

DOI: 10.5846/stxb201803300661

管梦娣, 李君, 张广娜, 梅鹤平, 高远, 王欣丽, 闵现东, 赵淑娇, 王芸. 沂蒙山区不同森林类型凋落物量及其动态特征. 生态学报, 2018, 38(18):

Guan M D, Li J, Zhang G N, Mei H P, Gao Y, Wang X L, Min X D, Zhao S J, Wang Y. Dynamics of litterfall in different forest types in the Yimeng mountainous area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18):

沂蒙山区不同森林类型凋落物量及其动态特征

管梦娣¹, 李君¹, 张广娜², 梅鹤平³, 高远¹, 王欣丽¹, 闵现东³, 赵淑娇¹, 王芸^{1,*}

1 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 临沂 276605

2 临沂大学农林科学学院, 临沂 276605

3 山东费县塔山林场, 临沂 273421

摘要:凋落物在森林养分循环中起重要作用, 受森林类型、气候带等因素的影响。本文研究了沂蒙山区黑松 (*Pinus thunbergii* Parl.) 人工林、栓皮栎 (*Quercus variabilis* Bl.) 人工林和天然次生林的凋落物总量和组分的动态特征。天然次生林年凋落物总量 (3368 kg/hm²) 高于栓皮栎人工林 (3256 kg/hm²) 高于黑松人工林 (3212 kg/hm²), 森林类型间差异不显著。3 种森林类型的凋落物月总量呈双峰曲线, 最大峰值在 10—11 月, 次峰值在 4—5 月, 最小峰值出现时间不同: 黑松人工林为 12 月, 另两种森林类型为 7 月。针叶凋落量和比例、碎屑凋落量表现为黑松人工林高于天然次生林高于栓皮栎人工林, 而阔叶凋落量和比例、果凋落量的比例则相反。枝凋落量在森林类型间无显著差异。线性回归分析表明, 凋落物总量月动态受最低和最高气温的影响。针叶凋落量受最低气温、最高气温和最大降雨量影响; 阔叶凋落量受最低气温影响; 枝凋落量受降水量、风速和最大降水量影响; 果凋落量受气温、风速和降水量影响。结果阐明了暖温带森林类型对凋落物量及组分动态特征的影响, 可为其养分循环特征提供数据支撑。

关键词:暖温带; 天然次生林; 人工林; 凋落物量; 凋落物组分; 动态特征

Dynamics of litterfall in different forest types in the Yimeng mountainous area

GUAN Mengdi¹, LI Jun¹, ZHANG Guangna², MEI Heping³, GAO Yuan¹, WANG Xinli¹, MIN Xiandong³, ZHAO Shujiao¹, WANG Yun^{1,*}

1 Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276605, China

2 College of Agriculture and Forestry Science, Linyi University, Linyi 276605, China

3 Tashan Forest Farm in Fei County of Shandong Province, Linyi 273421 China

Abstract: Litter plays an important role as a metabolic product in nutrient cycling and energy transfer in forest ecosystems. Different forest types (e.g., broad-leaved vs. needle-leaved forests, and natural secondary forests vs. plantations) are characterized by different litterfall compositions and dynamics, which are associated with different plant community structure, climate zone, and microclimate. The Yimeng mountainous area is located in a warm-temperate zone and contains the earliest plantations in China. In addition to natural secondary forests, the main forest types in this area are plantations of the introduced needle-leaved species *Pinus thunbergii* Parl. and the native broad-leaved species *Quercus variabilis* Bl. In this study, we analyzed the composition and dynamics of litterfall in these three forest types. Seventeen plots were selected, including six plots in *P. thunbergii* plantation, six in natural secondary forest, and five in *Q. variabilis* plantation. In each

基金项目:国家自然科学基金青年项目 (41401329, 41301320 和 41501253); 山东省泰山学者项目 (ts201712071); 大学生创新创业项目 (201610452194)

收稿日期: 2018-03-30; 修订日期: 2018-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyunsd@163.com

plot, a 1 m × 1 m sieve was placed 30 cm above the ground for monthly litter collection from May 2015 through April 2017. The collected litter was transferred to the laboratory and sorted into needle leaf, broad leaf, fruit, and other litter, and then dried to a constant weight at 80°C. The results showed that natural secondary forests had a higher annual litterfall (3368 kg/hm²) than that of *Q. variabilis* plantation (3256 kg/hm²) and *P. thunbergii* plantations (3212 kg/hm²). However, there was no significant difference in annual litterfall among the three forest types. The monthly dynamics of overall litterfall in the three forest types all had a two-peak curve, with the higher peak occurring during October through November and the lower peak appearing during April through May. However, minimum litterfall occurred at different times in the different forests, namely, October through November in *P. thunbergii* plantations, and during July in the other two forest types. The curves of needle leaf, broad leaf, and branch litterfall were similar to that of overall litterfall. The branch litterfall changed smoothly, whereas fruit litterfall mainly appeared in August through September. Leaf litter was the largest component of litterfall, accounting for more than 65.9% of the total in all three forest types. The quantity and ratio of needle leaf litterfall, and quantity of other litter in *P. thunbergii* plantations were higher than those in *Q. variabilis* plantations, which in turn were higher than those in natural secondary forests. In contrast, the quantity and ratio of broad leaf litterfall showed the opposite trend. There was no significant difference in the quantity of branch litterfall among the forest types. Litterfall components were influenced by different environmental factors. Multiple linear regression analyses showed that monthly litterfall production was significantly negatively correlated with minimum air temperature and significantly positively correlated with maximum air temperature. Needle leaf litter production was significantly influenced by both minimum and maximum air temperature and maximum precipitation; broad leaf litter production was significantly influenced by minimum air temperature; branch litter production was significantly influenced by precipitation, maximum precipitation, and wind speed; and fruit litter production was significantly influenced by air temperature, wind speed, and precipitation. Natural secondary forests had the largest litterfall, which is beneficial in terms of nutrient cycling and soil fertility. Therefore, protecting natural secondary forests from disturbance in the Yimeng mountainous area is important for the enhancement of carbon sequestration and nutrient cycling, and the maintenance of soil fertility.

Key Words: warm temperate zone; natural secondary forest; plantation; litterfall; litter fall composition; dynamics

作为森林生态系统的重要组成部分,凋落物是系统中物质循环和能量流动的一个主要环节^[1]。研究不同森林恢复方式下调落物总量及其组分的动态特征对于阐明其碳储量和养分循环特征具有重要作用。

森林类型是影响凋落物总量的重要因素。阔叶林的凋落物总量显著高于针叶林^[2-4],或无显著差异^[5-6]。天然次生林和人工林凋落物的相对大小随人工林优势树种的组成而不同^[7-9]。凋落物总量动态特征随森林类型而变化,或呈单峰模型^[2,4],或呈双峰模型^[2,4,10],或呈不规则型^[11-12]。峰值出现的时间,相对大小也存在不同的观点^[2,4,10]。不同森林类型间凋落物各组分的量也有不同^[2-4],峰型、出现峰值的时间,相对大小存在显著差异^[2,4,10]。凋落物量及其组分主要受温度、降水和风速的影响^[3,12-13],随森林类型和气候带而变化,并且存在不同观点。随着全球变暖和降水格局的变化,凋落物产量及其组分将会发生变化,研究气象因子和凋落物的关系,有助于预测气候变化背景下调落物变化特征,乃至为生态系统服务功能价值评估提供理论依据。

总之,森林类型对凋落物量、组分及其动态特征的影响还存在争议,凋落物与气象因子的关系也存在争议。我们的科学问题是:自然恢复的天然次生林和人工恢复的人工林,以及本地阔叶树种人工林和引进针叶树种人工林的凋落物量、组成和动态特征存在什么差异?凋落物量及其组分与气象因子的关系是什么?沂蒙山区是中国最早开展人工造林的地区之一,本文以沂蒙山区3种典型森林类型(引进针叶树种黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)人工林、自然恢复的天然次生林和本地阔叶树种栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)人工林为研究对象),研究了其凋落物总量和组分的动态特征,分析了与气象因子的关系,以期阐明森林类型对凋落物量及组分的影响。

1 材料与方法

1.1 样地概况与样品采集

实验在中国山东费县塔山国家森林公园(35°10′—36°00′ N, 117°35′—118°20′ E)开展。属暖温带大陆性季风气候,年均温为 14℃,年降水量为 880 mm。选取土地利用历史相似、林龄约为 40 年的黑松人工林、天然次生林和栓皮栎人工林。其中,天然次生林的优势树种为麻栎(*Q. acutissima* Carruth.)、黑松、赤松(*P. densiflora* Sieb. et Zucc.)和栓皮栎,其累积优势度达 85.9%。共选择 17 个样地,其中,黑松人工林 6 个,天然次生林 6 个,栓皮栎人工林 5 个。每个样地都放置一个大小为 1 m×1 m,网孔为 1 mm 的筛子,离地约 30 cm,用来收集凋落物。于 2015 年 5 月至 2017 年 5 月放置筛子,每月收集凋落物一次。将凋落物全部带回实验室,分为针叶、阔叶、枝、果实以及碎屑,于 80℃ 烘干至恒重称量。

1.2 数据处理

数据采用单因素方差分析进行,利用 SPSS 16.0 统计软件实现。具体步骤如下:(1)采用 Shapiro-Wilk 进行数据正态性检验;(2)当数据正态或经过数据转换后正态,采用单因素方差分析,比较不同森林类型间凋落量和组分的差异性,多重比较距离采用 Turkey 距离(方差齐性)或 Dunnett 距离(方差不齐);(3)当数据转换后也不正态,采用非参数检验。 $P < 0.05$ 为差异显著。采用 Sigmaplot 软件作图。

获取同期气象数据(<https://rp5.ru>)。以气象因子平均气温 T (℃)、最低温度 T_{\min} (℃)、最高气温 T_{\max} (℃)、风速 V (m/s)、最大风速 V_{\max} (m/s)、降水总量 R (mm)、最大降水量 R_{\max} (mm) 为自变量,以凋落物量 (kg/hm^2) 和凋落物量百分比 (%) 为因变量进行多元线性回归分析。回归分析采用向后筛选的方法筛选显著影响凋落物量和比例的气象因子。

2 结果与分析

2.1 凋落物总量

2015 年黑松人工林、天然次生林和栓皮栎人工林 3 种森林类型的凋落物总量分别是 (3212 ± 246) kg/hm^2 (Mean±SE,下同), (3368 ± 314) kg/hm^2 、(3256 ± 325) kg/hm^2 , 森林类型之间凋落物总量无显著差异 ($F = 0.082$, $P = 0.921$)。2016 年 3 种森林类型的凋落物总量为 (3295 ± 346) kg/hm^2 、(4290 ± 281) kg/hm^2 和 (3838 ± 516) kg/hm^2 , 森林类型之间凋落物总量无显著差异 ($F = 2.236$, $P = 0.144$)。

2.2 凋落物总量月变化

凋落物总量月变化为双峰曲线,最大峰值出现在 10—11 月,次峰值出现在 4—5 月,3 种森林类型月变化曲线整体一致(图 1)。3 种森林类型的凋落物量最大值都出现在 11 月,但最小值出现的时间不同,黑松人工林在 12 月,天然次生林和栓皮栎人工林在 7 月。在 2015 年 12 月和 2016 年 9 月,凋落物总量都为栓皮栎人工林>天然次生林>黑松人工林,栓皮栎人工林显著高于黑松人工林($P < 0.05$)。在 2015 年和 2016 年的其余月份,3 种森林类型月凋落物量无显著差异(图 1, $P > 0.05$)。

2.3 凋落物组分月变化

针叶凋落量为双峰型,峰值出现在 10—11 月和 4—5 月(图 2)。在两年的大部分月份(2015 年的 5—10 月,2016 年的 1、2、4 和 5—11 月,以及 2017 年 1—3 月),针叶凋落量都呈以下规律,黑松人工林高于天然

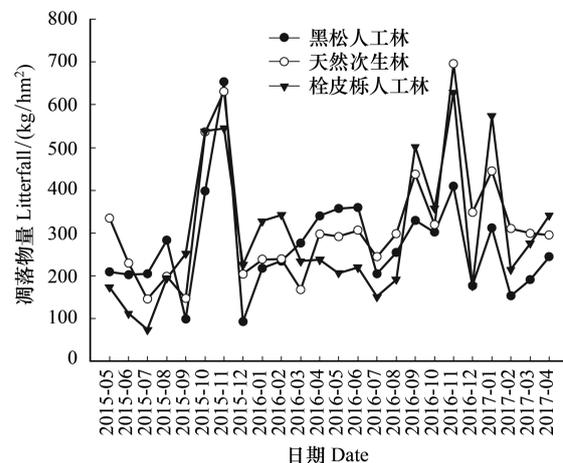


图 1 凋落物总量月份动态特征

Fig.1 Monthly dynamics of overall litterfall

次生林高于栓皮栎人工林,黑松人工林和栓皮栎人工林差异显著($P>0.05$,图2)。其余月份3种森林类型间的针叶凋落量差异不显著($P>0.05$)。黑松人工林针叶凋落量的比例(64.7%)显著高于天然次生林(27.4%)高于栓皮栎人工林(12.2%)。

阔叶凋落物组分曲线为双峰型,峰值出现在9—11月和1—3月(图2)。两年的大部分月份(2015年6、10—12月、2016年3—12月和2017年1—4月)栓皮栎人工林和天然次生林的阔叶凋落量显著高于黑松人工林。在其余月份,3种森林类型间的阔叶凋落量差异不显著(图2, $P>0.05$)。栓皮栎人工林的阔叶凋落量比例(53.6%)显著高于天然次生林(40.3%)高于黑松人工林(9.2%)。3种森林类型叶凋落量比例均达到65.9%以上,森林类型间无显著差异。

枝凋落物组分为双峰型,最大峰和次峰峰值出现在10—11月和5—6月(图2)。除2016年4月、2017年4月和2017年1月外,在两年的其余19个月份,森林类型间的枝凋落量差异不显著(图2, $P>0.05$)。栓皮栎人工林枝凋落量的比例(6.0%)高于天然次生林(4.8%)高于黑松人工林(3.7%),栓皮栎人工林和黑松人工林差异显著。

果凋落物组分曲线为双峰型,峰值出现在8—10月(图2)。2015年8月和2016年9月,果凋落物组分都表现为栓皮栎人工林高于天然次生林和黑松人工林,栓皮栎人工林显著高于黑松人工林。在2015年5月到2017年4月的其余月份,3种森林类型间的果凋落量差异不显著(图2, $P>0.05$)。栓皮栎人工林果凋落量的比例为12.0%,显著高于天然次生林(5.5%)和黑松人工林(1.2%)。

碎屑凋落物组分曲线为双峰型,峰值出现在6—7月和8—9月(图2)。碎屑凋落物整体的规律为黑松人工林高于天然次生林高于栓皮栎人工林,在2015年7月、8月、9月、11月、12月、2016年8月、9月、11月黑松人工林显著高于栓皮栎人工林。在2015年6月和2016年11月栓皮栎人工林高于天然次生林高于黑松人工林,栓皮栎人工林显著高于黑松人工林。在其余月份,3种森林类型间的碎屑凋落量差异不显著(图2, $P>0.05$)。3种森林类型的碎屑比例无显著差异。

2.4 凋落物组分与气象因子之间的关系分析

回归分析表明,月凋落物量受最低气温和最高气温的显著影响,与最低气温呈负相关,与最高气温呈正相关,两者解释月凋落物量变异的22.1%($F=4.26, P=0.028$,表1)。针叶凋落量受最低气温、最高气温和最大降雨量的显著影响,与最低气温负相关,与最高气温和最大降雨量正相关,三者解释针叶凋落量变异的29.8%($F=4.26, P=0.018$)。阔叶凋落量受最低气温的显著影响,最低气温可解释其40.9%的变异($F=16.9, P=4.56\times 10^{-4}$)。枝凋落量受降水量、风速和最大降水量的显著影响,与降水量和风速呈正相关,与最大降水量呈负相关,有40.0%的变异可以被这3个变量解释($F=6.11, P=0.004$)。果凋落量受气温、风速和降水量的显著影响,与气温呈正相关,与风速和降水量呈负相关,有62.6%的变异可以被这3个变量解释($F=13.84, P=4.10\times 10^{-5}$,表1)。

表1 月凋落物量与气象因子之间的回归分析

Table 1 Regression analysis between monthly litterfall and meteorological factors

因变量 Dependent	回归方程 Regression equation	R^2	F	P
总凋落物量 Litterfall	$Litterfall_{total} = -7.98 - 1.69T_{min} + 1.77T_{max}$	0.221	4.26	0.028
针叶凋落量 Needle-leaf litterfall	$Litterfall_{needleleaf} = -7.21 - 0.656T_{min} + 0.687T_{max} + 0.133R_{max}$	0.298	4.26	0.018
阔叶凋落量 Broad-leaf litterfall	$Litterfall_{broadleaf} = -14.6 - 0.651T_{min}$	0.409	16.9	4.56×10^{-4}
枝凋落量 Branch litterfall	$Litterfall_{branch} = -2.50 + 0.554V + 0.018R - 0.048R_{max}$	0.400	6.11	0.004
果凋落量 Fruit litterfall	$Litterfall_{fruit} = 7.56 + 0.200T - 5.05V - 0.012R$	0.626	13.8	4.10×10^{-5}

T_{min} :最低气温, minimum air temperature; T_{max} :最高气温, maximum air temperature; R :降水量, precipitation; R_{max} :最大降水量, maximum precipitation; V :风速, wind speed

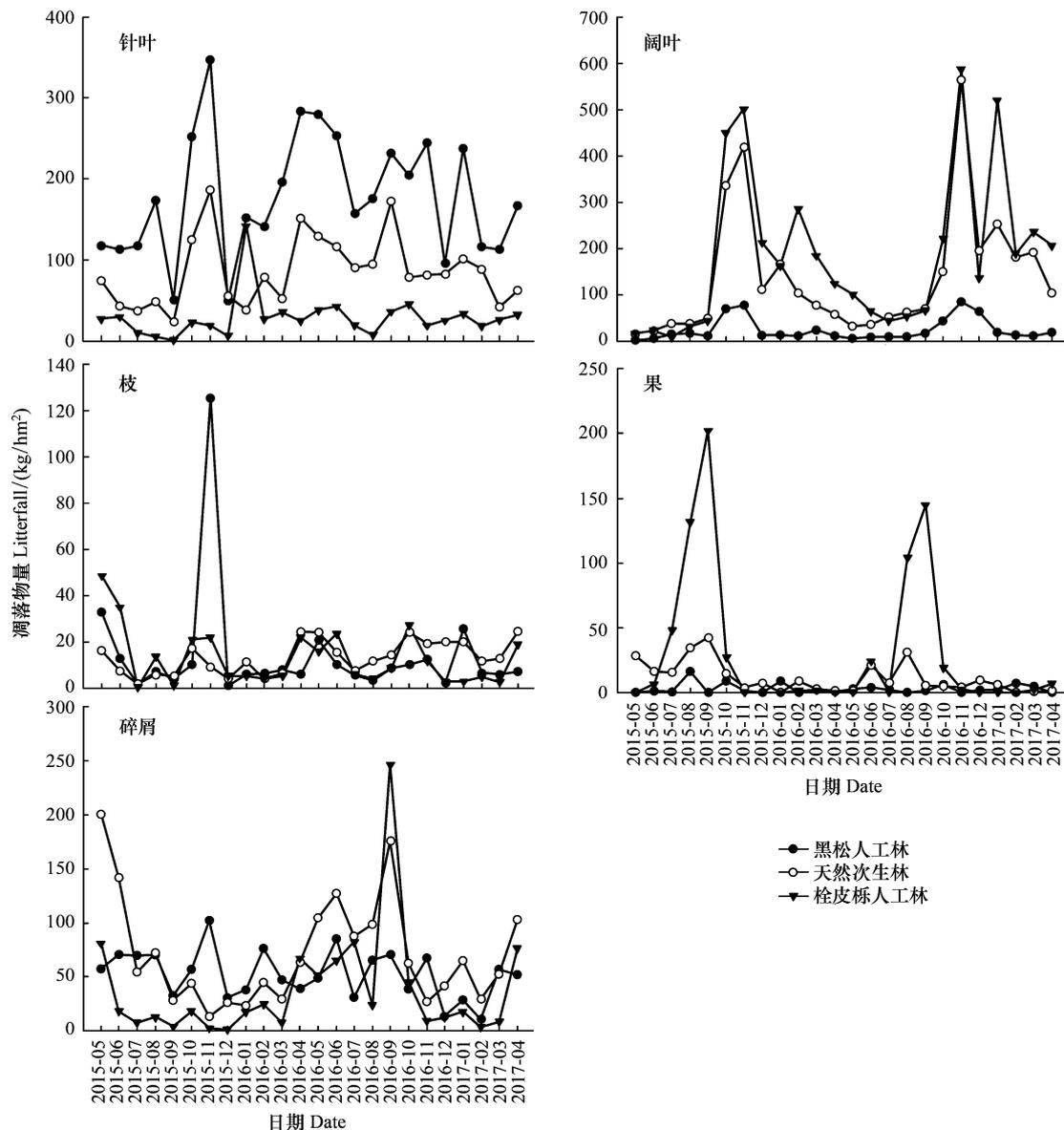


图2 凋落物组分月变化

Fig.2 Monthly dynamics of litterfall composition

3 讨论

3.1 森林类型间凋落物总量

本研究中,在2015年和2016年,凋落物总量都是天然次生林>栓皮栎人工林>黑松人工林,森林类型间无显著差异($P>0.05$),这与以往大多结果类似^[2-4,14]。而也有研究表明,温带地区阔叶林的凋落物总量显著大于针叶林^[2-4,14]。这主要是因为不同森林类型的群落组成不同,导致光合作用效率、生态位分化和生产力水平都有所不同^[3],最终会导致不同森林类型间凋落物总量差异显著。我们和大多研究表明,阔叶人工林的凋落物总量大于针叶人工林。

本研究中,温带地区天然次生林的凋落物总量高于人工林,但差异不显著。在寒温带,原始红松林(*P. koraiensis* Sieb. et Zucc.)凋落物量显著高于天然次生林,这是因为原始红松林是该地区的顶级群落,受外界环境影响较小^[14]。寒温带帽儿山地区红松人工林的年凋落总量最大,针阔混交林次之,天然次生林最低^[15]。

即使都在亚热带地区,天然次生林和人工林凋落物量的相对大小随人工林优势树种组成不同而变化^[7-9]。这表明天然次生林和人工林凋落物量的相对大小,随气候带和森林类型而变化。

3.2 森林类型间凋落物量月动态变化

3种森林类型的凋落物总量的月变化曲线呈多峰型,峰值出现在9月到次年2月,集中在秋冬季节。大多研究表明,针叶林和阔叶林的凋落物量呈单峰模型,并且峰值出现在9—10月^[2-4],也有研究表明针叶林和阔叶林的凋落物量呈双峰模型,但峰值出现的时间存在争议^[2,4,7,10],还有多峰模型^[7]或不规则型^[11-12]的观点。即使都在同一气候带,同一森林类型的凋落物曲线也存在不同观点,如同是在亚热带的杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)人工林,有多峰型^[7]和双峰型^[11]两种观点。在温带和亚热带地区的大多研究表明,凋落物总量的年内动态主要受气温^[3,12,16]和降水^[3]的影响,而在喀斯特季雨林的研究表明不同生态因子对凋落物总量的影响存在年际差异^[17]。本研究中凋落物量受最低和最高气温影响,不受降水量影响。因而,天然次生林和人工林以及针叶林和阔叶林的月凋落物动态不能一概而论,受到森林类型、气候带、海拔等环境因素的共同影响^[3,18],也受极端气候的影响^[17]。我们以及此前的研究表明,凋落物主要集中于秋冬季凋落,气温是凋落物量年内变化的主因素。

3.3 森林类型间凋落物组分差异及其与气象因子的关系

本研究中,3种森林类型的凋落物组分以叶凋落物为主,达65.9%以上,集中在9—11月凋落,针叶还在4—5月有一个峰值,而以往研究凋落叶的动态分单峰型和双峰型,峰值出现的时间和大小都有所不同,并且不同森林类型间叶凋落物月动态变化存在显著差异($P < 0.05$)^[2-4]。大多研究认为叶凋落物量主要受温度限制^[12-13,19],而是否受降水量的影响还存在争议^[3,20]。本研究中,在我国暖温带森林,针叶凋落量主要受最低气温、最高气温和最大降雨量的影响。落叶是植物对北方冬季极端低温的一种适应对策^[16],是为减少冬季养分消耗产生的生理性凋落^[3]。总之,叶凋落物量受气温和最大降雨量的影响。

本研究中,枝凋落物和果凋落物比例较小,枝凋落物变化平缓,果凋落物主要集中在8—9月,这表明凋落物组分基本和总量变化一致,主要集中在秋冬季。有研究认为果凋落物曲线较平稳,森林类型间差异不显著($P > 0.05$)^[2-4];不同森林类型果凋落物峰值集中在5、8、10月,差异显著($P < 0.05$)^[2-4]。我们的研究在枝和果上的结果和他们不同^[2-4,17],这可能与不同森林类型的不同树种生物特性及其产生的生长分配策略^[13]、气候带导致的温度^[12]、降雨^[3]、微气候^[19]以及极端气候^[17]有关。

枝凋落物的影响因素还存在争议,我国东北主要森林类型的枝凋落量主要受水分的影响^[3,13],而我国亚热带秋茄(*Kandelia obovata*)林枝凋落量与平均气温呈显著正相关,而与降水量无显著相关性^[20]。即使都在亚热带地区,枝凋落量的影响因素也存在争议,或受风速^[18-19]、或受气温^[12,18]的影响。与以往研究不同,本研究中枝凋落量受降水量、风速和最大降水量影响,与降水量和风速呈正相关,与最大降水量呈负相关。

本研究中,果凋落量有62.6%的变异可以被气温、风速和降水量解释。以往研究认为,果凋落量主要受气温和降水影响^[12,18,20],但存在争议。黑龙江帽儿山森林生态系统的果凋落量主要受气温、积温和总降雨量的显著影响,而浙江天童常绿阔叶林果凋落量仅与最大降水量呈正相关^[12],或受气温和最大降水量的影响^[18],而秋茄林果凋落物的月产量与降水量呈显著正相关,而与气温无显著相关性^[20]。果作为主要的繁殖器官,有固定的凋落时间,气温从生理上导致其凋落,而风速和降水从物理方面导致其凋落^[12]。

值得注意的是,栓皮栎人工林凋落物果的比例高达12.0%,显著高于天然次生林(5.5%)和黑松人工林(1.2%)。这表明栓皮栎人工林在繁殖器官果的投入资源较多,利于繁衍后代。而黑松人工林在果上的投入上不仅显著低于栓皮栎人工林,也低于温带地区松树林的果的比例^[3,5]。有研究追踪了50年间的塔山植被动态发现,塔山由针叶林向阔叶林的演替趋势明朗^[21]。因而,需要进一步结合其他植物群落结构特征、土壤肥力等情况判断黑松是否适合在沂蒙山区继续引进。沂蒙山区天然次生林的年凋落物量大,能更好的进行养分归还,保护天然次生林对提高整个森林生态系统的碳储量、养分循环能力和土壤肥力维持能力有深远意义。

参考文献 (References):

- [1] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, Porporato A. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science*, 2008, 321(5889): 684-686.
- [2] 张玉虎, 周亚运, 柳勇, 冯万富, 张学顺, 单燕祥. 鸡公山自然保护区 4 种森林植被凋落物量及动态. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2017, 32(2): 310-315.
- [3] 武启骞, 王传宽, 张全智. 6 种温带森林凋落量年际及年内动态. *生态学报*, 2017, 37(3): 760-769.
- [4] 魏强, 凌雷, 柴春山, 陶继新, 李国林, 张广忠, 王多锋, 戚建莉, 薛睿. 甘肃兴隆山不同演替阶段典型森林群落的凋落物动态. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2017, 41(5): 27-34.
- [5] 李雪峰, 韩士杰, 李玉文, 侯炳柱, 李雪莲. 东北地区主要森林生态系统凋落量的比较. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 783-788.
- [6] 骆宗诗, 向成华, 慕长龙. 绵阳官司河流域主要森林类型凋落物含量及动态变化. *生态学报*, 2007, 27(5): 1772-1781.
- [7] 刘强. 中亚热带不同更新方式森林凋落物数量及养分动态[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.
- [8] 陈梦瑶. 海岸沙地不同林分类型的凋落物特征及其养分转移[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [9] Zheng H, Ouyang Z Y, Wang X K, Fang Z G, Zhao T Q, Miao H. Effects of regenerating forest cover on soil microbial communities: a case study in hilly red soil region, Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(2/3): 244-254.
- [10] 郑金萍, 郭忠玲, 徐程扬, 范春楠. 长白山北坡主要森林群落凋落物现存量月动态. *生态学报*, 2011, 31(15): 4299-4307.
- [11] 郭婧, 喻林华, 方晰, 项文化, 邓湘雯, 路翔. 中亚热带 4 种森林凋落物量、组成、动态及其周周期. *生态学报*, 2015, 35(14): 4668-4677.
- [12] 邓秀秀, 王忠诚, 李程, 郭灏, 金珂丞. 浙江天童常绿阔叶林凋落物量季节动态及其与气象因子的关系. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(3): 73-78.
- [13] 张新平, 王襄平, 朱彪, 宗占江, 彭长辉, 方精云. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1031-1040.
- [14] 侯玲玲, 毛子军, 孙涛, 宋元. 小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化. *生态学报*, 2013, 33(6): 1994-2002.
- [15] 吕晓波. 帽儿山地区森林凋落物分解对土壤性质的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [16] 徐文铎, 陈玮, 何兴元, 徐胜, 张粤, 闻华. 沈阳城市森林凋落物数量及动态. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 2931-2939.
- [17] 郭屹立, 李冬兴, 王斌, 何运林, 向悟生, 蒋裕良, 李先琨. 北热带喀斯特季节性雨林凋落物组分构成及时空动态. *生物多样性*, 2017, 25(3): 265-274.
- [18] 杨海波, 管桐, 董舒, 袁铭皎, 王希华, 郑泽梅. 浙江宁波天童常绿阔叶林凋落物量与气象因子的关系分析. *东北师大学报: 自然科学版*, 2016, 48(3): 135-141.
- [19] 宋彦君, 田文斌, 刘翔宇, 尹芳, 程浚洋, 朱丹妮, Arshad A, 阎恩荣. 浙江普陀山岛森林凋落物动态与微气候的关联性. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1154-1163.
- [20] 金亮, 卢昌义. 秋茄中龄林和成熟林凋落物量及其动态特征. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2016, 55(4): 611-616.
- [21] 高远, 陈玉峰, 董恒, 郝加琛, 慈海鑫. 50 年来山东塔山植被与物种多样性的变化. *生态学报*, 2011, 31(20): 5984-5991.