

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.029.

高伟, 黄茂根, 黄雍容, 等. 亚热带3种森林凋落物量及碳氮归还动态变化[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 146-153.

GAO Wei, HUANG Maogen, HUANG Yongrong, et al. Dynamic Characteristics of Litterfall and Carbon and Nitrogen Return in Three Forest Types in Subtropical China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 146-153.

## 亚热带3种森林凋落物量及碳氮归还动态变化

高伟<sup>1,2,3</sup>, 黄茂根<sup>4</sup>, 黄雍容<sup>3</sup>, 吴兴盛<sup>4</sup>, 方栋龙<sup>1</sup>, 陈爱平<sup>5</sup>, 黄石德<sup>3</sup>

(1.福建林业职业技术学院 林学系, 福建 南平 353011; 2.福建林业职业技术学院  
森林生态与碳汇计量研究所, 福建 南平 353011; 3.福建省林业科学研究院, 福州 350012;  
4.福建省罗卜岩自然保护区, 福建 三明 365504; 5.官庄国有林场, 福建 三明 365504)

**摘要:** [目的] 探明亚热带不同森林类型的碳汇功能, 为森林经营和针叶林改造中的树种选择提供指导。 [方法] 基于月动态监测, 研究了罗卜岩自然保护区亚热带常绿阔叶林(米楮林)、常绿-落叶阔叶混交林(闽栎-闽楠林)和针叶林(马尾松林)3种森林类型的凋落物产量及碳氮归还动态变化。 [结果] (1) 3种林分中马尾松林的年总凋落量最高[9 815 kg/(hm<sup>2</sup>·a)], 其次为闽栎-闽楠林[9 207 kg/(hm<sup>2</sup>·a)], 米楮林最低[8 083 kg/(hm<sup>2</sup>·a)], 叶是闽栎-闽楠林和马尾松林凋落物的主要组分, 而米楮林凋落物以碎屑等其他组分为主; 3种森林的总凋落量、叶、花果和其他组分凋落量月动态均呈双峰型曲线, 峰值分别出现在11—12月和次年的4—5月。(2) 3种林分总凋落物碳归还量为马尾松林[4 970 kg/(hm<sup>2</sup>·a)] > 闽栎-闽楠林[4 458 kg/(hm<sup>2</sup>·a)] > 米楮林[3 804 kg/(hm<sup>2</sup>·a)], 总凋落物氮归还量为闽栎-闽楠林[160 kg/(hm<sup>2</sup>·a)] > 马尾松林[128 kg/(hm<sup>2</sup>·a)] > 米楮林[113 kg/(hm<sup>2</sup>·a)], 3种林分凋落物碳氮归还的月变化与其总凋落物量的月变化一致。(3) 3种林分的凋落物质量差异显著, 其中马尾松林的总凋落物碳氮比最高, 闽栎-闽楠林最低; 闽栎凋落物的木质素浓度最高, 米楮最低; 闽楠和马尾松凋落物的木质素/纤维素值最高, 米楮最低。 [结论] 闽栎-闽楠林具有更高的年凋落物量和较快的潜在分解速率, 可以更持续快速地为林地补充养分。

**关键词:** 亚热带; 森林类型; 凋落物量; 养分归还

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0146-08

## Dynamic Characteristics of Litterfall and Carbon and Nitrogen Return in Three Forest Types in Subtropical China

GAO Wei<sup>1,2,3</sup>, HUANG Maogen<sup>4</sup>, HUANG Yongrong<sup>3</sup>, WU Xingsheng<sup>4</sup>,  
FANG Donglong<sup>1</sup>, CHEN Aiping<sup>5</sup>, HUANG Shide<sup>3</sup>

(1. Department of Forestry, Fujian Forestry Vocational and Technical College, Nanping, Fujian 353011, China;  
2. Institute of Forest Ecology and Carbon Sequestration Measurement, Fujian Forestry Vocational and Technical College,  
Nanping, Fujian, 353011, China; 3. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, China; 4. Luobuyan Nature Reserve  
of Fujian Province, Sanming, Fujian 365504, China; 5. Guanzhuang State-Owned Forest Farm, Sanming, Fujian 365504, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to explore the carbon sink function of different forest types in subtropical China and better guide significance in tree species selection for forest management and coniferous forest transformation. [Methods] Based on monthly dynamic observation, the dynamic changes of litterfall and carbon (C) and nitrogen (N) return in three forest types including evergreen broad-leaved forest (the *Castanopsis carlesii* forest), evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest (the *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest) and coniferous forest (the *Pinus massoniana* forest) in Luobuyan Nature

收稿日期: 2022-06-14

修回日期: 2022-07-05

资助项目: 福建省林业科学研究项目(2023FKJ031); 福建省南平市自然科学基金(N2021J014); 福建林业职业技术学院科研创新团队研究项目(2021LK01); 福建林业职业技术学院博士科研启动基金

第一作者: 高伟(1985—), 男, 山东青岛人, 博士, 高级工程师, 主要从事森林生态系统碳氮循环研究。E-mail: gao01271@163.com

通信作者: 黄石德(1982—), 男, 福建仙游人, 博士, 高级工程师, 主要从事森林生态系统碳氮循环研究。E-mail: hsd9876@126.com

<http://stbcj.paperonice.org>

Reserve were studied from September 2018 to August 2019. [Results] (1) The annual litterfall was highest in *Pinus massoniana* forest [9 815 kg/(hm<sup>2</sup> · a)], followed by *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest [9 207 kg/(hm<sup>2</sup> · a)], and lowest in *Castanopsis carlesii* forest [8 083 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]. In terms of litter composition, the leaf litter of *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest and *Pinus massoniana* forest was relatively high, while other components such as debris in *Castanopsis carlesii* forest accounted for the highest, followed by leaf litter. The monthly dynamics of total litterfall, leaf litter, flower, fruit and other components of three forests all showed double peak curve, and the peak appeared from November to December and from April to May in the next year, respectively. (2) The range of litter C return was *Pinus massoniana* forest [4 970 kg/(hm<sup>2</sup> · a)] > *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest [4 458 kg/(hm<sup>2</sup> · a)] > *Castanopsis carlesii* forest [3 804 kg/(hm<sup>2</sup> · a)], and the range of litter N return was *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest [160 kg/(hm<sup>2</sup> · a)] > *Pinus massoniana* forest [128 kg/(hm<sup>2</sup> · a)] > *Castanopsis carlesii* forest [113 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]. The dynamic characteristics of litter C and N return of the three forests was consistent with that of total litterfall. (3) Significant differences were observed in litter quality among three forests, and the litter C : N ratio was highest in *Pinus massoniana* forest, and lowest in *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest, the litter lignin concentration was highest in *Betula fujianensis*, and the litter lignin: cellulose value was highest in *Phoebe bournei* and *Pinus massoniana*, and lowest in *Castanopsis carlesii*. [Conclusion] The *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest has higher annual litterfall and faster potential decomposition rate, which can supplement nutrients more continuously and quickly.

**Keywords:** subtropical China; forest types; litterfall; nutrient return

森林凋落物是土壤养分归还的主要形式<sup>[1-4]</sup>,其产量和养分归还速率直接影响着森林初级生产力<sup>[5-6]</sup>。研究表明,森林生态系统中90%以上的氮、磷和60%以上的其他元素均由植物到土壤的养分循环返回<sup>[7]</sup>。受气候和植被类型的影响,森林凋落物的凋落速率存在时空差异<sup>[8]</sup>,通常,凋落物产量随纬度增大而减少<sup>[9]</sup>,从全球范围看,森林凋落物的变化范围为3~11 Mg/(hm<sup>2</sup> · a)<sup>[10-13]</sup>。此外,不同森林类型的凋落物生产规律不同,在半落叶和落叶森林中常具有强烈的季节性,而在常绿森林中则全年相对稳定<sup>[14]</sup>。研究表明,凋落物量的季节变化影响了森林内部的养分周转、植物生长发育和土壤的养分库,并增加了区域尺度上的时空环境异质性,从而对生态系统的结构和功能产生多重潜在影响<sup>[15-16]</sup>。因此,了解森林凋落物的生产规律是准确理解森林生态系统能量流动和物质循环的重要基础和前提。

尽管凋落物产量是决定森林生态系统物质归还的主要因素之一<sup>[17]</sup>,但凋落物组分质量及其动态是影响物质循环效率的重要原因<sup>[18]</sup>。研究表明,秋季一般为落叶树种凋落叶高峰期<sup>[19]</sup>,夏季花果等繁殖器官凋落更多<sup>[20]</sup>,而冬季和春季则枝条凋落更为明显<sup>[21]</sup>。作为土壤有机碳归还的主要形式,凋落物数量和质量调控着土壤有机碳储量变化。通常,C/N比和木质素/N比

被认为是凋落物分解的最好指示物<sup>[22-23]</sup>,但有研究认为,植物残体的分解分为两个阶段,前期阶段主要受代谢产物控制,后期阶段主要受结构物质控制,如木质素/纤维素比<sup>[24]</sup>,而从结构物质角度指示凋落物分解的研究尚少见报道。此外,凋落物除为土壤提供碳输入外,也会引起激发效应,加快或减慢土壤老碳的分解,从而影响土壤有机碳的净积累速率<sup>[25]</sup>。因此,探明不同森林凋落物组分质量及动态,可以加深我们对森林土壤有机碳积累和全球森林碳循环的理解,为森林的碳汇潜力估算提供数据支持。

针对亚热带大面积种植针叶树种带来的地力衰退以及马尾松林普遍存在的病虫害问题,我国亚热带地区大力调整造林树种结构,提倡逐步采用阔叶树种替代马尾松林,但替代树种的合理性需要科学评价,森林类型转换对土壤碳氮过程的影响也应准确评估。凋落物作为联系地上与地下碳氮库的纽带,对探讨土壤微生物群落、土壤碳氮储量和土壤养分的可利用性等均有重要意义,然而亚热带大面积的针叶林改造尚处于初期阶段,针阔林转换后凋落物的产量和动态研究尚不全面,一定程度上限制了对森林转换后碳氮循环规律的理解。鉴于此,本研究选择三明萝卜岩自然保护区相同海拔高度和相近环境条件下的亚热带常绿阔叶林(米槠林:*Castanopsis carlesii* forest)、常绿-落叶阔叶混交林(闽桦-

闽楠林: *Betula fujianensis* and *Phoebe bournei* mixed forest) 和针叶林(马尾松林: *Pinus massoniana* forest) 3种森林类型为研究对象, 为排除人为干扰, 3种森林类型均为天然林, 研究不同林分的凋落物组成和碳氮归还的季节规律, 预测森林类型转换对生态系统碳氮转化过程的影响, 旨在为亚热带地区林分改造过程中的树种选择和生态系统管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省三明市罗卜岩省级自然保护区(117°34'15"—117°36'00"E, 26°25'45"—26°27'30"N), 森林覆盖率达97.8%, 属野生植物类型自然保护区。气候为中亚热带季风气候, 温和湿润, 年均气温19.5℃; 最冷月1月平均气温8.5℃左右, 极端最低气温-7.1℃; 7月平均气温28.4℃, 最高气温40.1℃; 年均降水量1688mm, 全年无霜期297d。基岩多为花岗岩, 土壤为红壤和黄红壤, 厚度多在80cm以上。保护区内植物区系以泛热带分布为主, 有种子植物127科, 340属, 595种, 其中珍稀濒危植物10种<sup>[26-27]</sup>。

### 1.2 样地选择

选择保护区内3种典型天然林分, 分别为季风常

绿阔叶林: 建群种为米槠 [*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hay.], 林下植被主要为米槠、山血丹 (*Ardisia lindleyana*)、茜草树 [*Aidia pycnantha* (Drake) Tirveng.], 鹿角杜鹃 (*Rhododendron latoucheae* Franch.)、狗脊蕨 [*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.], 流苏藤 (*Thysanosperrum diffusum* Champ.) 等。天然针叶林: 优势树种为马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.), 林下植被主要为乌饭 (*Vaccinium bracteatum* Thunb.)、青冈栎 [*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.], 栲树 (*Castanopsis fargesii* Franch.)、榿木 (*Loropetalum chinense*)、芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*)、狗脊蕨 (*Woodwardia japonica*) 等。落叶-常绿阔叶混交林: 优势树种为闽栎 (*Betula fujianensis*) 和闽楠 [*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang], 林下植被主要为细枝桉 (*Eurya loquaiana* Dunn)、闽粤栲 [*Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils.], 草珊瑚 [*Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai], 华南桂 (*Cinnamomum aus-trosinense* H. T. Chang)、瘤足蕨 (*Plagiogyria ad-nata*) 和菝葜 (*Smilax china* L.) 等<sup>[28]</sup>。将3种林分按优势树种分别命名为米槠林、马尾松林和闽栎-闽楠林。3种林分基本特征详见表1。

表1 3种天然林林分基本特征

森林类型	优势树种	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	郁闭度	海拔/m	坡向	坡度/(°)
米槠林	米槠、鹿角杜鹃	1700	>100	15.3	10.3	0.9	600	S	45
马尾松林	马尾松、榿木	2100	>100	11.6	13.3	0.7	600	S	35
闽栎-闽楠林	闽栎、闽楠	1100	>100	17.4	12.5	0.9	600	NE	35

### 1.3 野外调查

2018年8—9月开展样地调查, 在3种森林中分别随机设置4个20m×20m的样地, 并开展林分调查, 调查方法详见文献<sup>[25]</sup>。

### 1.4 凋落物收集

采用凋落物收集器研究3种森林类型的凋落物动态<sup>[2]</sup>。在林分调查的同时, 在每个样地中随机布设4个1m×1m的尼龙网收集器, 孔径为1mm, 离地高度50cm, 每种林分各16个凋落物收集器。2018年9月—2019年8月每月收集一次凋落物, 将收集的凋落物装进自封袋带回实验室, 按凋落枝、叶、花果、其他组分(碎屑和植物、昆虫残体等)进行分类称鲜重后放置烘箱内60℃下烘干至恒重, 获得其生物量, 并以此来计算各组分在凋落物总量中所占百分比。

### 1.5 养分测定

将烘干后的不同组分凋落物, 用植物样品粉碎机粉碎, 通过0.5mm筛, 采用元素分析仪(Vario III, Elemen-

tar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany)测定碳、氮元素含量。采用硫酸蒽酮比色法测定凋落物中的纤维素含量, 采用浓硫酸法测定木质素含量。

### 1.6 数据统计分析

每个样地月凋落量为4个收集框凋落物量换算后的平均值, 年凋落物量用收集的12个月凋落物量总和来表示。

养分归还量=凋落物量×凋落物养分含量

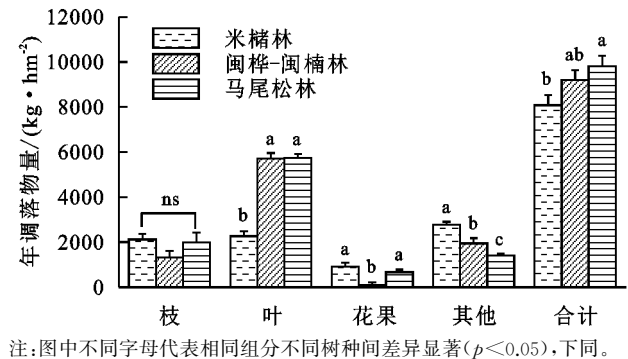
运用Excel 2003进行数据整理, 采用SPSS 18.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 在方差分析的基础上采用Duncan法检验不同森林类型凋落物产量、碳氮归还量和凋落物质量的差异性, 用Origin 8.5进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 凋落物数量、组成及动态变化

由图1可见, 马尾松林的年总凋落量[9815kg/(hm<sup>2</sup>·a)]显著高于米槠林[8083kg/(hm<sup>2</sup>·a)],

但二者均与闽桦-闽楠林[9 207 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]无显著差异。3 种森林枝凋落量无差异,米楮林的叶凋落量显著小于其他林分,但花果和其他组分最高,闽桦-闽楠林的花果凋落量最低。不同组分中,闽桦-闽楠林和马尾松林的凋落叶占比较高,分别为 62.0%,58.5%,而米楮林中其他组分占比最高,为 34.4%,其次为凋落叶,占比 28.0%。米楮林的其他组分凋落量分别与花果凋落量和总凋落量呈显著正相关性,闽桦-闽楠林和马尾松林的总凋落量和叶凋落量均呈显著正相关(表 2)。



注:图中不同字母代表相同组分不同树种间差异显著( $p<0.05$ ),下同。

图 1 3 种天然林年凋落物量及组成

表 2 不同组分凋落物量和碳氮归还量之间的相关性( $n=16$ )

森林类型	变量	枝凋落量	叶凋落量	花果凋落量	其他凋落量	总凋落量	总碳归还量
米楮林	叶凋落量	0.333					
	花果凋落量	−0.180	−0.326				
	其他凋落量	−0.023	−0.199	0.847**			
	总凋落量	0.448	0.508	0.520	0.692*		
	总碳归还量	0.492	0.539	0.481	0.653*	0.998**	
	总氮归还量	0.398	0.565	0.480	0.669*	0.995**	0.992**
闽桦-闽楠林	叶凋落量	0.132					
	花果凋落量	−0.340	0.335				
	其他凋落量	0.211	0.062	0.198			
	总凋落量	0.437	0.900**	0.279	0.404		
	总碳归还量	0.455	0.901**	0.257	0.390	0.999**	
	总氮归还量	0.355	0.911**	0.315	0.434	0.995**	0.992**
马尾松林	叶凋落量	0.120					
	花果凋落量	−0.108	−0.023				
	其他凋落量	0.081	0.139	−0.210			
	总凋落量	0.498	0.842**	0.174	0.359		
	总碳归还量	0.160	0.754**	0.139	0.569	0.834**	
	总氮归还量	0.062	0.730**	−0.012	0.647*	0.752**	0.978**

注:\*\*表示在 0.01 水平显著相关;\*表示在 0.05 水平显著相关。

3 种森林的总凋落量、叶、花果和其他组分凋落量均呈明显的双峰型曲线,峰值分别出现在 11—12 月和次年的 4—5 月(图 2B,C,D,E),米楮林、闽桦-闽楠林和马尾松林峰期凋落物量占年凋落物量的比例为 48.4%,56.9%,42.7%,但枝凋落量在一年中出现 3 次峰值,其中米楮林和马尾松林峰值分别出现在 10 月、次年 1 月和 4—5 月,闽桦-闽楠林峰值出现在 10 月、次年 3 月和 5 月(图 2A)。

2.2 碳氮年归还量及月动态

由图 3 可见,米楮林和马尾松林枝和花果凋落物碳归还量无显著差异,但均高于闽桦-闽楠林,闽桦-闽楠林和马尾松林的凋落叶碳归还量无显著差异,且均显著高于米楮林,3 种林分的其他组分凋落物碳氮归还量均为米楮林最高,马尾松林最低。总凋落物碳归还量为马尾松林[4 970 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]>闽桦-闽楠林[4 458 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]>米楮林[3 804 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]。3 种林分凋落枝氮归还量无显著差异,米楮林的花果氮归还量显著高于其他两种林分,而闽桦-闽楠林的凋落

叶氮归还量显著高于其他林分。3 种林分总凋落物氮归还量为闽桦-闽楠林[160 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]>马尾松林[128 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]>米楮林[113 kg/(hm<sup>2</sup> · a)]。米楮林的总碳氮归还量分别与总凋落量和其他组分凋落物量呈显著正相关,而闽桦-闽楠林和马尾松林的总碳氮归还量分别与总凋落量和叶凋落量呈显著正相关(表 2)。

由图 4 可见,3 种林分凋落物碳氮归还的月变化与其总凋落物量的月变化基本一致,均表现为双峰曲线,峰值分别出现在 11 月和次年的 4 月。米楮林、闽桦-闽楠林和马尾松林在 11 月和 4 月的凋落物碳归还量分别为 532,804,612 kg/(hm<sup>2</sup> · a)和 658,657,388 kg/(hm<sup>2</sup> · a),3 种林分峰期合计凋落物碳归还量占其年总凋落物碳归还量的比例分别为 32.3%,32.8%,25.5%。相应林分在 11 月和 4 月的凋落物氮归还量分别为 16.2,29.9,16.7 kg/(hm<sup>2</sup> · a)和 20.4,23.4,10.7 kg/(hm<sup>2</sup> · a),3 种林分峰期合计凋落物氮归还量占其年总凋落物氮归还量的比例分别为 32.4%,33.4%,27.1%。



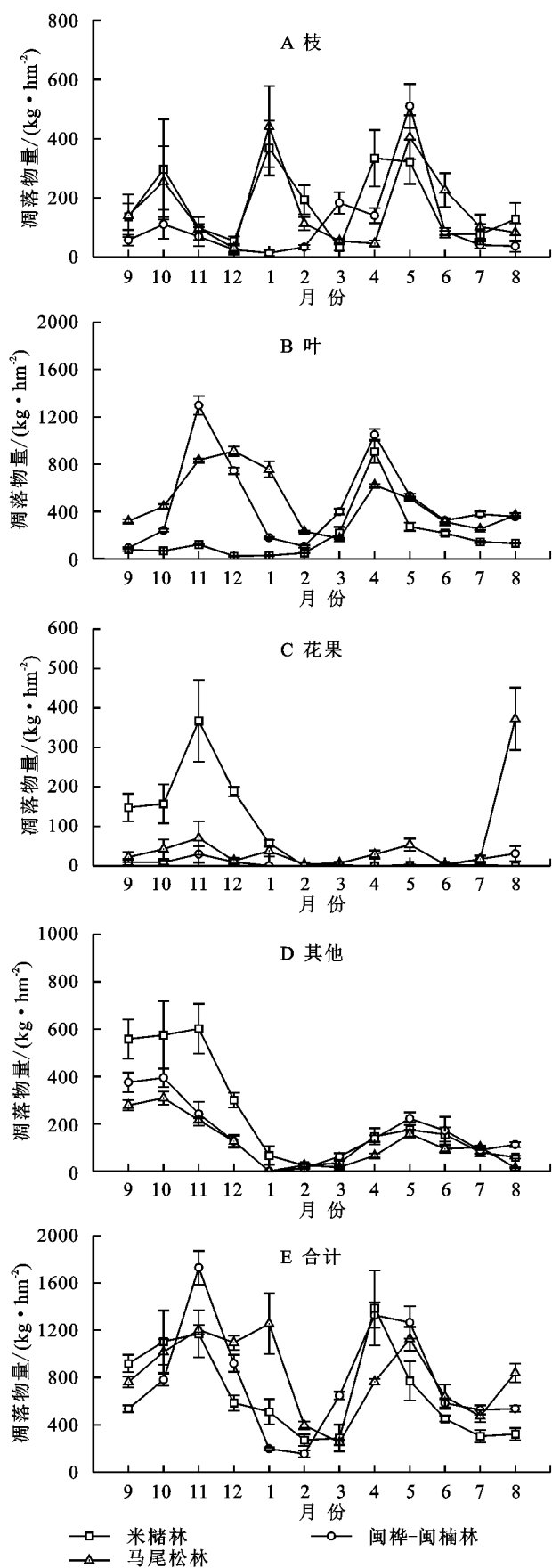


图2 3种天然林凋落物量的月动态变化

### 2.3 3种森林类型的凋落物质量

由图5可知,不同组分间马尾松林的凋落物碳氮比

均显著高于其他两种林分(枝除外),米楮林的其他组分凋落物碳氮比显著高于闽桫-闽楠林,但二者的花果、叶和枝凋落物碳氮比无显著差异。从3种林分的凋落物总体碳氮比来看,马尾松林的总凋落物碳氮比最高,其次为米楮林,闽桫-闽楠林最小,三者间差异显著。

由图6A可见,闽桫凋落物的木质素浓度最高,其次为马尾松和闽楠,米楮最低,且显著低于其他3个树种,凋落物纤维素浓度仍为闽桫最高,其次为马尾松和米楮,闽楠最低。相同树种的木质素和纤维素浓度表现不一,其中米楮和闽桫的木质素浓度均低于纤维素浓度,从而导致其凋落物木质素/纤维素值均较小,以米楮为最小(图6B),而马尾松和闽楠的凋落物木质素浓度均高于纤维素浓度,从而导致其凋落物木质素/纤维素值显著高于米楮和闽桫,以闽楠为最高(图6B)。

## 3 讨论

凋落物是森林生态系统的重要组成部分和功能的体现,其质量和数量极大地影响着森林生态系统中的养分循环、森林生长和生产力<sup>[29-30]</sup>。本研究中,在排除人为干扰,且海拔相同、环境条件相近的情况下,3种森林类型的凋落物量主要受植被类型的影响,其中马尾松林的年总凋落物量最高,其次为闽桫-闽楠林,米楮林最少。与不同地点、林龄和森林类型的年凋落物产量相比,本研究中米楮林的年凋落物量均高于同区域的米楮次生林、米楮人促更新次生林、米楮天然林和米楮人工林,马尾松林年凋落物量也均高于同区域的马尾松+拉氏栲混交林、马尾松+青栲混交林、马尾松+闽粤栲混交林、马尾松+格氏栲混交林、马尾松+苦楮混交林和马尾松纯林,此外,3种森林年凋落物量均高于贵州荔波的茂兰原始林和广西环江的桂北原始林和次生林(表3)。可见,本研究的3种森林类型具有更高的凋落物年产量,可为森林生态系统提供更多数量的养分输入。张远东等<sup>[1]</sup>研究表明,森林凋落物产量由林分密度和胸高断面共同决定,因此本研究中马尾松林和闽桫-闽楠林较高的凋落物产量可能分别与其较高的林分密度和胸高断面有关,但这两种因子具体如何影响了林分凋落物产量还需要进一步研究。

本研究中,3种森林类型总凋落物碳归还量为马尾松林>闽桫-闽楠林>米楮林,总凋落物氮归还量为闽桫-闽楠林>马尾松林>米楮林。研究表明,森林凋落物对土壤有机质和养分的补充作用除了与凋落物总量和养分归还总量有关外,还受凋落物的养分归还效率限制<sup>[1]</sup>。Gustafson<sup>[34]</sup>研究发现针叶分解过程中形成的酸性物质抑制了细菌活性,而阔叶凋落物含有大量的钙

能够起到中和作用,从而提高混合凋落物的分解速率,另外,高钙含量落叶还能吸引更多的土壤动物,从而加快分解。因此,营造针阔混交林可以提高凋落物的养分归还效率,对加快林地的养分补充具有重要意义。此外,凋落物碳氮比被认为是限制其分解的主要因子,凋落物的碳氮比越高,则分解越慢,对土壤有机

质和养分的补充作用也就越慢,反之则越快<sup>[22]</sup>。本研究中,马尾松林的总凋落物碳氮比最高,其次为米槠林,闽桫-闽楠林最小,三者间差异显著,这预示闽桫-闽楠林可能具有最快的凋落物分解速率,加之其较高的年凋落物量和氮素归还量,其对森林土壤有机质和氮素养分的补充作用可能更快。

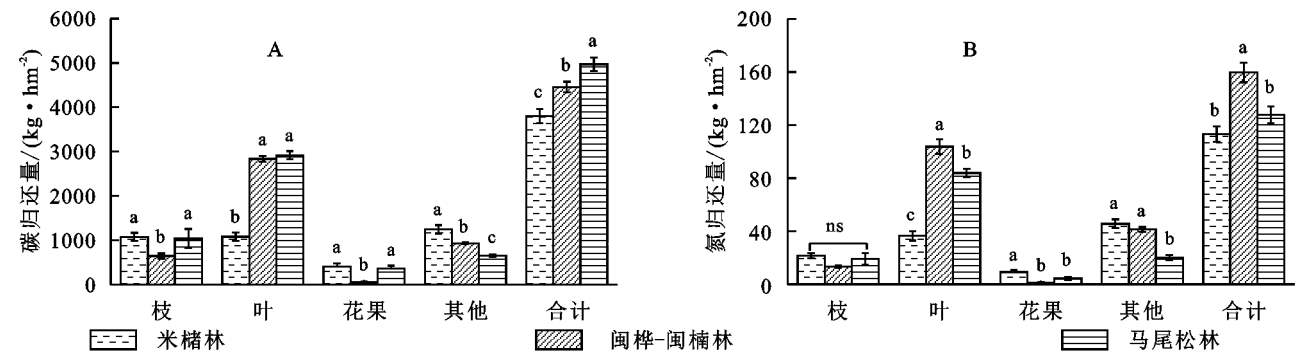


图 3 3 种天然林凋落物年碳氮归还量

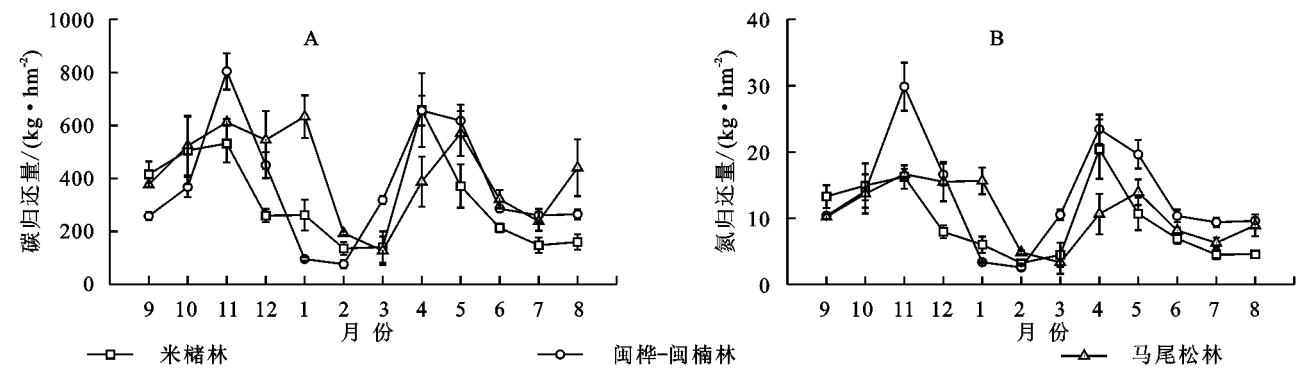


图 4 3 种天然林凋落物碳氮归还量的月变化

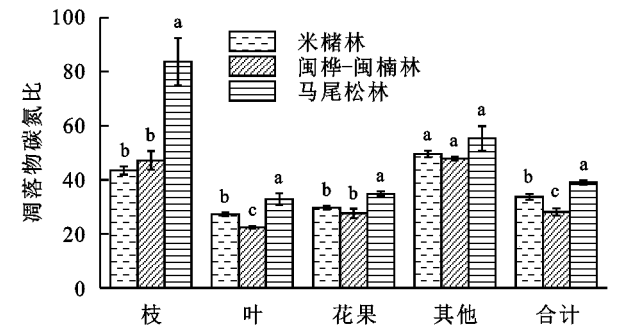


图 5 3 种天然林的凋落物碳氮比

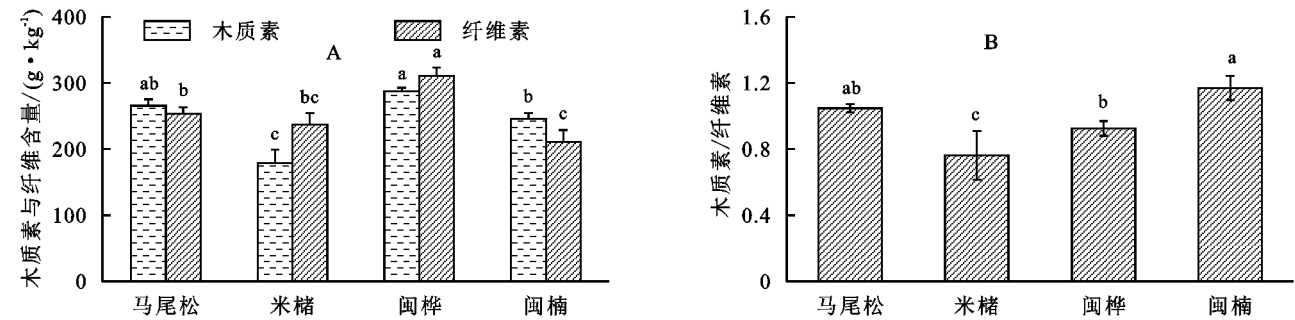
有研究认为,除碳氮比之外,凋落物中的木质素含量也是影响其分解速率和模式的重要因素<sup>[23]</sup>。Taylor 等<sup>[35]</sup>研究发现,凋落物分解前期主要受氮限制,后期受木质素浓度限制。Vitousek 等<sup>[24]</sup>则认为植物残体可以分为代谢物质和结构物质,前者易于快速分解,而后的分解速率可表达为木质素/纤维素的函数,比值越高分解越慢。本研究中,不同树种间闽桫凋落物的木质素浓度最高,其次为马尾松,米槠最低,而从木质素/纤维素值来看,闽楠和马尾松凋落物的木质素/纤维素值最高,其次为闽桫,米槠最低。可见,无论是依据凋落物的碳氮比、木质素浓度还是木质素/纤维素值,米槠林的凋

落物分解速率均较快,而闽桫凋落物分解后期可能受木质素浓度的限制。因此,本研究中米槠林的年凋落物中碎屑等其他组分占比最高,正可能与其较低的凋落物碳氮比和木质素/纤维素值和较高的凋落物分解速率有关。本区域的以往研究发现,3 种森林类型总凋落物现存量为马尾松天然林>闽桫-闽楠林>米槠天然林<sup>[28]</sup>。可见,虽然米槠林凋落物具有更快的分解速率,但与米槠林相比,闽桫-闽楠林在地被物层累积方面更具有优势,可以更持续且快速地为林地补充养分,从而对森林经营和马尾松林改造方面在树种选择上具有更好的理论指导意义。

已有研究表明,单一树种长期经营对土壤养分的利用和归还具有选择性,这将不可避免地造成林地土壤出现养分失衡、pH 值降低和阳离子交换量下降等极化现象,从而降低森林生态系统的稳定性<sup>[36]</sup>。因此,针对亚热带大面积种植针叶树种带来的地力衰退以及马尾松林普遍存在的病虫害问题,降低以马尾松为主的松树纯林比重,调整优化马尾松林分树种结构,营造针阔混交林,提高林分质量,构建健康、稳定、高效的森林生态系统,是当下林业可持续经营面临的

紧迫任务。但混交造林过程中树种是否具有和谐的种间关系需要进行科学评判,而种间凋落物混合分解是否受到促进或抑制是重要因素之一,如果混交树种的凋落物在分解上存在加和效应,则能促进彼此的分解,加快林地养分的补充和周转速率,但如果在凋落物混合分解中存在明显的非加和效应,甚至出现彼此

抑制,则必将妨碍凋落物向土壤的养分归还<sup>[36]</sup>。因此,本研究虽然得出闽桦和米槠凋落物可能存在较快的分解速率,其与马尾松混交造林后可以降低林地凋落物的碳氮比和木质素/纤维素值,但两树种凋落物与马尾松凋落物的混合分解是否存在加和效应或非加和效应还需要进一步研究。



注:图中不同字母代表同一树种不同指标间差异显著( $p<0.05$ )。

图 6 3 种天然林凋落物的木质素、纤维素含量及木质素/纤维素

表 3 不同地点、林龄和森林类型的年凋落物产量比较

地点	地理位置	林分类型	林龄/a	年凋落物量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	参考 文献
福建三明	117°36'E,26°19'12"N	米槠次生林	42	6980	[31]
福建三明	117°36'E,26°19'12"N	米槠人促更新次生林	41	6580	[31]
福建三明	117°28'E,26°11'N	米槠天然林	200	7630	[32]
福建三明	117°28'E,26°11'N	米槠人工林	50	5910	[32]
福建三明	117°32'18"E,26°9'55"N	马尾松+拉氏栲混交林	41	6149	[33]
福建三明	117°32'18"E,26°9'55"N	马尾松+青栲混交林	41	7533	[33]
福建三明	117°32'18"E,26°9'55"N	马尾松+闽粤栲混交林	41	6741	[33]
福建三明	117°32'18"E,26°9'55"N	马尾松+格氏栲混交林	41	7151	[33]
福建三明	117°32'18"E,26°9'55"N	马尾松+苦槠混交林	41	8041	[33]
福建三明	117°32'18"E,26°9'55"N	马尾松纯林	41	3442	[33]
贵州荔波	107°52'10"E,25°09'20"N	茂兰原始林(圆果化香+云贵鹅耳枥群落)	—	6900	[30]
广西环江	107°54'01"E,25°07'01"N	桂北原始林(圆果化香群落)	—	2353	[29]
广西环江	107°54'01"E,25°07'01"N	桂北原始林(大叶蚊母树群落)	—	4058	[29]
广西环江	107°54'01"E,25°07'01"N	桂北原始林(青檀群落)	—	1854	[29]
广西环江	108°18'56"E,24°43'58"N	桂北次生林(圆叶乌桕群落)	—	3189	[29]
广西环江	108°18'56"E,24°43'58"N	桂北次生林(八角枫群落)	—	3303	[29]
广西环江	108°18'56"E,24°43'58"N	桂北次生林(黄荆群落)	—	2486	[29]
福建三明	117°34'53"E,26°26'11"N	马尾松天然林	>100	9815	本研究
福建三明	117°34'53"E,26°26'11"N	闽桦-闽楠混交林	>100	9208	本研究
福建三明	117°34'53"E,26°26'11"N	米槠天然林	>100	8083	本研究

注:“—”代表文献中未发现此项指标。

4 结 论

(1) 马尾松林具有最高的年凋落物量,其次为闽桦-闽楠林,米槠林最低。叶是闽桦-闽楠林和马尾松林的主要凋落物组分,而米槠林凋落物以碎屑和其他组分为主。

(2) 马尾松林的碳归还量最高,闽桦-闽楠林的氮归还量最高,而米槠林的碳氮归还量均最低。

(3) 从凋落物质量上看,米槠林凋落物前期分解速率中等,后期分解较快,闽桦-闽楠林凋落物前期分解较快,后期分解速率中等,马尾松林凋落物分解均较慢。

参考文献:

[1] 张远东,刘彦春,顾峰雪,等.川西亚高山 5 种主要森林类型凋落物组成及动态[J].生态学报,2019,39(2):502-508.

[2] 林文泉,高伟,叶功富,等.南亚热带海岸沙地不同林分凋落物量及养分归还[J].森林与环境学报,2019,39(3):225-231.

[3] Yang W Q, Wang K Y, Kellomaeki S, et al. Litter dynamics of three subalpine forests in western Sichuan[J]. Pedosphere, 2005,15(5):653-659.

[4] Lin H, Hong T, Wu C Z, et al. Monthly variation in litterfall and the amount of nutrients in an *Aleurites montana* plantation[J]. Forest Ecosystems, 2012, 14

- (1):30-35.
- [5] Zhou L L, Shalom A D D, Wu P F, et al. Litterfall production and nutrient return in different-aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in South China [J]. Journal of Forestry Research, 2015,26(1):79-89.
- [6] Malhi Y, Doughty C, Galbraith D. The allocation of ecosystem net primary productivity in tropical forests[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2011,366(1582):3225-3245.
- [7] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology[M]. New York: Springer-Verlag, 2011.
- [8] Costa A N, Bartimachi A, Vasconcelos H L, et al. Annual litter production in a Brazilian Cerrado woodland savanna[J]. Southern Forests: A Journal of Forest Science, 2020,82(1):65-69.
- [9] 施昀希,黎建强,陈奇伯,等.滇中高原5种森林类型凋落物及营养元素储量研究[J].生态环境学报,2018,27(4):617-624.
- [10] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above-and belowground detritus of world forests[J]. Advances in Ecological Research, 1986,15:303-377.
- [11] Vernon M, Box E O, Richard T. World patterns and amounts of terrestrial plant litter production[J]. Bioscience, 1982,32(2):125-128.
- [12] Matthews E. Global litter production, pools, and turnover times: Estimates from measurement data and regression models [J]. Journal of Geophysical Research, 1997,102:18771-18800.
- [13] Lonsdale W M. Predicting the amount of litterfall in forests of the world[J]. Annals of Botany, 1988,61(3):319-324.
- [14] Haase R. Litterfall and nutrient return in seasonally flooded and non-flooded forest of the Pantanal, Mato Grosso, Brazil[J]. Forest Ecology & Management, 1999,117(1/3):129-147.
- [15] 付淑月,王天秀,张清月,等.刺槐林凋落物输入量变化对土壤有机碳的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2021,49(6):18-26.
- [16] 段斐,方江平,周晨霓.西藏原始暗针叶林凋落物有机碳释放特征与土壤有机碳库关系研究[J].水土保持学报,2020,34(3):349-355.
- [17] Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure[J]. Botanical Review, 1991,57:1-32.
- [18] Guo L B, Sims R E H. Litter production and nutrient return in New Zealand eucalypt short-rotation forests: implications for land management [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1999,73(1):93-100.
- [19] 费世民.火炬松人工林养分体内转移与内循环研究[J].林业科学,2001,37(3):14-19.
- [20] 刘蕾,申国珍,陈芳清,等.神农架海拔梯度上4种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态[J].生态学报,2012,32(7):2142-2149.
- [21] 春敏莉,谢宗强,赵常明,等.神农架巴山冷杉天然林凋落量及养分特征[J].植物生态学报,2009,33(3):492-498.
- [22] Elias M. Biological decomposition of some types of litter from north American forests[J]. Ecology, 1930,11(1):72-101.
- [23] Fogel R, Cromack K. Effect of habitat and substrate quality on Douglas-fir litter decomposition in western Oregon[J]. Canadian Journal of Botany, 1977,55:1632-1640.
- [24] Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, et al. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai'i: Patterns, Mechanisms, and Models[J]. Ecology, 1994,75(2):418-429.
- [25] Yue K, Peng C H, Yang W Q, et al. Study type and plant litter identity modulating the response of litter decomposition to warming, elevated CO<sub>2</sub>, and elevated O<sub>3</sub>: A meta-analysis [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015,120:441-451.
- [26] 高伟,黄雍容,林建丽,等.濒危树种闽桦天然林优势种群种间相关性[J].林业科学,2021,57(10):1-14.
- [27] 高伟,黄石德,林建丽,等.亚热带3种森林类型的群落特征与物种多样性的耦合关系[J].热带作物学报,2021,42(6):1756-1763.
- [28] 黄茂根.中亚热带3种森林类型凋落物现存量及碳氮储量[J].福建林业,2018(5):37-40.
- [29] 曾昭霞,刘孝利,宋希娟,等.桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落物储量及其降解[J].生态学杂志,2011,30(2):201-207.
- [30] 卢晓强,杨万霞,丁访军,等.茂兰喀斯特地区原始林凋落物量动态与养分归还[J].生态与农村环境学报,2014,30(5):614-619.
- [31] 魏翠翠,刘小飞,林成芳,等.凋落物输入改变对亚热带两种米槠次生林土壤酶活性的影响[J].植物生态学报,2018,42(6):692-702.
- [32] 吴君君,杨智杰,翁发进,等.米槠天然林和人工林土壤呼吸的比较研究[J].环境科学,2014,35(6):2426-2432.
- [33] 林德喜,樊后保.马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化[J].林业科学,2005,41(6):7-15.
- [34] Gustafson F G. Decomposition of the leaves of some forest trees under field conditions[J]. Plant Physiology, 1943,18:704-707.
- [35] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test[J]. Ecology, 1989,70:97-104.
- [36] 张晓曦,刘慧,王博雅,等.云杉与阔叶树种新鲜凋落叶混合分解特征[J].生态环境学报,2019,28(2):235-244.