



沿海拔梯度武夷山3种典型森林凋落物及养分归还动态

黄石德, 黄雍容, 高伟, 聂森, 蔡斌, 林捷

引用本文:

黄石德, 黄雍容, 高伟, 等. 沿海拔梯度武夷山3种典型森林凋落物及养分归还动态[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(4): 394–402.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4146>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

全球气候变化下贵州省青冈林的潜在生境动态

Dynamics of Potential Distribution of *Cyclobalanopsis* Forest in Guizhou Province of China under Global Climate Change

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 145–152 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4158>

二色仙人掌, 中国仙人掌科一新归化种

Opuntia cespitosa Rafinesque, A New Naturalized Species of Cactaceae from China

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 192–196 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4140>

3种四照花一年生播种苗生长规律初探

Annual Growth Rhythm of 1-year-old Seedlings of Three *Cornus* Species

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 367–374 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4166>

中国特有植物雪落樱桃潜在分布及其生态特征

Potential Distribution and Ecological Characteristic of Chinese Endemic Species *Cerasus xueluoensis*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 136–144 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4102>

沿海拔梯度武夷山 3 种典型森林凋落物及养分归还动态

黄石德^{1,2}, 黄雍容^{1,2}, 高伟^{1,2}, 聂森^{1,2}, 蔡斌², 林捷^{1,2}

(1. 福建省林业科学研究院, 福建省森林培育与林产品加工利用重点实验室, 福州 350012; 2. 福建武夷山森林生态系统国家定位研究站, 福建武夷山 354300)

摘要: 为了解武夷山森林凋落物量和养分归还特征, 对武夷山 3 个海拔典型森林的凋落物量和养分动态开展连续 3 年的监测。结果表明, 常绿阔叶林(645 m)、针阔混交林(1 028 m)和针叶林(1 442 m)的凋落物总量分别为 471.25、453.77 和 409.84 g/m², 森林凋落物总量随海拔升高呈减少的趋势。武夷山 3 种典型森林的凋落物总量具有明显的季节变化, 均呈双峰型, 但常绿阔叶林与针阔混交林和针叶林的凋落物总量峰值和次峰值出现时间近似相反。3 种典型森林凋落物中落叶占绝对优势(78.1%~87.6%), 落枝和其他组分较少。武夷山 3 种典型森林凋落物的养分年归还量均表现为 C>N>K>P, 且养分归还总量随海拔升高而减少。常绿阔叶林的凋落物量和养分归还量较高, 可能与环境条件和植被特征相关。这为中亚热带森林生态系统养分循环和森林碳循环机理研究提供了理论依据。

关键词: 海拔; 凋落物; 养分归还; 武夷山

doi: 10.11926/jtsb.4146

Dynamics of Litterfall and Nutrient Return in Three Typical Forests of Wuyi Mountain along Altitudinal Gradient

HUANG Shi-de^{1,2}, HUANG Yong-rong^{1,2}, GAO Wei^{1,2}, NIE Sen^{1,2}, CAI Bin², LIN Jie^{1,2}

(1. *Fujian Provincial Key Laboratory of Silviculture and Forest Product Processing and Utilization, Fujian Academy of Forestry Science, Fuzhou 350012, China*; 2. *Fujian Wuyishan Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Wuyishan 354300, Fujian, China*)

Abstract: To understand the characteristics of litterfall production and nutrient return in Wuyi Mountain forests, the litterfall production amount and nutrient return of three typical forests with different elevations were surveyed continuously for three years. The results showed that annual litterfall productions were 471.25, 453.77 and 409.84 g/m² in the evergreen broad-leaved forest (645 m), coniferous and broad-leaved mixed forest (1 028 m) and coniferous forest (1 442 m), respectively. Litterfall productions of three typical forests decreased along with the altitude. There were obvious seasonal changes in litterfall production of three typical forests with a bimodal pattern, which the occurrence time of peak and secondary peak in evergreen broad-leaved forest was approximately opposite to those in coniferous and broad-leaved mixed forest and coniferous forest. Among litterfalls, the leaves were dominant in three typical forests, accounting for 78.11%–87.55%, while twig and others were less. The total annual nutrient return from litterfall in three forests was C>N>K>P, and the total nutrient return was decreased along with the altitude. The amount of litterfall and nutrient return were high in the evergreen broad-leaved forest which might be related to environment conditions and vegetation traits. Therefore,

收稿日期: 2019-09-09 接受日期: 2019-12-28

基金项目: 福建省属公益类项目(2015R1011-4); 福建武夷山森林生态系统国家定位观测研究站运行项目(2018-LYPT-DW-050)资助

This work was supported by the Public Project of Fujian Province (Grant No. 2015R1011-4); and the Operation Project for Wuyishan Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station in Fujian (Grant No. 2018-LYPT-DW-050).

作者简介: 黄石德(1982~), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事森林生态系统研究。E-mail: hsd9876@126.com

these would provide the theoretical basis on researches in nutrient and carbon cycle in the subtropical forest ecosystem.

Key words: Altitude; Litterfall; Nutrient return; Wuyi Mountain

森林凋落物是植被向土壤转移碳和养分的主要途径,影响着森林生态系统碳和养分循环^[1-2]。随着大气中的二氧化碳和气候的持续变化,森林凋落物在全球碳循环中扮演着重要角色^[3-5]。另外,森林凋落物生产量和养分归还直接影响森林初级生产力。在一些森林生态系统中,有超过90%的氮和磷,以及超过60%的其他养分元素通过凋落物从植物归还到土壤^[2]。因此,关于森林凋落物量和养分归还的认识对更好地理解森林生态系统养分有效性和生产力非常重要。

森林凋落物作为可供微生物利用的基质,与土壤呼吸和有机碳密切相关,在森林生态系统中扮演着重要的角色^[6-7]。然而,森林生态系统的凋落物量数量和格局仍不明确,受到森林类型、群落组成、林龄、密度及土壤母质等诸多因素的影响^[8-10]。另外,在区域尺度上,纬度和海拔通过对降雨量和温度的改变进而影响森林凋落物生产量^[3,5,11-13]。

武夷山自然保护区拥有我国东南大陆现存面积最大、保留最完整的中亚热带常绿阔叶林森林生态系统,保护区内相对高差达1900 m,形成了明显的植被垂直带。上个世纪九十年代,许多学者对武夷山自然保护区内的甜槠林、杉木天然混交林及黄山松群落凋落物及养分动态开展了诸多研究^[14-16]。林益明等报道武夷山甜槠林群落的年凋落物量较低,

认为研究样地所处海拔较高导致的^[14]。然而,由于凋落物观测时间、收集频率、凋落物收集器的大小、数量和凋落物分类的差异^[5,17],有关凋落物随海拔高度的变化规律尚无一致结论。因此,本研究选择武夷山不同海拔梯度上常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林3种典型森林为研究对象,探讨凋落物生产量的年内和年际动态及其养分归还的特征,为深入了解中亚热带森林生态系统养分循环过程及森林碳循环机理提供理论依据。

1 研究区概况

研究地位于福建省西北部的武夷山国家级自然保护区(27°33'~27°54' N, 117°27'~117°51' E)内。该区属典型的中亚热带季风气候,年均气温12℃~18℃,年降雨量约2000 mm^[18],降雨多集中在3-8月。区内黄岗山为最高峰,海拔2160.8 m,植被垂直带谱分布完整,沿海拔从低到高依次分布着常绿阔叶林(200~1000 m)、针阔混交林(1000~1350 m)、针叶林(1350~1750 m)、亚高山矮林(1750~1900 m)和高山草甸(1900~2160.8 m)^[18]。本研究选择海拔645 m的常绿阔叶林、1028 m的针阔混交林和1442 m的针叶林作为试验样地。2014年每木检尺后记录林分密度、胸径、树高和建群种等群落结构指标(表1)。

表1 武夷山不同海拔梯度上3种典型森林群落立地情况

Table 1 Site characteristics of three typical forests along the altitudinal gradients

森林类型 Forest type	海拔(m) Altitude	坡度(°) Slope	密度 Density (indiv./hm ²)	胸径 DBH (cm)	树高 (m) Height	建群种 Constructive species
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	645	31	1 656	15.6	11.7	甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i> 米槠 <i>C. carlesii</i> 小叶赤楠 <i>Syzygium grijsii</i>
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	1 028	41	2 789	12.8	7.9	甜槠 <i>C. eyrei</i> 黄山松 <i>Pinus taiwanensis</i> 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>
针叶林 Coniferous forest	1 442	30	2 122	14.3	9.6	黄山松 <i>P. taiwanensis</i> 木姜子 <i>Litsea pungens</i>

2 研究方法

2.1 凋落物收集与处理

在不同海拔的典型森林分布区中,分别设置1

个30 m×30 m代表性固定样地,每个样地设置5 m×5 m网格状样方,共计36个。在每个样地内随机选取10个样方,每个样方内布设1个1 m×1 m的凋落物收集器,共计30个。收集器上的尼龙网孔径

为 0.5 mm, 距离地面 40~50 cm 水平置放。2016 年 1 月至 2018 年 12 月期间, 每月下旬收集凋落物收集器中的所有凋落物, 共收集 36 次。每个收集器内的凋落物分成 3 个组分: 落叶、落枝(<2.0 cm 的小枝和树皮)和其他(包括繁殖器官及其碎屑等), 于 65℃ 烘干至恒定后称量质量, 按组分每月将 10 个凋落物收集器中的样品按组分分别混合, 磨碎, 过 60 目筛后贮存于广口瓶中用于养分测定。凋落物年归还量通过凋落物月归还量累积获得。

2.2 凋落物养分的测定

用碳氮元素分析仪(EA3000, 意大利产)测定凋落物的碳、氮含量。采用 H₂O₂-H₂SO₄ 消煮法将样品消煮, 制备成磷、钾的待测液, 用钼锑抗比色法测定全磷含量, 火焰光度计法测定全钾含量^[12]。

2.3 数据统计分析

凋落物养分年归还量 [kg/(hm²·a)] 根据公式

$$L_N = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^3 L_{ij} N_{ij} / 1000$$

计算, 式中, L_{ij} 为第 i 月第 j 组分的凋落物量(kg/hm²); N_{ij} 为第 i 月第 j 组分的养分含量(g/kg)。

j 组分的凋落物量(kg/hm²); N_{ij} 为第 i 月第 j 组分的养分含量(g/kg)。

用 Excel 2010 绘制图表, 运用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和回归分析。采用双因素方差分析(Two-Way ANOVA)比较不同森林类型和年份对落叶、落枝和其他组分及总凋落物量的影响。采用单因素方差(One-Way ANOVA)分析比较不同年份及不同森林类型凋落物量及其各组分与养分年归还量间的差异, 以 $\alpha=0.05$ 表示差异显著。

3 结果和分析

3.1 凋落物总量及其组分的年际动态

武夷山不同海拔梯度上 3 种典型森林的年凋落物量随海拔升高呈逐渐降低的变化趋势(图 1)。海拔 645 m 的常绿阔叶林的年凋落物量最高[(471.25±16.19) g/m²], 其次为海拔 1 028 m 的针阔混交林 [(453.77±35.15) g/m²], 海拔 1 442 m 的针叶林最低 [(409.84±11.83) g/m²]。年份对不同森林的凋落物总量的影响显著($P=0.046$)(表 2)。研究期内不同森林类型凋落物总量的年际变化差异显著, 其中常绿阔

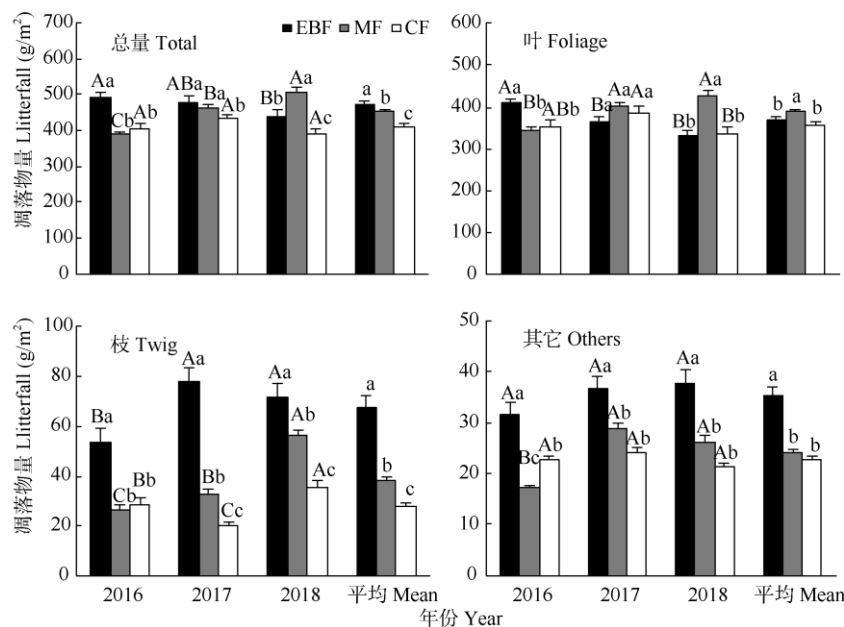


图 1 3 种森林类型的总凋落物量及其组分的年际变化。n=10; 柱上不同小写字母表示同一年份不同森林类型差异显著, 不同大写字母表示同一森林类型不同年份差异显著; EBF: 常绿阔叶林; MF: 针阔混交林; CF: 针叶林。以下图表同。

Fig. 1 Annual dynamics in total litterfall production and different components in three forest types. n=10. The different small letters indicate significant differences among different forest types in the same year, while the different capital letter indicates significant differences among different years in the same forest type. EBF: Evergreen broad-leaved forest; MF: Coniferous and broad-leaved forest; CF: Coniferous forest, respectively. The same is the following Figures and Tables.

表 2 森林类型和年份对凋落物总量及其组分的双因素方差分析

Table 2 Two-Way ANOVA for litterfall production and different components among forest types and years

	落叶 Foliage	落枝 Twig	其它 Others	总量 Total
森林类型 Forest type	0.005**	<0.001***	<0.001***	<0.001***
年份 Year	0.107	<0.001***	<0.001***	0.046*
森林类型 × 年份 Forest × Year	<0.001***	<0.001***	0.007**	0.179

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

叶林年凋落物总量呈逐年下降的趋势, 针阔混交林呈逐年上升趋势, 而针叶林无显著差异。森林类型与年份的交互作用对凋落物总量的影响极显著($P < 0.001$)。

3 种森林不同组分凋落物量均表现为落叶 > 落枝 > 其他组分(图 1), 3 种森林类型的凋落物均以落叶为主, 均占总凋落物量的 75% 以上。常绿阔叶林落叶最低(78.1%), 显著低于针阔混交林和针叶林。落枝在常绿阔叶林最大(占 14.4%), 显著高于针阔混交林和针叶林。其他组分也以常绿阔叶林最大(占 7.5%), 其次为针叶林和针阔混交林。从表 2 可见, 森林类型对凋落物中落叶、落枝与其他组分的影响均显著($P < 0.05$)。针阔混交林落叶显著高于常绿阔叶林和针叶林, 而常绿阔叶林落枝与其他组分均显著高于针阔混交林和针叶林($P < 0.05$)。此外, 年份对落叶无显著影响($P = 0.107$), 而对落枝与其它组分均有显著影响($P < 0.05$)。3 种森林类型落叶的年际变化与凋落物总量基本一致。除针阔混交林 2016 年其他组分显著低于其他年份外($P < 0.05$), 常绿阔叶林和针叶林其他组分在不同年份间均无显著差异($P > 0.05$)。

3.2 凋落物总量及组分的年内动态

3 种森林类型总凋落物量年内变化均表现为双峰曲线型(图 2)。常绿阔叶林总凋落物量最高峰出现在 5 月, 占全年总凋落物量的 16.5%, 而次高峰出现在 12 月, 占全年总凋落物量的 7.7%。与常绿阔叶林相反, 针阔混交林与针叶林总凋落物量最高峰出现在 11 月, 分别占全年总凋落物量的 15.8% 和 15.3%; 次高峰出现在 6 月, 分别占全年总凋落物

量的 10.6% 和 12.0%。常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林总凋落物的季节变化幅度(观测期间最大凋落物量与最小凋落物量之差除以月均凋落物量)分别为 202.4%、180.3% 和 192.5%。

3 种森林类型落叶的年内变化与总凋落物量变化基本一致, 均表现为双峰曲线型。常绿阔叶林落叶最高峰出现在 5 月(62.06 g/m²), 次高峰出现在 11 月(24.31 g/m²), 最高峰是次高峰的 2.55 倍。而针阔混交林与针叶林落叶最高峰出现在 11 月, 次高峰出现在 6 月。针阔混交林和针叶林落叶最高峰分别是次高峰的 1.71 和 1.45 倍。

与落叶的年内变化不同, 常绿阔叶林落枝出现了 3 个峰值, 分别是 2、5 和 12 月。针阔混交林和针叶林落枝的年内变化呈单峰曲线, 均出现在 5 月, 分别占全年总落枝的 20.2% 和 24.1%。

常绿阔叶林其他组分(包括繁殖器官及碎屑等)的年内变化呈双峰曲线, 最高峰出现在 5 月, 占全年的 14.57%, 次高峰出现在 12 月。针阔混交林和针叶林其他组分的年内变化呈不规则型, 最大值分别是 6 和 10 月。

3.3 凋落物的养分归还及组分特征

不同海拔梯度上 3 种典型森林养分归还总量随海拔升高而减少的变化趋势(表 3), 3 种典型森林凋落物中养分年归还量均表现为 C > N > K > P。凋落物中 C、N 年归还量均以常绿阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林; 而凋落物中 P 年归还量则以针叶林 > 针阔混交林 > 常绿阔叶林。凋落物中 K 年归还量以针阔混交林最高, 其次为针叶林和常绿阔叶林。

表 3 3 种典型森林凋落物中养分年归还量(g/m²)Table 3 Annual nutrient return (g/m²) of litterfall in three forest types

森林类型 Forest type	C	N	P	K	总量 Total
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	227.95 ± 14.55a	6.27 ± 0.48a	0.12 ± 0.01c	0.54 ± 0.04c	234.88 ± 15.09a
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	218.99 ± 29.35b	5.09 ± 0.65b	0.14 ± 0.01b	1.16 ± 0.12a	225.31 ± 30.13b
针叶林 Coniferous forest	203.14 ± 14.54c	5.01 ± 0.33b	0.21 ± 0.01a	0.93 ± 0.07b	209.29 ± 14.96c

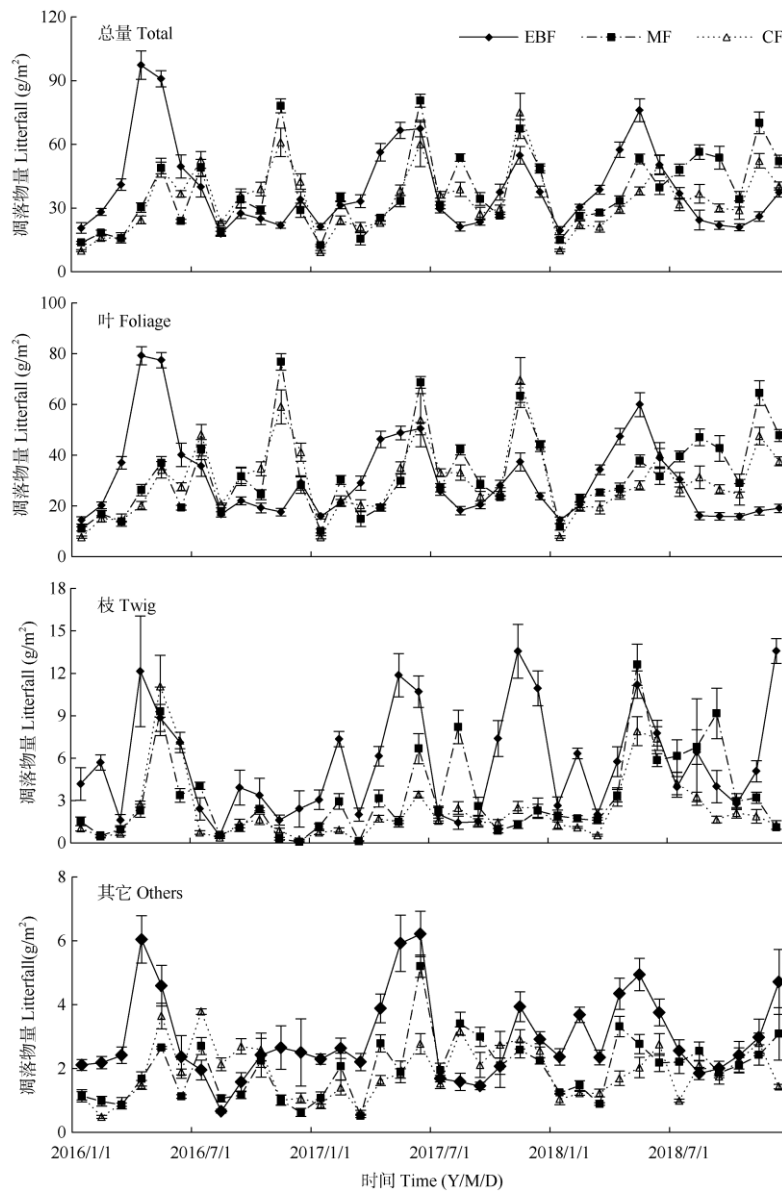


图 2 3 种森林类型总凋落物及其组分的月动态

Fig. 2 Monthly dynamic in total litterfall production and components in three forests

从图 3 可见, 3 种典型森林凋落物中落叶归还的营养占养分归还总量的 79.2%~94.8%。C、N 和 K 年归还量均表现为落叶 > 落枝 > 其他组分, 而 P 表现为落叶 > 其他组分 > 落枝。

4 结论和讨论

4.1 凋落物量及其组成的差异

本研究结果表明, 武夷山不同海拔梯度上 3 种典型森林的年凋落物量分别为 471.25、453.77 和 409.84 g/m²。有研究表明, 亚州地区亚热带森林年均凋落物量为 101~1 300 g/m²^[19], 热带森林为 873 g/m²,

温带森林为 378 g/m², 寒温带森林为 266 g/m²^[17], 本研究结果与其相符。武夷山的常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林凋落物量随海拔升高逐渐降低, 这也与前人研究结果^[13,20]相符。我国台湾常绿硬木林(海拔 782、1 066 和 2 098 m)^[21]、厄瓜多尔南部 3 个热带山地雨林(海拔 1 892、2 380 和 3 060 m)^[22]的凋落物量均随海拔的增加而减少。Zhou 等报道长白山的红松林凋落物量随海拔的增加而显著减少, 认为海拔梯度产生了不同的森林类型和环境条件^[10]。相反, 马来西亚的基纳巴卢山沉积岩的热带雨林(海拔 700、1 700、2 600 和 3 100 m)^[23]和我国神农架 4 种典型森林(海拔 780、1 670、1 970 和

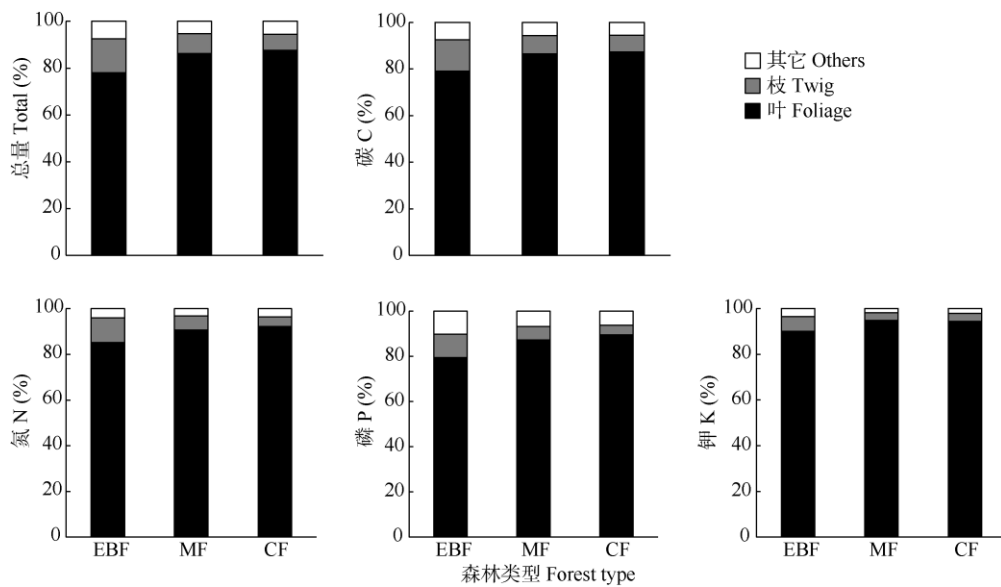


图3 3种森林类型凋落物组分的养分归还量占凋落物养分总归还量的比例

Fig. 3 Ratio of nutrient returns in litterfall components to total litterfall in three forests

2 570 m)^[12]的凋落物并没有随海拔产生显著变化,这可能是受森林生物学特性、气候因素及环境因素等多种因素共同作用的结果^[12]。另外,水热条件和植物生活型等因素将随海拔变化而发生改变,而这些因素可能影响森林的初级生产力和凋落物量^[21]。因此,凋落物量随海拔的变化格局需要更多的关注。

森林凋落物主要由落叶、落枝和其他组分(包括繁殖器官及碎屑等)组成,其中落叶占绝对优势。本研究中3种典型森林落叶占年凋落物量的78.1%~87.6%,其次是落枝,其他组分所占比例最小。这是由于叶片是树木生活史中最重要的器官,贯穿于树木整个生活史,而繁殖器官仅存在于开花结实期,存在时间短,具有较低的生物量^[24]。其中常绿阔叶林落叶占年凋落物量的78.11%,这与同一地区甜槠群落落叶凋落物占76.20%相近^[14],略高于哀牢山湿润常绿阔叶林(65.1%)^[25]、万木林保护区常绿阔叶林(64%~69%)^[26]和我国台湾中部的常绿硬木林(61%~67%)^[21],显著高于鼎湖山亚热带常绿阔叶林(50.99%)^[27]和雷州半岛的桉树人工林(47.86%~53.76%)^[28]。

4.2 凋落量年内动态变化

本研究中,落叶是凋落物量的主体,对3种典型森林凋落物量的贡献均超过了75%,3种典型森林凋落物量的月动态主要受控于落叶,这与郭婧

等^[9]的研究结果相似。森林凋落物量的月动态变化主要表现为单峰型、双峰型和不规则型,这主要受林分树种的生物学特性和气候因素的综合影响^[25,29],Röderstein等报道厄瓜多尔南部的热带山地雨林中落叶在旱季出现明显的峰值,可能是蒸发量高,气孔关闭,以及叶片过度和光抑制导致叶片衰老凋落导致的^[22]。本研究中,3种典型森林凋落物量均表现为双峰曲线,与前人^[12,25-26]的研究结果相符。常绿阔叶林凋落物峰值出现在5月,而次高峰出现在12月,这与中国西南部哀牢山常绿阔叶林凋落物的季节格局基本一致,其主峰值出现在4-5月的旱季末期,次峰值出现在10-11月的初冬,他们认为在旱季末期水压往往是最大的,这可能是促进老叶凋落的重要因素,而初冬出现的次峰值则被归因于强风、降雨的减少、低温以及一些落叶树种的物候规律而凋落^[25]。本研究中5月是全年降雨丰富的月份,使与干旱相关的解释得不到支持^[22],而可能是由于春季开始变暖,日照时间变长和土壤水分可用性增加使多数常绿阔叶林新叶大量萌发并旺盛生长,促进了衰老叶片的脱落,进而形成峰值^[26-27];而在冬季形成次峰值,可能是与该时期降雨量少、低温等环境胁迫等因素相关^[14]。相反,针阔混交林和针叶林的峰值出现在11月,次峰值出现在6月,可能是与群落中有黄山松等松属树种有关。有研究报道松树针叶凋落峰值多出现在秋季和冬季^[30-31],如中亚热带的马尾松林凋落物的峰值也出现在11月,

次峰值出现在 8 月^[32]; 韩国济州岛的黑松针叶凋落物峰值出现在 12 月, 12 月的降温可能触发了叶子的大量脱落^[33], 而次峰值出现在 6 月, 则可能与该阶段树木生长旺盛, 新陈代谢速率较快有关^[34]。

4.3 凋落物的养分归还

森林凋落物养分的归还是森林生态系统维持地力的主要途径^[35]。武夷山 3 种典型森林凋落物养分年归还量均表现为 $C > N > K > P$, 这与长白山、贡嘎山垂直带森林以及哀牢山湿润常绿阔叶林凋落物养分归还量的研究结果一致^[20,25,36]。本研究中 3 种典型群落森林凋落物养分归还量随海拔梯度的升高而降低, 这与神农架垂直植被养分归还量的变化趋势一致^[12]。本研究中常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林凋落物主要营养元素 N、P、K 年归还总量分别为 6.93、6.39 和 6.15 g/m^2 , 这与一般认为常绿阔叶林比针叶林有更高营养元素归还量的结论相吻合^[29,37]。本研究 3 种典型森林凋落物 N、P、K 年归还总量高于亚热带樟树-马尾松混交林(5.14 g/m^2)^[37]和杉木人工林(5.36 g/m^2)^[38], 但远低于哀牢山潮湿的常绿阔叶林(11.49 g/m^2)^[25]和鼎湖山常绿阔叶林(21.96 g/m^2)^[29], 这可能与树种组成、森林类型及气候等因素的差异有关。由于氮和磷作为亚热带大部分地区树木生长的养分限制因子, 通过凋落物回归对土壤养分特征有着重要的影响^[2]。本研究中常绿阔叶林凋落物 N 年归还量显著高于其余 2 个林分, 这可能与常绿阔叶林所处样地有最高的年均气温有关^[39]。Lu 等报道在我国台湾中部发现随着温度的升高, 凋落物氮浓度随之增加, 同时他们还认为树种组成、海拔、坡度和土壤的氮浓度可能也是影响凋落物氮年归还量的重要因素^[21]。本研究中常绿阔叶林磷的年归还量与同区域甜槠林的相近(0.14 g/m^2)^[4], 但显著低于针阔混交林和针叶林, 可能与树种组成、气候、植物叶片重吸收能力以及土壤肥力的不同有关^[25,40-41]。

综上所述, 武夷山海拔梯度上 3 种典型森林年凋落物为 409.84~471.25 g/m^2 , 且随海拔的升高呈现逐渐减少的趋势。武夷山 3 种典型森林凋落物年内变化均呈双峰型, 但常绿阔叶林与针阔混交林和针叶林峰值和次峰值出现的时间近似相反。此外, 凋落物养分年归还量也表现为随海拔升高而降低的趋势。可见, 常绿阔叶林有最高的凋落物量和养分归还量, 这可能与其所处的环境条件和植被特征

相关。因此, 有关亚热带地区不同森林群落凋落物、养分归还及其影响因素的研究应该被更多的关注。

参考文献

- [1] JIA B R, ZHOU G S, XU Z Z. Forest litterfall and its composition: A new data set of observational data from China [J]. *Ecology*, 2016, 97(5): 1365-1365. doi: 10.1890/15-1604.1.
- [2] 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]. *J For Res*, 2015, 26(1): 79-89. doi: 10.1007/s11676-014-0011-y.
- [3] LIU C J, ILVESNIEMI H, BERG B, et al. Aboveground litterfall in Eurasian forests [J]. *J For Res*, 2003, 14(1): 27-34. doi: 10.1007/bf02856758.
- [4] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993. doi: 10.1126/science.1201609.
- [5] JIA B R, ZHOU G S, LIU Y Z, et al. Spatial pattern and environmental controls of annual litterfall production in natural forest ecosystems in China [J]. *Sci Sin Vitae*, 2016, 46(11): 1304-1311. doi: 10.1360/N052015-00319.
贾丙瑞, 周广胜, 刘永志, 等. 中国天然林凋落物量的空间分布及其影响因子分析 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46(11): 1304-1311. doi: 10.1360/N052015-00319.
- [6] SAYER E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems [J]. *Biol Rev*, 2006, 81(1): 1-31. doi: 10.1017/S1464793105006846.
- [7] HANSEN K, VESTERDAL L, SCHMIDT I K, et al. Litterfall and nutrient return in five tree species in a common garden experiment [J]. *For Ecol Manag*, 2009, 257(10): 2133-2144. doi: 10.1016/j.foreco.2009.02.021.
- [8] ZHENG J X, XIONG D C, HUANG J X, et al. Litter production and nutrient return in 2 plantations of young and old *Cunninghamia lanceolata* [J]. *J Fujian Coll For*, 2013, 33(1): 18-24. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2013.01.004.
郑金兴, 熊德成, 黄锦学, 等. 中龄和老龄杉木人工林凋落物量及养分归还 [J]. *福建林学院学报*, 2013, 33(1): 18-24. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2013.01.004.
- [9] GUO J, YU L H, FANG X, et al. Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(14): 4668-4677. doi: 10.5846/stxb201312052896.
郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带 4 种森林凋落物量、组成、动态及其周转期 [J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4668-4677. doi: 10.5846/

- stxb201312052896.
- [10] ZHOU Y, SU J Q, JANSSENS I A, et al. Fine root and litterfall dynamics of three Korean pine (*Pinus koraiensis*) forests along an altitudinal gradient [J]. *Plant Soil*, 2014, 375(1/2): 19–32. doi: 10.1007/s11104-013-1816-8.
- [11] ZHOU G Y, GUAN L L, WEI X H, et al. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China [J]. *Plant Ecol*, 2007, 188(1): 77–89. doi: 10.1007/s11258-006-9149-9.
- [12] LIU L, SHEN G Z, CHEN F Q, et al. Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(7): 2142–2149. doi: 10.5846/stxb201111291822.
- 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. doi: 10.5846/stxb201111291822.
- [13] YOU C M, WU F Z, YANG W Q, et al. The national key forestry ecology project has changed the zonal pattern of forest litter production in China [J]. *For Ecol Manag*, 2017, 399: 37–46. doi: 10.1016/j.foreco.2017.05.019.
- [14] LIN Y M, HE J Y, YANG Z W, et al. The dynamics and production of litter falls of *Castanopsis eyrei* community in Wuyi Mountains [J]. *J Xiamen Univ (Nat Sci)*, 1999, 38(2): 280–286. doi: 10.3321/j.issn:0438-0479.1999.02.023.
- 林益明, 何建源, 杨志伟, 等. 武夷山甜槠群落凋落物的产量及其动态 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1999, 38(2): 280–286. doi: 10.3321/j.issn:0438-0479.1999.02.023.
- [15] CHEN J Y. Dynamic change of litter-fall of Chinese fir and its major associated tree species in natural mixed forest of Chinese fir [J]. *J Fujian Coll For*, 1998, 18(3): 255–259. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.1998.03.016.
- 陈金耀. 天然杉木混交林及主要伴生树种凋落物动态变化 [J]. *福建林学院学报*, 1998, 18(3): 255–259. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.1998.03.016.
- [16] LIN Y M, LI Z J, YANG Z W, et al. Accumulation and biological cycle of nitrogen and phosphorus in *Pinus taiwanensis* community in Wuyi Mountains [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 1997, 5(2): 26–32.
- 林益明, 李振基, 杨志伟, 等. 福建武夷山黄山松群落的氮、磷累积和循环 [J]. *热带亚热带植物学报*, 1997, 5(2): 26–32.
- [17] JIA B R, XU Z Z, ZHOU G S, et al. Statistical characteristics of forest litterfall in China [J]. *Sci China Life Sci*, 2018, 61(3): 358–360. doi: 10.1007/s11427-016-9143-x.
- [18] HE R, WANG J S, SHI Z, et al. Variations of soil microbial biomass across four different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(9): 5138–5144. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.09.065.
- 何容, 汪家社, 施政, 等. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化 [J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 5138–5144. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.09.065.
- [19] LIU C J, WESTMAN C, BERG B, et al. Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia [J]. *Glob Ecol Biogeogr*, 2004, 13(2): 105–114. doi: 10.1111/j.1466-882X.2004.00072.x.
- [20] LIU Y, HAN S J, LIN L. Dynamic characteristics of litterfalls in four forest types of Changbai Mountains, China [J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28(1): 7–11. doi: 10.3969/j.issn.1000-7377.2006.01.020.
- 刘颖, 韩士杰, 林鹿. 长白山四种森林类型凋落物动态特征 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 7–11. doi: 10.3969/j.issn.1000-7377.2006.01.020.
- [21] LU S W, LIU C P. Patterns of litterfall and nutrient return at different altitudes in evergreen hardwood forests of central Taiwan [J]. *Ann For Sci*, 2012, 69(8): 877–886. doi: 10.1007/s13595-012-0213-4.
- [22] RÖDERSTEIN M, HERTEL D, LEUSCHNER C. Above- and below-ground litter production in three tropical montane forests in southern Ecuador [J]. *J Trop Ecol*, 2005, 21(5): 483–492. doi: 10.1017/S026646740500249X.
- [23] KITAYAMA K, AIBA S I. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo [J]. *J Ecol*, 2002, 90(1): 37–51. doi: 10.1046/j.0022-0477.2001.00634.x.
- [24] WU Q Q, WANG C K, ZHANG Q Z. Inter- and intra-annual dynamics in litter production for six temperate forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(3): 760–769. doi: 10.5846/stxb201509091861.
- 武启睿, 王传宽, 张全智. 6种温带森林凋落量年际及年内动态 [J]. *生态学报*, 2017, 37(3): 760–769. doi: 10.5846/stxb201509091861.
- [25] LIU W Y, FOX J E D, XU Z F. Litterfall and nutrient dynamics in a montane moist evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains, SW China [J]. *Plant Ecol*, 2003, 164(2): 157–170. doi: 10.1023/a:1021201012950.
- [26] GUO J F, CHEN G S, QIAN W, et al. Litter production and nutrient return in two natural forests and a *Cunninghamia lanceolata* plantation in Wanmulin Nature Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(12): 4091–4098. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.12.023.
- 郭剑芬, 陈光水, 钱伟, 等. 万木林自然保护区2种天然林及杉木人工林凋落量及养分归还 [J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4091–4098. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.12.023.
- [27] GUAN L L, ZHOU G Y, ZHANG D Q, et al. Twenty years of litter fall

- dynamics in subtropical evergreen broad-leaved forests at the Dinghu-shan forest ecosystem research station [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, 28(4): 449–456. doi: 10.17521/cjpe.2004.0062.
- 官丽莉, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林凋落物量 20 年动态研究 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 449–456. doi: 10.17521/cjpe.2004.0062.
- [28] XU Y X, WANG Z C, ZHU W K, et al. Litterfall and nutrient cycling of *Eucalyptus* plantation with different ages on Leizhou Peninsula [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(4): 359–366. doi: 10.11926/jtsb.3986.
- 许宇星, 王志超, 竹万宽, 等. 雷州半岛桉树人工林凋落物量和养分循环研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(4): 359–366. doi: 10.11926/jtsb.3986.
- [29] WENG H, LI Z A, TU M Z, et al. The production and nutrient contents of litter in forests of Ding Hu Shan Mountain [J]. *Acta Phytoecol Geobot Sin*, 1993, 17(4): 299–304.
- 翁轰, 李志安, 屠梦照, 等. 鼎湖山森林凋落物量及营养元素含量研究 [J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(4): 299–304.
- [30] KIM C S, AN H C, CHO H S, et al. A comparison of litterfall dynamics in three coniferous plantations of identical age under similar site conditions [J]. *J Ecol Field Biol*, 2009, 32(2): 97–102. doi: 10.5141/JEFB.2009.32.2.097.
- [31] LIU C J, WESTMAN C J, ILVESNIEMI H. Matter and nutrient dynamics of pine (*Pinus tabulaeformis*) and oak (*Quercus variabilis*) litter in North China [J]. *Silv Fenn*, 2001, 35(1): 3–13. doi: 10.14214/sf.599.
- [32] XU W M, YAN W D, LI J B, et al. Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 33(23): 7570–7575. doi: 10.5846/stxb201102210194.
- 徐旺明, 闫文德, 李洁冰, 等. 亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 [J]. *生态学报*, 2011, 33(23): 7570–7575. doi: 10.5846/stxb201102210194.
- [33] AN J Y, HAN S H, YOUN W B, et al. Comparison of litterfall production in three forest types in Jeju Island, South Korea [J]. *J For Res*, 2020, 31: 945–952. doi: 10.1007/s11676-019-00929-6.
- [34] PAN H, HUANG S D, HONG W, et al. Litterfalls amounts and seasonal dynamics of carbon returns in three *Acacia* plantations [J]. *J Fujian Coll For*, 2010, 30(2): 104–108. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2010.02.003.
- 潘辉, 黄石德, 洪伟, 等. 3 种相思人工林凋落物量及其碳归还动态 [J]. *福建林学院学报*, 2010, 30(2): 104–108. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2010.02.003.
- [35] LIN R Y, CAI L P, HE Z M, et al. Nutrient dynamics of the litter in *Ormosia xylocarpa* plantation [J]. *J CS For Univ*, 2002, 22(2): 25–29. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2002.02.006.
- 林瑞余, 蔡丽平, 何宗明, 等. 木荚红豆人工林凋落物的养分动态特征 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2002, 22(2): 25–29. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2002.02.006.
- [36] LUO J, CHENG G W, CHEN B R, et al. Characteristic of forests litterfall along vertical spectrum on the Gongga Mountain [J]. *J Mount Sci*, 2003, 21(3): 287–292. doi: 10.3969/j.issn.1008-2786.2003.03.005.
- 罗辑, 程根伟, 陈斌如, 等. 贡嘎山垂直带林分凋落物及其理化特征 [J]. *山地学报*, 2003, 21(3): 287–292. doi: 10.3969/j.issn.1008-2786.2003.03.005.
- [37] LI Z W, YAN W D, ZHENG W, et al. Litter fall production and nutrient dynamic of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* mixed forests in subtropics China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(24): 7707–7714. doi: 10.5846/stxb201209201330.
- 李忠文, 闫文德, 郑威, 等. 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征 [J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7707–7714. doi: 10.5846/stxb201209201330.
- [38] YANG Y S, LIN P, GUO J F, et al. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, 23(7): 1278–1289. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2003.07.004.
- 杨玉盛, 林鹏, 郭剑芬, 等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解 [J]. *生态学报*, 2004, 23(7): 1278–1289. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2003.07.004.
- [39] HUANG S D, YE G F, LIN J, et al. Effects of drying-wetting cycles on soil organic carbon mineralization along an elevation gradient in Wuyi Mountain [J]. *Chin J Ecol*, 2018, 37(2): 312–321. doi: 10.13292/j.1000-4890.201802.009.
- 黄石德, 叶功富, 林捷, 等. 干湿交替对武夷山不同海拔土壤碳矿化的影响 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 312–321. doi: 10.13292/j.1000-4890.201802.009.
- [40] JIANG D L, XU X, RUAN H H. Review of nutrient resorption and its regulating in plants [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2017, 41(1): 183–188. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2017.01.028.
- 江大龙, 徐侠, 阮宏华. 植物养分重吸收及其影响研究进展 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(1): 183–188. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2017.01.028.
- [41] CAMPO J, GALLARDO J F, HERNÁNDEZ G. Leaf and litter nitrogen and phosphorus in three forests with low P supply [J]. *Eur J For Res*, 2014, 133: 121–129. doi: 10.1007/s10342-013-0748-4.