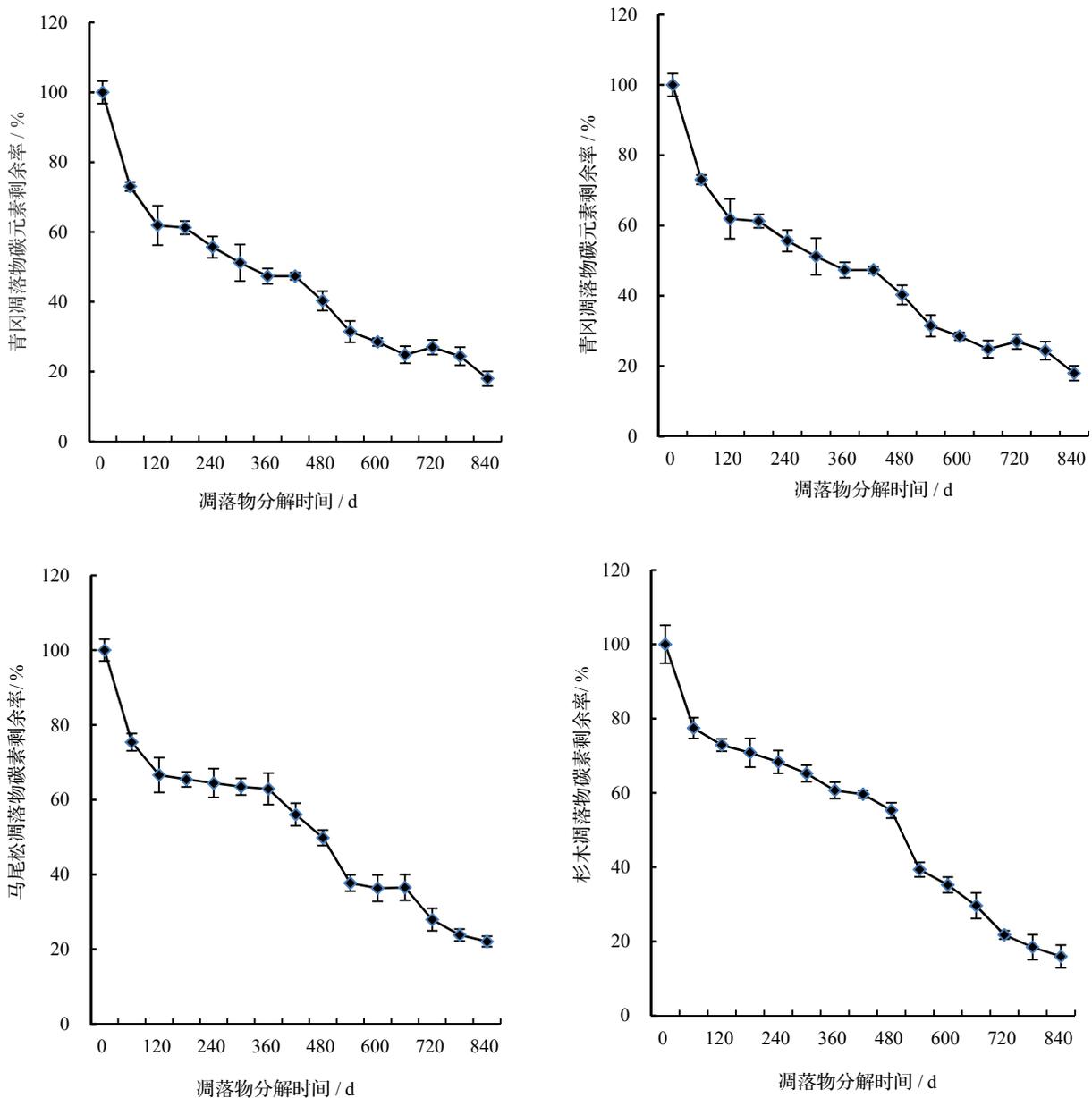


图3 凋落物分解过程中碳元素剩余率变化

Figure 3 Dynamics of carbon content in decomposing litter

3 结论与讨论

3.1 结论

4 个树种凋落物 95% 的分解时间均为 6 年左右, 阔叶树种略快于针叶树种。青冈凋落物分解速率最快, 出现了 3 个快速分解期; 木荷和马尾松凋落物分解速率次之, 呈现先快后慢的分解特性; 杉木凋落物分解速率最慢。在碳素动态方面, 木荷、青冈和马尾松的碳素均存在释放停滞期, 导致碳素含量呈现“W”型变化, 而杉木碳元素含量没有明显的释放停滞期, 碳元素含量阶梯式下降, 说明木荷、青冈和马尾松的碳素分解可能为淋溶-富集-释放模式, 杉木碳元素分解可能为淋溶-释放模式。

3.2 讨论

3.2.1 凋落物分解过程中分解速率的变化 凋落物的分解速率主要受到凋落物的理化性质和凋落物物种丰富度等内在因素的影响^[11], 和气候、土壤条件等外在因素的影响^[12]。本研究中, 阔叶树种青冈、木荷的分解系数为 0.50, 0.47, 而针叶树种马尾松和杉木的分解系数为 0.45 和 0.40, 这与目前普遍发现的阔叶林凋落物分解速率高于针叶林的结果一致^[13]。凋落物的碳氮磷浓度、木质素浓度、纤维素浓度、碳氮比和碳磷比等都是影响凋落物分解速率的重要化学因素^[14]。前人研究发现阔叶树凋落物的初始 N 含量较高, 可以促进微生物等分解者的繁殖, 从而加速分解^[15]。近年来开展的氮沉降对凋落物分解速率的研究也发现添加一定量外源氮也会促进凋落物的分解^[16]。Taylor 等^[17]研究发现, 在凋落物分解的前期, N 对凋落物分解速率起主导作用; 但是到了凋落物分解后期, 木质素浓度或木质素与 N 的比例起主导作用。而郭培培等对亚热带 6 种针叶和阔叶树种凋落物的研究发现, 针叶树种和阔叶树种凋落物 K 元素和木质素的初始含量亦是两者分解速率存在差异的重要因素。当木质素含量较高时, 木质素所起的作用在分解刚开始时就已显现^[9]。

前人研究发现凋落物分解前期速度较快, 后期变慢。这是因为凋落物分解前期是细菌利用易溶、易分解的物质进行快速碳循环途径, 分解后期是真菌利用难分解物质完成慢速碳循环途径^[18]。前期主要受到初始养分含量和水溶性碳化合物的影响, 后期主要受到顽固化合物木质素和纤维素含量的限制^[19]。本研究中 4 个树种凋落物的分解特性亦符合这一规律, 但是各树种的快速分解时间存在差异, 干物质剩余率随时间下降规律也不一致。木荷凋落物的快速分解期有 360 d (第一年 5 月至第二年 1 月), 马尾松和杉木均为 180 d (5-11 月), 青冈出现了 3 个快速分解期 (第一年 5-7 月, 第二年 5-9 月, 第三年 1-5 月), 可见凋落物快速分解时期均为环境水热条件较好的时段。这可能是青冈凋落物分解速率最快, 木荷其次, 马尾松和杉木最慢的原因, 即凋落物分解速率是受到凋落物自身理化性质和环境耦合作用影响的。

3.2.2 凋落物分解过程中碳元素变化 Raich 等估算, 全球每年凋落物分解释放的碳约占全球碳总流通量的 70%^[20], 可见凋落物碳素释放是生态系统碳循环的重要环节。凋落物中的碳素可通过 3 种途径向生态系统释放, 分别是: 矿化后向以 CO₂ 形式释放到大气中、通过该淋溶释放出可溶性碳 (DOC)、与土壤颗粒结合后转移^[21]。

本研究中 4 种凋落物碳素释放动态与干物质变化规律存在一定差异。木荷、青冈和马尾松凋落物碳素的含量变化为先下降后升高再下降再升高。其中木荷凋落物碳素有 2 个滞缓期, 分别为第一年 11 月至第二年 3 月, 和第三年 3-7 月, 碳素含量显著升高, 而这期间凋落物干物质仍继续分解; 青冈在第三年 3-7 月; 马尾松在第一年 9-11 月, 第二年 11 月至第三年 1 月, 均出现了这一现象。说明这 3 个树种的凋落物碳素释放很有可能是淋溶-富集-释放模式。在分解初期, 易溶解物质由于淋溶作用快速损失, 而富集可能是因为凋落物中碳素没有达到微生物分解的需求含量^[18], 亦可能是含碳量高的难分解物质的聚集^[22], 这需要进一步的试验进行验证。杉木的碳素含量一直下降, 且无明显的碳素释放停滞期, 说明其碳素释放为淋溶-释放模式。且碳素和干物质剩余曲线具有趋同效应, 这与前人的结果类似^[23-24]。凋落物的元素释放特性受温度、水分等环境条件、土壤动物和微生物群落、凋落物本身性质的综合影响, 本研究中环境、土壤条件基本一致, 因此木荷等与杉木碳素释放特性的差异很有可能与树种特性有关, 前人研究亦指出小尺度范围内, 凋落物本身特性是影响其分解速率和养分释放的最主要因素^[25]。但是本试验开展的研究还较为初步, 今后可进一步结合全球气候变化等深入开展不同树

种凋落物分解特性的探索。

参考文献:

- [1] 沈爱华. 基于多源数据的浙江省公益林生物量时空特征分析与遥感估算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [2] 曹菁. 宁波市生态公益林主要群落结构及物种多样性比较研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [3] 沈爱华, 袁位高, 张骏, 等. 浙江省生态公益林物种多样性时空格局研究[J]. 浙江林业科技, 2014, 34(01): 1-6.
- [4] 张华柳. 嵊州市公益林生态效益服务功能价值评价研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2011.
- [5] 余兵妹. 千岛湖生态公益林建设与保护对策[J]. 现代园艺, 2012(22): 172-174.
- [6] 陈美熹, 叶锦培, 周梓富, 等. 土贡种源 58 年生马尾松母树林种实性状变异研究[J]. 浙江林业科技, 2018, 38(5): 15-20.
- [7] 吴初平, 袁位高, 盛卫星, 等. 浙江省典型天然次生林主要树种空间分布格局及其关联性[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 537-549.
- [8] 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(21): 1-13.
- [9] 郭培培, 江洪, 余树全, 等. 亚热带 6 种针叶和阔叶树种凋落叶分解比较[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(5): 655-659.
- [10] OLSON J S. Energy storage and balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. Ecology, 1963, 44: 322-331.
- [11] ZHANG X H, WANG X W, PATRICK M. *et al.* Effects of litter mixtures on aerobic decomposition rate and its temperature sensitivity in a boreal peatland[J]. Geoderma, 2019, 354: 1-7.
- [12] MAO R, ZHANG X, SONG C, *et al.* Plant functional group controls litter decomposition rate and its temperature sensitivity: An incubation experiment on litters from a boreal peatland in northeast China[J]. Sci Tot Environ, 2018, 626: 678-683.
- [13] 任立宁, 刘世荣, 王一, 等. 毛竹和林地植被芒箕凋落物分解特征研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(5): 91-97.
- [14] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51.
- [15] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1203-1207.
- [16] 陈玥希, 陈蓓, 孙辉, 等. 川西高海拔增温和加氮对红杉凋落物有机组分释放的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1753-1760.
- [17] TAYLOR B R, PARKINSON D, PARSONS W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test[J]. Ecology, 1989, 70(1): 97-104.
- [18] PRESCOTT C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils?[J]. Biogeochemistry, 2010, 101(1-3): 133-149.
- [19] ZHANG X H, SUN X X, MAO R. Effects of Litter Evenness, Nitrogen Enrichment and Temperature on Short-Term Litter Decomposition in Freshwater Marshes of Northeast China[J]. Wetlands, 2017, 37(1): 145-152.
- [20] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B: Chem Phys Meteorol, 1992, 44(2): 81-99.
- [21] 王玉红. 黄土高原主要植物叶凋落物分解过程中碳流通研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [22] WANG X, XU Z, LÜ X T, *et al.* Responses of litter decomposition and nutrient release rate to water and nitrogen addition differed among three plant species dominated in a semi-arid grassland[J]. Plant Soil, 2017, 418(1-2): 241-253.
- [23] 刘文飞, 沈芳芳, 徐志鹏, 等. 氮沉降对杉木人工林凋落物分解过程中养分释放的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(4): 695-701.
- [24] 汪思龙, 陈楚莹. 森林残落物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [25] WANG X Y, CHEN X Y. Genotypic diversity of an invasive plant species promotes litter decomposition and associated processes[J]. Oecologia, 2014, 174(3): 993-1005.