

关帝山华北落叶松林凋落物分解过程及其养分动态

郭晋平*, 丁颖秀, 张芸香

(山西农业大学林学院, 山西太谷 030801)

摘要: 采用野外凋落物收集器法和埋置凋落物分解袋法, 对关帝山林区华北落叶松林凋落物的数量和组成、年凋落过程、不同埋置层凋落叶分解速率和营养元素动态进行了分析。结果表明: 华北落叶松林年凋落物总量为 $19.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中树叶占 35.7%, 树枝占 54.4%, 花果占 6.7%, 树皮和杂物占 3.1%。凋落物逐月动态变化为单峰型, 10 月为年凋落量高峰期, 但各成分的凋落进程不同。华北落叶松林凋落物残留量均值为 $9.803 \text{ t} / \text{hm}^2$, 凋落物分解常数为 1.95; 凋落叶在不同埋置层的分解失重率有明显差异, 凋落叶的周年平均失重率 29.82%, 分解半衰期 1.5 ~ 2a, 分解 95% 需 7 ~ 9a; 凋落叶分解过程中, 氮磷钾元素含量表现出不同的动态过程, 其中氮素的年动态变化总体上属于富集过程, 到后期开始出现下降, 磷素的年动态变化表现为 7 月份前下降, 之后出现快速富集, 到生长季末期富集过程变缓, 钾素的年动态变化表现为持续下降过程, 不出现富集过程。

关键词: 关帝山林区; 华北落叶松林; 凋落物; 分解过程; 养分动态

文章编号: 1000-0933(2009)10-5684-12 中图分类号: Q142, Q948, S718.5 文献标识码: A

Decomposition process and nutrient dynamic of litterfall in a *Larix principis-rupprechtii* stand in Guandishan Mountains

GUO Jin-Ping*, DING Ying-Xiu, ZHANG Yun-Xiang

College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5684 ~ 5695.

Abstract: We investigated the quantity and composition, annual decomposition process decomposition rate and nutrient dynamics at different depths of the litterfall in a *Larix principis-rupprechtii* stand in Guandishan Mountains, using field collection container, burying of the decomposition bags at different depth and laboratory analysis. The results showed that the total amount of litterfall was $19.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, of which 35.7% was for leaves, 54.4% for twigs, 6.7% for flowers and fruits, and 3.1% for barks and other materials. Furthermore, the month by month annual dynamics of the forest litter appeared to be single climax curve, in which the highest point occurred in October, while the different components had different decomposition rate. The residual litter in the *Larix principis-rupprechtii* stand was $9.803 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ with a decomposition constant of 1.95. The decomposition rate at different depths varied significantly. The annual weight loss of new defoliated leaves was 29.82%. The decomposition half life was 1.5 — 2a, while it took 7 — 9a to reach a decomposition proposition of 95%. During the decomposition process, the dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium showed different patterns. The enrichment of nitrogen gradually increased in most of the year, but decreased at the second half of the year. The enrichment of phosphorus decreased before July, but increased rapidly after that and slowed at the end of the growing season. The potassium content decreased all the year being washed off in the decomposition process without any enrichment.

Key Words: guandishan mountains; *Larix principis-rupprechtii* Stand; decomposition; forest Litter; nutrient dynamics

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30470316); 山西省留办基金资助项目(2008079)

收稿日期: 2008-03-24; 修订日期: 2009-07-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinpguo@sohu.com

森林凋落物在森林生态系统中的重要地位和作用及其对全球碳循环和气候变化的贡献,决定了对森林凋落物数量、性质、分布、来源、分解动态、养分释放、土壤效应、碳汇效应等方面的研究,长期以来一直是森林生态系统结构、功能和过程研究的核心内容之一。而且,由于凋落物是连接生态系统生物地球化学循环中植物-凋落物-土壤连续体的纽带,是维持土壤生物生存的物质和能量来源,同时也是森林生态系统重要的碳库,在全球 CO₂ 变化过程中发挥复杂的源汇效应,近年来对森林凋落物的研究因其与全球变化和全球生态系统碳循环的密切关系而增加了新的内涵^[1],凋落物分解对温室效应的贡献和全球变暖对凋落物动态的影响成为新的研究热点^[2]。我国学者自 20 世纪 80 年代以来就对不同气候带许多森林类型的凋落量及年凋落动态、凋落物组成和化学成分、凋落物分解速率和养分释放等进行了大量研究。通过研究,取得了长白山和小兴安岭温带红松针阔混交林^[3,4]、燕山东段暖温带森林及灌木群落^[5]、哀牢山北亚热带山地常绿阔叶林^[6]、滇中高原北亚热带次生半湿润常绿阔叶林^[7]、武夷山中亚热带甜槠林^[8]、三明莘口中亚热带福建柏人工林^[9]、苏南中亚热带丘陵区杉木和火炬松人工林^[10]、鼎湖山南亚热带季风常绿阔叶林和针阔叶混交林^[11]及马尾松林^[12]、海南热带红树林^[13]、尖峰岭热带山地雨林^[14]、川西峨眉冷杉天然林^[15]、绵阳官司河流域几个种混交林和纯林^[16]等从北到南许多森林类型的凋落量和凋落物组分的数据;还取得了尖峰岭热带山地雨林^[17]、三明针阔混交林、福建柏和杉木林^[9,18]、帽儿山樟子松^[19]、长白山北部落叶松^[20]、香溪河流域河岸林 4 个树种^[21]等许多森林类型的凋落物分解过程和速率以及营养元素动态的研究成果。虽然世界各国学者在不同地区开展了大量研究,取得了一些研究成果。如,就全球森林凋落量的分布格局而言,世界各类森林凋落量随着纬度的增大而下降^[2,22~24]。但是,全球森林生态系统类型多样,分布区域广阔,自然地理条件差异巨大,如要探索更具普遍意义的规律和机制问题,仍需要大量针对特定类型森林生态系统凋落物的基础性生态研究工作。

华北落叶松林是华北地区山地天然次生林中十分重要的森林类型,也是华北地区山地造林的主要类型,过去几十年来营造的人工林也已陆续成林,但对华北落叶松林凋落物及其分解和养分动态过程都缺乏研究。本文以华北落叶松林为研究对象,通过野外布点收集和凋落叶野外埋置试验加实验室分析,掌握山地华北落叶松林凋落物的年凋落量、凋落过程、凋落物组成、凋落物分解过程和速率、凋落物分解过程中主要营养元素的动态,为森林生态系统碳循环的深入研究奠定基础,为森林生态系统整体经营提供参考。

1 试验地概况

试验地设在地处山西吕梁山脉中段的关帝山林区庞泉沟国家级自然保护区,地理坐标 E111°21' ~ 111°37', N 37°45' ~ 37°59', 气候属于受季风影响和控制的暖温带大陆性山地气候,年平均气温 4.2℃, 年平均降水量 822.6 mm。除国家一级保护动物褐马鸡 (*Crossoptilon mantchuricum*) 外,华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*)、云杉 (白杆 *Picea meyeri* 和青杆 *P. willsonii*) 天然次生林也是保护区的主要保护对象。保护区范围内的主要森林类型是由华北落叶松、白杆和青杆,以及油松 (*Pinus tabulaeformis*)、山杨 (*Populus davidiana*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、红桦 (*B. albo-sinensis*) 和辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 等树种组成的纯林和混交林。试验标准地设在保护区的八道沟,华北落叶松生长好且较集中,研究的林分为华北落叶松纯林,局部林隙中有少量山杨和辽东栎幼树更新,标准地海拔 1930m,坡向东坡,坡度 22°,林分平均高 23.7m,平均年龄 62a,土壤为山地淋溶褐土,土层厚度 30 ~ 50cm,林分郁闭度 0.7,林下植被总盖度 32%,林下枯落物平均厚度 7.9cm。

2 研究方法

2.1 凋落物组成及凋落量测定

2004 年 10 月 20 日,在八道沟华北落叶松林中选定有代表性地段作为试验标准地,在 10000m² 的范围内布设了 10 个凋落物收集器,规格为 100cm × 100cm × 25cm,底部距地面 20cm,于 2005 年的 5 ~ 11 月份,每月 1 次,分 7 次收集凋落物并按枝、叶、皮、花果、杂物进行分类,在 80℃ 恒温条件下烘干至恒重,用精度 0.001g 的电子天平称重。

2.2 凋落物积累测定及分解速率估算

在同一林分内的林冠下、林隙边缘和林隙中心 3 种微环境中分别设置凋落物取样标准地,在 3 个标准地

内分别设置 20 个面积为 20cm × 20cm 小样方,这样共取得样品 60 份。在野外,按未分解层、半分解层和已分解层 3 个层次将每个小样方的凋落物样品分开,相同微环境下 20 个小样方的样品按 3 个层次分别混合成 3 份分析样品,这样就获得 3 种微环境下 3 个层次的 9 份混合样品。将样品置于 80℃ 恒温下烘干至恒重后称重。

凋落物分解速率由 Olson 模型参数估计值确定。在模型 $dx/dt = L - Kx$ 中, L 为年总凋落量, x 为凋落物残留量, t 为分解历时(a), K 为分解系数,反映凋落物的分解速率。稳定状态下 $dx/dt = 0$,则 $L = Kx$,得 $K = L/x$,即凋落量与林地凋落物残留量之比,可以反映生态系统物质生物循环强度。

2.3 凋落叶分解野外埋置试验及养分测定

于 2004 年 10 月 21 日在标准地内地面上收集当年凋落叶,用精度为 0.001g 的电子天平称取 25g 的分解实验样品 162 份,分别装入尼龙网分解袋内,分解袋孔径 0.5mm,规格为 20cm × 25cm,装入样品后的厚度一般不超过 1cm。选设 3 个生境条件基本一致的标准地,作为 3 个重复,在每个标准地内,按随机布设法,在未分解层、半分解层和已分解层 3 个层次分别在不同位置埋置分解袋,每个层次埋置 21 个分解袋。野外识别时,未分解层的落叶外观基本保持原始形态,肉眼看不出分解迹象;半分解层落叶组织变灰变黑,质地软化,已经能明显看出腐烂分解,但仍可辨认出是针叶或阔叶的大致形态;已分解层的凋落物已完全不能辨认其原始形态,呈黑褐色碎屑状。

对 2004 年 10 月 21 日埋置好的样品分解袋,于 2005 年 5 月到 10 月按月先后分 6 次进行取样,每次从 3 个标准地中的 3 个层次取 27 个样品分解袋。将取出的分解袋放在装有冰块的临时保温箱中带回实验室,除将其中 9 袋用于微生物组成及数量测定外,其余的 18 份样品在 80℃ 下烘干至恒重并称重。

由 Olson 指数模型^[25] $Y = 1 - e^{-kt}$,计算凋落叶分解系数 k 和半分解期及分解 95% 所需时间。并可同时计算不同时期的凋落物年失重率 Y 和残留率 e^{-kt} 。

从充分混合的样品中各取一部分送山西省农业科学院分析化验中心进行营养元素含量测定。全氮用凯氏定氮仪测定、全磷用钼兰比色法测定、全钾火焰光度计法测定。

3 结果分析

3.1 年凋落物量及组成

华北落叶松林凋落物量及组成见表 1。为了与不同气候区其他森林类型进行比较,将其他学者对我国部分森林类型凋落量及组分的研究成果也列入表 1。

由表 1 可见,各气候区不同群落类型的年总凋落量差异很大,大兴安岭兴安落叶松林仅为 $1.529 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而海南海莲红树林为 $12.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,相差超过 5 倍,华北落叶松林年凋落量最大,达到 $19.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从总凋落量组分来看,树叶凋落量占总凋落量的 35.7%,树枝凋落量占总凋落量的 54.4%,花果凋落量占 6.7%,树皮和杂物凋落量占 3.1%。由于在局部干扰形成的林隙中有少量辽东栎和山杨,凋落叶中阔叶凋落量占总凋落量的 3.12%,在树叶凋落量中占 9.0%。与其他已报道的凋落量组分数据相比,华北落叶松林树叶凋落量占总凋落量的比例最低,而树枝凋落量占总凋落量的比例显著高于其它森林类型。

3.2 凋落物月动态分析

3.2.1 总凋落量的月动态

凋落物逐月凋落量和累积凋落量动态分析结果见图 1。

由图 1 可见,华北落叶松林凋落物月凋落量在一年中呈现有规律的变化,从 9 月份开始急剧增大,10 月份出现凋落高峰,月凋落量占全年的 47.04%,11 月份开始逐渐下降。

3.2.2 各组分的月动态

华北落叶松林枝、叶、花果、树皮及杂物的月凋落量变化过程分析结果见图 2。

由图 2 可见,在华北落叶松林凋落物中,树叶凋落量动态与落叶阔叶林树叶凋落过程类似,凋落期集中在 9 月份到 10 月份,以 10 月份为凋落高峰期,11 月份仍有部分凋落量,12 月份到翌年 5 月份的凋落量几乎为

表 1 我国不同森林类型的年凋落量及其组成

Table 1 Annual litter-fall and litter component in different forest vegetation in China

	森林植被类型 Forest vegetation types	年凋落量 Annual litterfall (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	组分 Composition (%)				文献 References
			树叶 Leaf	树枝 Branch	树皮和杂物 Miscellany	花果 Flower & fruit	
热带	海南海莲红树林 <i>Bruguierase xangulaman grove</i> in Hainan	12.55	64.3	3.71	—	32.0	[13]
	西双版纳季雨林	11.29	65.6	19.1	6.9	8.4	[26]
	Monsoon rain forest in Xishuangbanna	8.42	64.7	9.9	10.9	14.5	[27]
	尖峰岭热带山地雨林	9.177	49.6	37.0	13.4	—	[28]
	Tropical mountain rain forest in Jianfengling	7.696	70.7	21.3	8.0	—	[14]
南亚热带	鼎湖山常绿阔叶林	9.058	52.7	21.1	—	26.2	[12]
	Evergreen broad-leaved forest in Dinghushan	8.41	51.0	23.1	—	26.0	[29]
	鼎湖山常绿针阔混交林	8.50	67.0	16.0	17.0	—	[11]
	Evergreen mixed forest in Dinghushan	3.31	78.0	4.2	17.8	—	[11]
	鼎湖山常绿针叶林	2.695	64.6	12.4	—	23.0	[12]
中亚热带	黑石顶常绿阔叶林	4.630	81.30	18.66	—	—	[30]
	Evergreen broad-leaved forest in Heishiding	5.31	66.8	13.6	2.1	17.7	[31]
	天童山常绿阔叶林	5.31	66.8	13.6	2.1	17.7	[31]
	Evergreen broad-leaved forest in Tiantong	5.548	68.32	14.82	1.82	15.04	[32]
	建德常绿阔叶林	5.548	68.32	14.82	1.82	15.04	[32]
北亚热带	武夷山甜槠林	3.896	76.20	20.59	—	3.21	[8]
	<i>Castanopsis eyrei</i> forest in Wuyishan	11.008	59.70	23.07	9.37	7.86	[33]
	三明格氏栲林	11.008	59.70	23.07	9.37	7.86	[33]
	<i>Castanopsis kawakamii</i> natural forest in Sanming	11.434	78.7	8.7	12.5	0.1	[34]
	禄峰山马尾松人工林	11.434	78.7	8.7	12.5	0.1	[34]
温带	Pinus massoniana plantation in Lufengshan	6.642	79.6	11.0	2.9	6.5	[16]
	四川盆地松栎混交林	6.642	79.6	11.0	2.9	6.5	[16]
	Pinus-Quercus mixed forest in Sichuan basin	3.510	76.33	8.02	8.35	7.30	[7]
	滇中常绿阔叶林	3.510	76.33	8.02	8.35	7.30	[7]
	Evergreen broad-leaved forest in central Yunnan	7.172	73.20	19.80	—	7.00	[35]
温带	哀牢山常绿阔叶林	7.172	73.20	19.80	—	7.00	[35]
	Evergreen broad-leaved forest in Ailaoshan	19.15	35.7	54.4	3.1	6.7	本文
	关帝山寒温性针叶林	19.15	35.7	54.4	3.1	6.7	本文
	Mountain boreal forest in Guandishan	2.112	76.7	7.4	3.6	12.3	[36]
	天山地寒温性针叶林	2.112	76.7	7.4	3.6	12.3	[36]
	Mountain boreal forest in Tianshan	1.858	80.6	8.1	9.7	1.6	[36]
	哈密林区落叶松云杉混交林	1.858	80.6	8.1	9.7	1.6	[36]
	Mountain boreal forest in Hami	2.810	74.8	17.3	7.6	0.3	[15]
	贡嘎山峨眉冷杉天然林	2.810	74.8	17.3	7.6	0.3	[15]
	Abies fabric forest in Gonggashan	4.026	75	13	—	12	[37]
温带	长白山阔叶红松林	4.026	75	13	—	12	[37]
	Pinus koraeinsis broad-leaved forest in Changbaishan	5.154	87	4	—	9	[37]
	长白山落叶阔叶林	5.154	87	4	—	9	[37]
	Temporal broad-leaved forest in Changbaishan	1.529	82	7	—	11	[24]
	大兴安岭兴安落叶松林	1.529	82	7	—	11	[24]
温带	Larix olgensis forest in Daxinganling	6.649	91.89	7.02	0.82	0.27	[38]
	帽儿山兴安落叶松人工林	6.649	91.89	7.02	0.82	0.27	[38]
	Larix olgensis forest in Maoershan						

零;树枝在生长季节也有相对较大的凋落量,在树叶凋落高峰期也出现凋落高峰,且在整个冬季和早春的凋落

量也明显高于其它组分,但其峰值凋落量低于树叶的峰值凋落量,这使得树枝的累积凋落量曲线呈现出逐步上升的趋势而与树叶累计凋落量曲线有明显差异。花果凋落量在 10 月份以后逐渐增加,且在整个冬季持续较长时间,树皮凋落量也在秋冬季比生长季高。

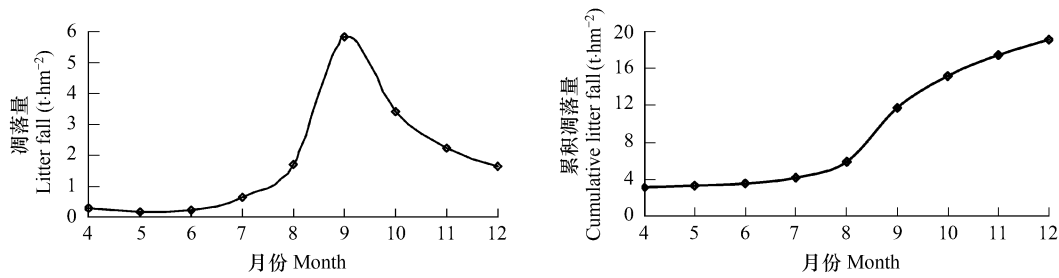


图1 凋落物月凋落量和累积凋落量分析图

Fig. 1 Dynamic analysis of monthly and cumulative litter fall

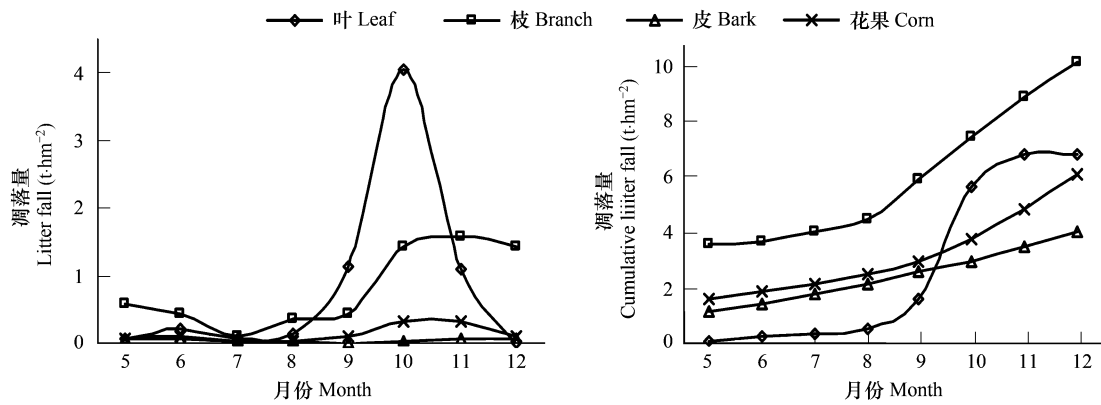


图2 凋落物各组分月凋落量和累积凋落量分析图

Fig. 2 Dynamic analysis of Monthly and cumulative litter fall of different litter components

3.3 华北落叶松林凋落物积累及分解速率

通过对 3 个标准地 60 个分层凋落物积累量样品测定数据进行分析,可以得到华北落叶松林不同微环境下各层次凋落物积累量,分析结果表 2。

表 2 华北落叶松林不同微环境下各层次凋落物积累量($t \cdot hm^{-2}$)

Table 2 The classify and quantity ($t \cdot hm^{-2}$) of litter fall in different micro-circumstances

	林冠下 Under canopy	林隙中心 Gap center	林隙边缘 Gap edge
未分解层 Un-decomposed layer	0.523	0.914	1.898
半分解层 Semi-decomposed layer	2.727	2.367	1.991
已分解层 Decomposed layer	5.687	3.174	10.111
总积累量 Total	8.937	6.455	14.010

由表 1 知,华北落叶松林年凋落量为 $19.15 t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,而由表 2 数据计算 3 个微环境下林地凋落物分解残留物平均积累量为 $9.803 t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,则华北落叶松林凋落物的分解常数为 1.95,与全球其他森林类型凋落物分解常数^[39]的比较见表 3。

表 3 显示,关帝山华北落叶松林凋落物分解常数比热带雨林低,比温带落叶林高,分解速率快于其它落叶松林。

表 3 不同地区森林林地残留物累积和分解常数的比较

Table 3 Comparison of remaining mass and decomposition constant among different forests

森林类型 Forest type	累积量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) Remaining mass	分解常数 Decomposition constant	资料来源 Data source
龙脑香林(马来西亚) Dipterocarpus forest in Malaysia	3.20	3.3	[39]
常绿林(尼日利亚) Evergreen forest in Nigeria	3.00	2.4	[39]
雨林(哥伦比亚) Rain forest in Colombia	5.04	1.7	[39]
雨林(特立尼达) Rain forest in Trinidad	4.20	1.6	[39]
低山雨林(新几内亚) Mountain rain forest in New Guinea	6.50	1.2	[39]
低山雨林(巴西) Mountain rain forest in Brazil	6.60	1.2	[39]
落叶林(荷兰) Deciduous forest in	3.60	0.9	[39]
落叶林(英国) Deciduous forest in England	7.10	0.8	[39]
落叶林(美国密苏里) Deciduous forest in Missouri	6.10	0.6	[39]
落叶林(美国明尼苏达) Deciduous forest in Minnesota	12.60	0.4	[39]
鼎湖山马尾松针叶林 <i>Pinus massoniana</i> needle forest in Dinghushan	11.43	2.42	[40]
华北落叶松林针叶林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest in Guandishan	9.80	1.95	本文

3.4 凋落叶分解动态过程

对关帝山华北落叶松林凋落叶分解动态过程从失重率和分解过程模型及其参数进行分析。

3.4.1 凋落叶失重率

由凋落叶分解野外埋置试验的逐月取样测定数据,经整理分析可得各埋置层凋落叶在各个分解阶段的失重率,结果见表 4。

表 4 不同埋置层凋落叶分解过程中失重率

Table 4 Mass loss rates of leaf litter in different layers in successive stages

日期 Date	分解时间(d) Decomposition time	未分解层(%) Un-decomposed layer	半分解层(%) Semi-decomposed layer	已分解层(%) Decomposed layer	平均(%) Average
2005-05-19	209	13.79	3.64	11.64	9.28
2005-06-26	247	16.00	13.29	13.29	13.49
2005-07-27	278	18.93	14.50	16.93	15.99
2005-08-27	308	22.71	20.50	21.64	20.59
2005-09-27	329	27.50	23.64	27.57	25.02
2005-10-27	369	31.21	28.29	34.21	29.82

从表 4 可见,从 2004 年 10 月 21 日样品埋置开始,到 2005 年 5 月 26 日第一次取样,林地气候干燥,降水量小,动物和微生物活动少,凋落物分解作用弱,其后分解过程逐渐加快,凋落叶分解速率呈逐步加速趋势。

3.4.2 凋落叶分解过程模型

利用上述试验采集的数据拟合 Olson 指数模型,参数辨识结果见表 5。

表 5 不同埋置层凋落叶分解模型参数

Table 5 Estimated parameters in leaf litter decomposition model in the different layers

埋置层 Layers	失重率 Loss rates	残留率 Remain rates	分解常数 K	$t_{0.5}$	$t_{0.95}$
未分解层 Un-decomposed layer	0.31	0.69	0.37106	1.87	8.07
半分解层 Semi-decomposed layer	0.28	0.72	0.32850	2.11	9.12
已分解层 Decomposed layer	0.34	0.66	0.41552	1.67	7.2
总体 Total	0.30	0.70	0.35667	1.94	8.4

从表 5 可以看出,将凋落叶埋置在半分解层,分解一半需 2.1a,分解 95% 需 9.1a,所需分解时间最长;埋置在已分解层分解最快,分解一半需 1.67a,分解 95% 需 7.2a;埋置在未分解层,分解一半需 1.87a,分解 95% 需 8.07a。这说明,分解初期凋落叶的失重以易溶物质的淋溶过程为主,埋置在表层更有利于淋溶过程,淋溶过程结束后失重率变慢,此后一段时间,叶片组织结构破坏,分解过程加速。

3.5 凋落叶营养元素动态分析

对 3 个埋置层中凋落叶氮、磷、钾各元素含量数据进行分析,绘制成各营养元素含量动态变化分析图,结果见图 3 ~ 图 5。

3.5.1 凋落叶磷素在各埋置层的动态变化

由图 3 可以看出,凋落叶氮素在各埋置层的年动态变化总体上属于富集过程,到后期开始出现下降。其中,在未分解层埋置的凋落叶 N 素含量的变化呈持续增长趋势,也就是说,随着凋落叶的失重,氮素没有减少或减少速率低于凋落叶失重速率;在半分解层埋置的凋落叶, N 素含量变化也属于持续富集过程,只是冬春季 6 月份以前的富集不如未分解层明显;在已分解层埋置的凋落叶 N 元素含量在前期略有下降,但进入 6 月份后开始富集,进入 10 月份后出现了 N 素的释放。

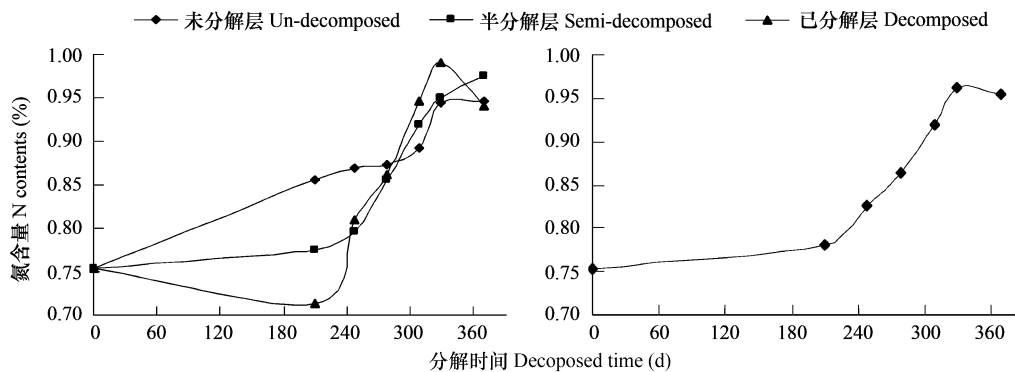


图 3 各埋置层(左)和 3 层平均(右)凋落叶氮素含量动态分析图

Fig. 3 Changes of N in the different layers (left) and average (right) in litter leaf decomposition process

3.5.2 凋落叶磷素在各埋置层的动态变化

由图 4 可见,总体来说,凋落叶 P 素含量在 7 月份前下降,之后出现快速富集,到生长季末期富集过程变缓。其中,在未分解层埋置的凋落叶 P 素含量在 7 月份之前一直是下降的,7 月份后开始持续缓慢富集过程;在半分解层埋置的凋落叶 P 素含量也是在 7 月份之前下降,之后迅速出现富集,到 10 月份富集过程减缓;在已分解层埋置的凋落叶 P 素含量在 10 月份前属于持续缓慢的升高过程,到 10 月份则出现急剧下降。

3.5.3 凋落叶钾素在各埋置层的动态变化

由图 5 可见,总体来看,凋落叶 K 素含量呈持续下降过程,3 个埋置层的凋落叶 K 素含量变化趋势基本一致。但半分解层和已分解层与未分解层的变化过程略有差异,更明确说明凋落叶 K 素含量变化以淋溶过程为主,微生物过程作用较小,不出现富集过程。

4 讨论

4.1 森林年凋落量及其组分

森林年凋落物量随地理气候区和森林类型的不同而有很大差异,大兴安岭兴安落叶松林与海南海莲红树林之间相差超过 5 倍。就表 1 所反映的研究结果可见,在不同地理气候区之间,热带地区的海南海莲红树林年凋落物量为 $12.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [13],西双版纳热带季雨林为 $11.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [26],而亚热带的鼎湖山常绿阔叶林为 $9.058 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [12],哀牢山常绿阔叶林为 $7.172 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [35],到温带地区的长白山落叶阔叶林为 $5.154 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [37],而属于北方森林的兴安落叶松林仅为 $1.529 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [37]。总体上确有随纬度增加而提高的大趋势 [2,23]。同时,同一地理气候区内不同森林类型间的差别也很大,如热带地区的海南岛尖峰岭热

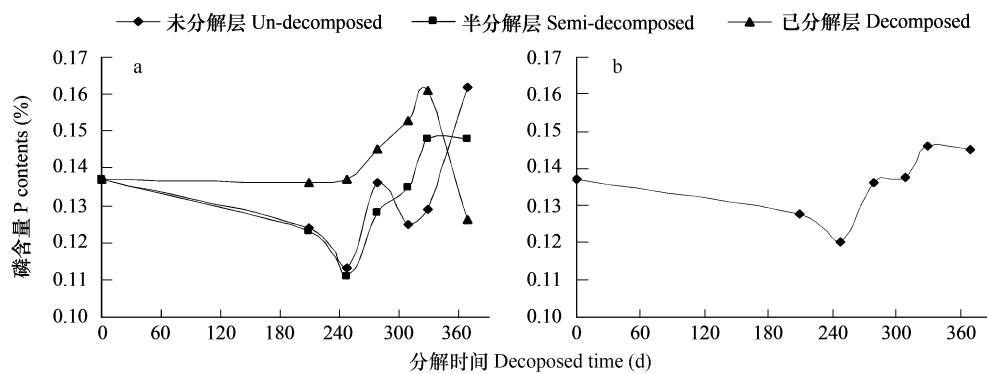


图4 各埋置层(a)和3层平均(b)凋落叶速效磷含量动态分析图

Fig. 4 Changes of P in the different layers (a) and average (b) in litter leaf decomposition process

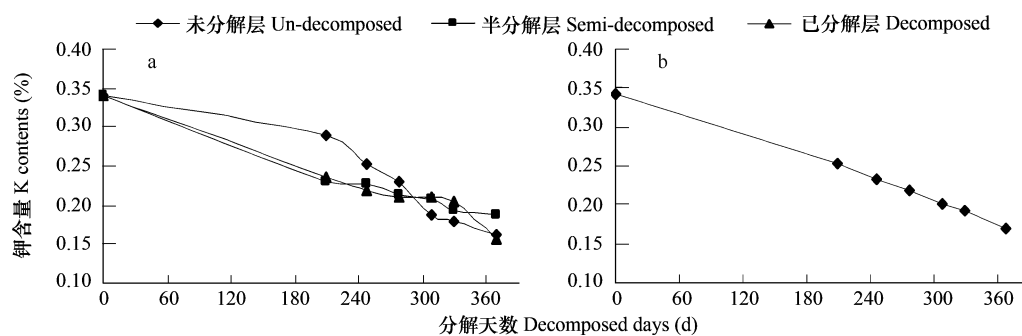


图5 各埋置层(a)和3层(b)平均凋落叶速效钾含量动态分析图

Fig. 5 Changes of K in the different layers (a) and average (b) in litter leaf decomposition process

带季雨林为 $7.697 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [41], 与海南海莲红树林相差 $4.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 南亚热带鼎湖山常绿阔叶林与针叶林之间相差 $6.363 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [12], 中亚热带不同森林类型之间的差别更大, 同在中温带地区的长白山落叶阔叶林与兴安落叶松林相差也有 $3.625 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [37]。即使同一区域相同类型森林, 在不同研究地点的年凋落量差异也很大, 如西双版纳热带雨林和尖峰岭山地雨林相差 $1.5 \sim 2.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [14, 26~28]。同一森林类型的不同林龄阶段年凋落量也有显著差异 [15, 40], 而且凋落量的年际波动也很明显 [11, 30]。本研究得到的华北落叶松林年凋落量达到 $19.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于目前国内对各类森林的研究结果。而且, 从表1的凋落量组分来看, 树叶凋落量占总凋落量的35.7%, 树枝凋落量占总凋落量的54.4%, 花果凋落量占6.7%, 树皮和杂物凋落量占3.1%。与其他已报道的凋落量组分数据相比, 华北落叶松林树枝凋落量占总凋落量的比例显著高于其它森林类型, 而树叶凋落量占总凋落量的比例最低。在森林凋落量的调查研究中, 凋落物组分多数划分为叶、枝、花和果实、树皮和杂物, 其中枝条通常以直径2cm为标准。枝条是比较长的, 当凋落物收集筐的大小在50cm到100cm时, 对枝条的收集准确性可能值得怀疑, 当较大的枝条落到收集筐上时, 如何确定其落入筐内的量会成为一个问题, 如果遇到连续几年降水偏少, 落枝量可能会加大。就华北落叶松林而言, 即使单独考虑叶凋落量, $6.837 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的叶凋落量绝对值仍然高于许多已报道的森林树叶凋落量, 更高出相邻地区森林凋落量的地带性大格局。可见, 对于凋落量的地理分布和影响因素等问题, 目前还很难形成可以接受的结论, 还需要通过大量的、统一标准的研究工作积累, 才能得出具有一定普遍意义规律。

4.2 凋落物的分解速率

森林凋落物的分解过程是一个包含物理过程、化学过程和生物过程的复杂的复合过程, 所以其影响因素也很多。综合的因素中, 以气候、凋落物质量、土壤动物和微生物等为主 [42, 43]。凋落物年分解速率是描述凋落物分解过程的一个重要指标, 国内多数研究采用一定期间分解损失的凋落物质量占其初始质量的比例来描

述凋落物分解速率,实际就是凋落物的年失重率。用 Olson 模型拟合凋落物失重过程,并获得其模型参数 K , K 值的大小可以反映凋落物分解过程的基本特征,有部分研究采用了这个指标。对于一个完整的凋落物分解过程来说,失重率随分解阶段的不同而变化,而基于 Olson 模型的分解速率指标是稳定的,因而可比性更强。

本研究得出了凋落叶分解失重率和分解常数,与国内其它森林类型相比(表 4),低于亚热带森林凋落物 40% ~ 70% 的年分解速率^[43,44],但高于许多温带森林 20% ~ 30% 的凋落物分解速率^[19,42],总体上符合凋落物分解速率的气候地带性规律^[44,45]。

表 4 不同森林类型凋落叶失重率和分解常数的比较

Table 4 Comparison of Weight-loss rate and decomposition constant among different forests

森林类型 Forest type	失重率(%) Weight-loss rate	分解常数 Decomposition constant	资料来源 Data source
尖峰岭热带山地雨林 Tropical mountain rain forest in Jianfengling	63.61	2.172	[17]
三明针阔混交林 Evergreen mixed forest in Sanming	—	1.188	[18]
三明福建柏林 <i>Fokienia hodginsii</i> plantation in Sanming	83.47	1.800	[9]
关帝山华北落叶松针叶 <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest in Guandishan	30.00	0.357	本文
帽儿山樟子松针叶 Needle of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in Morershan	34.64	0.426	[19]
长白山北部落叶松针叶 Needle of Larch forest in Northern Changbaishan	25.70	0.301	[20]

4.3 凋落物分解过程中的养分动态

森林凋落物分解过程中的养分动态模式有:淋溶-富集-释放模式、富集-释放模式和持续释放模式等,但不同森林类型和不同地理区域可能有很大差异。本研究中华北落叶松林凋落叶分解年周期中 N 含量的变化格局表现为从持续富集到开始释放的过程,类似于福建柏(*Fokienia hodginsii*)^[9]和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杨树(*Populus* spp.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等落叶分解过程中氮素浓度先升后降的过程^[46,47],而与樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)持续释放的模式不同^[19]。P 的变化格局在不同树种、不同地理区域乃至同一树种的不同凋落物中都会有不同表现^[45],本研究中,P 在凋落叶分解过程中表现为前期缓慢释放而后期持续富集的过程。K 在凋落叶分解过程中表现为持续释放的格局,与国内外许多研究结果相似^[18]。

5 结论

(1) 华北落叶松林年凋落量为 $19.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于同纬度其他森林类型。凋落物组分中, 树叶占 35.7%, 树枝占 54.4%, 花果占 6.7%, 树皮和杂物占 3.1%, 树枝凋落量所占比例较高。

(2) 凋落物逐月凋落量变化呈单峰态, 10 月份为凋落高峰期, 以树叶为主, 但生长季节也有少量树叶凋落; 树枝凋落量也在 10 月份达到最大, 但冬季的树枝凋落量也较大, 持续时间较长, 并逐步下降, 生长季节凋落量极小; 花序和球果的凋落量也以秋冬季为主, 但不像树叶和树枝那样集中, 分散在全年各月; 树皮杂物的凋落基本以冬季为主。

(3) 华北落叶松林 3 种微环境下凋落物残留量平均达 $9.803 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 凋落物分解常数为 1.95。林下不同埋置层中凋落叶的失重率不同, 分层埋置 369d 后的凋落叶平均失重率为 29.82%。在半分解层的分解速度最慢, 分解一半需 2.1a, 分解 95% 需 9.1a; 在已分解层分解最快, 分解一半需 1.67a, 分解 95% 需 7.2a; 在未分解层, 分解一半需 1.87a, 分解 95% 需 8.07a。

(4) 华北落叶松林凋落叶分解过程中, 氮素的年动态总体上属于富集过程, 到后期开始出现下降; 磷素的年动态表现为 7 月份前下降, 之后出现快速富集, 到生长季末期富集过程变缓; 钾素的年动态总体上表现为持续下降过程, 在凋落叶分解过程中以淋溶释放过程为主, 不出现富集过程。

References:

- [1] Zou B, Li Z A, Ding Y Z, et al. Litterfall of common plantation in south subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):715—721.

- [2] Peng S L, Liu Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1534—1544.
- [3] Cheng B R, Xu G S, Ding G F, *et al.* The litterfall and intensity of biological cycle in the coniferous forest and *Pinus koraiensis* broad-leaved mixed forest in the north slope of Changbai Mountain. *Research of Forest Ecosystem*, 1992, 6:200—203.
- [4] Liu C Z, Li J W, Pan G L, *et al.* Litter production and Dynamics in Broadleaved-Korean Pine Forests In Xiaoxingan mountains. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, 12(6):29—33.
- [5] Zheng J B, Wang D Y, Guo Q S, *et al.* Studies on the litters in the forest and shrub communities in the Eastern YanShan Mountains. *Forest Research*, 1993, 6(5):473—479.
- [6] Liu W Y, Xie S C, Xie K J, *et al.* Preliminary studies on the litterfall and coarse woody debris in mid-mountain humid evergreen broad-leaved forest in Ailao mountains. *Acta Botanica Sinica*, 1995, 37(10):807—814.
- [7] Liu X, Duan C Q. Research on characteristics of secondary semi-humid evergreen broad-leaved forest in Sanaehang area. *Journal of Yunnan Environmental Science*, 2004, 23(1):53—56.
- [8] Lin Y M, He J Y, Yang Z W, *et al.* The dynamics and production of litter falls of *Castanopsis eyrei* community in Wu Yi Mountains. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1995, 38(2):280—286.
- [9] Yang Y S, Chen Y X, He Z M, *et al.* Comparatively study on litter properties between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*. *Science Silvae Sinicae*, 2004, 40(1):2—10.
- [10] Yu Y C, Ruan H H, Fei S M. Study on litters in main forest stands in Xiashu forest farm. In: Department of science and technology ministry of forestry. long-term research on China forest ecosystems, Harbin: Northeast Forestry University Press, 1994. 112—122.
- [11] 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.
- [12] Weng H, Li Z A, Tu M Z, *et al.* The production and nutrient contents of litter in forests of Dinghushan mountain. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17(4):299—304.
- [13] Lin P, Lu C Y, Wang G L, *et al.* Studies on dynamics of litter fall of *Bruguiera sexangula* mangrove in Hainan island, China. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1990, 14(1):69—74.
- [14] Lu J P, Liu Q H. Litter-fall in tropical forest at Jianfengling mountain, Hainan island. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1988, 12(2):104—112.
- [15] Luo J, Cheng G W, Song M Q, *et al.* The characteristic of litterfall of *Abies*, *nbri*c forests on the Gongga Mountmn. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(1):59—65.
- [16] Luo Z S, Xiang C H, Mu C L. The litterfall of major forests in Guansi River Watershed in Mianyang City, Sichuan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1772—1781.
- [17] Lu J P, Liu Q H. research on decomposition propcess of the fallen leaves in the tropical forests at Jianfengling, Hainan Island. *Forest Research*, 1989, 2(1):25—33.
- [18] 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.
- [19] Shen H L, Ding B Y, Shen G F, *et al.* decomposing dynamics of several coniferous and broad-leaved litters in mongolian scots pine plantation, *Science Silvae Sinicae*, 1996, 32(5):393—402.
- [20] Zhang Y D, W Q C, Li Q L. The litter decomposition dynamics in ash and larch pure and mixture plantation stands. *Journal of Northeast Forestry University*, 1999, 27(4):5—8.
- [21] Jiang M X, Deng H B, Tang T, Cai Q H. Comparison of leaf decomposing rate in a headwater stream in Xiangxi River catchment, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1):27—30.
- [22] Bray J R, Gorham E. Litter production in forest of the world, *Adv. Ecol. Res.*, 1964, 2:101—157.
- [23] Vogt K A, Grier C C, Vogt D J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above-and below-ground detritus of world forests. *Advan. Ecol. Res.*, 1986, 15:303—377.
- [24] Li X F, Han S J, Li Y W. Litterfall in main forest ecosystems of Northeast China, *Chinese J. of Applied Ecology*, 2005, 16(5):783—788.
- [25] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44:322—331.
- [26] Zheng Z, Liu L H, He A J, Ding G F. Litterfall and leaf consumption by animals in humid seasonal rain forest in Xishuangbanna, China. *Acta Botanica Sinica*, 1990, 32(7):551—557.
- [27] Ren Y H, Cao M, Tang J W, *et al.* A comparative study on littefall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5):418—425.
- [28] Wu Z M, Lu J P, Du Z H. Litter production and storage in the natural and regenerated tropical mountain rain forests at Jianfengling, Hainan

- island. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(4):306—313.
- [29] 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 Dinhuashan forest ecosystem research station. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4):449—456.
- [30] Hou Y, Wang B S, Zhang H D, *et al.* The litterfall of the south subtropical evergreen broad-leaved forest in Heishiding Nature Reserve. *Ecologic Science*, 1998, 17(2):14—18.
- [31] Zhang Q F, Song Y C, Wu H Q, *et al.* Dynamics of litter amount and it's decomposition in different succesional stages or evergreen broad-leaved forest in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3):250—255.
- [32] Yu M J, Chen Q C, Li M H, *et al.* Litterfall in the evergreen broadleaved forests dominated by cyclobalanopsis glauca in Zhejiang, SE China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(2):144—150.
- [33] Yang Y S, Chen Y X, He Z M, *et al.* Comparatively study on litter properties between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata*. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(1):2—10.
- [34] Tian D L, Lin X B. Studies on the amount of litter and nutrient restitution in different age of classes *Pinus massoniana* plantation. *Journal of Central-South Forestry University*, 1995, 15(2):163—169.
- [35] Deng C Z, Li S C, Hou J P. Researches on litterfall distributed in seven forests at varied altitudes on Ailao mountain, Yunan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17(4):364—370.
- [36] Li X Y, Sun J K, Chang Z H, *et al.* A study on litter and forest floor in Tianshan Mountains. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(4):406—417.
- [37] Li X F, Zhang Y, Niu L J, *et al.* Litter decomposition processes in the pure birch (*Betula platyphlla*) forest and the birch and poplar (*Populus davidiana*) mixed forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):1783—1790.
- [38] Chen L X, Chen X W, Duan W B. Larch litter and soil fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6):581—58.
- [39] Anderson J M, *et al.* Ecological studies in four contrasting lowland rain forests in Gunung Mulu National Park, Sarawek III. Decomposition processes and nutrient losses from litter. *Journal of Ecology*, 1983, 71:503—527.
- [40] Tian D L, Chen X Y, Kang W X, *et al.* Study on the litter decomposition and nutrient release in a *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem. In: Department of science and technology ministry of forestry ed. long-term research on China's forest ecosystems, Harbin: Northeast Forestry University Press, 1994. 146—153.
- [41] Lu J P, Liu Qi H. research on decomposition process of the fallen leaves in the tropical forests at Jianfengling, Hainan Island. *Forest Research*, 1989, 2(1):25—33.
- [42] Hu Y H, Chen L Z, Chen Q L, *et al.* Studies on the litter decomposition rates of several plants. *Journal of Plant Ecology*, 1987, 11(2):124—132.
- [43] Xu X J, Cheng J Y, Yu X T. Studies on the litter nutrient returns of six major Chinese fir associated species in Wuyi Moutains. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1995, 15(3):213—217.
- [44] Tu M Z, Yao W H, Weng H, *et al.* Characteristics of litter in evergreen broadleaved forest of the Dinghu Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(1):35—41.
- [45] Wang L X, Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient released patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition different climatic zones. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(4):399—407.
- [46] Jia L M, Fang L M, Hu Y J. Decomposition of leaf utter in ure and mixed slaads of poplar and black locust. *Chinese Journal of Applled Ecology*, 1998, 9(5):463—467.
- [47] Mao J M, Sandra Brown, Kong G H. *et al.* Litter decom position and its nutrient dynamics of a pine forest in dinghushan biosphere reserve. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(6):534—542.

参考文献:

- [1] 邹碧,李志安,丁永祯,等. 南亚热带4种人工林凋落物动态特征. *生态学报*, 2006, 26(3):715~721.
- [2] 彭少麟,刘强. 林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 2002, 22(9):1534~1544.
- [3] 程伯容,许广山,丁桂芳. 长白山北坡红松针阔混交林凋落物及其生物循环. *森林生态系统研究*, 1992, 6:200~203.
- [4] 刘传照,李景文,潘桂兰,等. 小兴安岭阔叶红松林凋落物产量及动态的研究. *生态学杂志*, 1993, 12(6):29~33.
- [5] 郑均宝,王德艺,郭泉水,等. 燕山东段森林和灌木群落凋落物研究. *林业研究*, 1993, 6(5):473~479.
- [6] 刘文耀,谢寿昌,谢克金,等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物和粗死木质物的初步研究. *植物学报*, 1995, 7(10):807~814.
- [7] 刘曦,段昌群. 飒马场次生半湿润常绿阔叶林凋落物特征初步研究. *云南环境科学*, 2004, 23(增刊1):53~56.
- [8] 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. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1995, 38(2):280~286.
- [9] 杨玉盛,陈银秀,何宗明,等. 福建柏和杉木人工林凋落物性质的比较. *林业科学*, 2004, 40(1):2~10.

- [10] 俞元春, 阮宏华, 费世民. 下蜀林场主要森林类型凋落物研究. 见: 林业部科技司编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 112 ~ 122.
- [11] 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.
- [12] 翁轰, 李志安, 屠梦照, 等. 鼎湖山森林凋落物及营养元素含量研究. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(4): 299 ~ 304.
- [13] 林鹏, 卢昌义, 王恭礼, 等. 海南岛河港海莲红树林凋落物动态的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1990, 14(1): 69 ~ 74.
- [14] 卢俊培, 刘其汉. 海南尖峰岭热带雨林凋落物研究初报. 植物生态学与地植物学学报, 1988, 12(2): 104 ~ 112.
- [15] 罗辑, 程根伟, 宋孟强, 等. 贡嘎山峨眉冷杉林凋落物的特征. 植物生态学报, 2003, 27(1): 59 ~ 65.
- [16] 骆宗诗, 向成华, 慕长龙. 绵阳官河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.
- [17] 卢俊培, 刘其汉. 海南岛尖峰岭热带林凋落叶分解过程的研究. 林业科学研究, 1989, 2(1): 25 ~ 32.
- [18] 杨玉盛, 陈光水, 郭剑芬, 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.
- [19] 沈海龙, 丁宝永, 沈国防, 等. 樟子松人工林下针阔叶凋落物分解动态. 林业科学, 1996, 32(5): 393 ~ 402.
- [20] 张彦东, 王庆成, 李清林. 水曲柳落叶松纯林与混交林的枯叶分解动态. 东北林业大学学报, 1999, 27(4): 5 ~ 8.
- [21] 江明喜, 邓红兵, 唐涛, 等. 香溪河流域河流中树叶分解速率的比较研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 27 ~ 30.
- [22] 李雪峰, 韩士杰, 李玉文, 等. 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.
- [23] 郑征, 刘伦辉, 和爱军, 等. 西双版纳湿性季节雨林凋落物和叶虫食量研究. 植物学报, 1990, 32(7): 551 ~ 557.
- [24] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究. 植物生态学报, 1999, 23(5): 418 ~ 425.
- [27] 吴仲民, 卢俊培, 杜志鹤. 海南岛尖峰岭热带山地雨林及其更新群落的凋落物量与贮量. 植物生态学报, 1994, 18(4): 306 ~ 313.
- [29] 官丽莉, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物量 20 年动态研究. 植物生态学报, 2004, 28(4): 449 ~ 456.
- [30] 侯庸, 王伯荪, 张宏达, 等. 黑石顶自然保护区亚热带常绿阔叶林的凋落物. 生态科学, 1998, 17(2): 14 ~ 18.
- [31] 张庆费, 宋永昌, 吴化前, 等. 浙江天童常绿阔叶林演替过程凋落物数量及分解动态. 植物生态学报, 1999, 23(3): 250 ~ 255.
- [32] 于明坚, 廖启玮, 李铭红, 等. 浙江建德青冈常绿阔叶林凋落量研究. 植物生态学报, 1996, 20(2): 144 ~ 150.
- [33] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. 生态学报, 2004, 24(2): 359 ~ 367.
- [34] 田大伦, 宁晓波. 不同龄组马尾松林凋落物量及养分归还量研究. 中南林学院学报, 1995, 15(2): 163 ~ 169.
- [35] 邓纯章, 侯建萍, 李寿昌, 等. 哀牢山北段主要森林类型凋落物的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17(4): 364 ~ 370.
- [36] 李叙勇, 孙继坤, 常直海, 等. 天山森林凋落物和枯枝落叶层的研究. 土壤学报, 1997, 34(4): 406 ~ 417.
- [37] 李雪峰, 张岩, 牛丽君, 等. 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. 生态学报, 2007, 27(5): 1783 ~ 1790.
- [38] 陈立新, 陈祥伟, 段文标. 落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究. 应用生态学报, 1998, 9(6): 581 ~ 58.
- [40] 田大伦, 湛小勇, 康文星, 等. 杉木林生态系统凋落物分解量及养分释放规律. 见: 林业部科技司编. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994. 146 ~ 153.
- [41] 卢俊培, 刘其汉. 海南岛尖峰岭热带林凋落叶分解过程的研究. 林业科学研究, 1989, 2(1): 25 ~ 33.
- [42] 胡肄慧, 陈灵芝, 陈清朗, 等. 几种树木枯叶分解速率的试验研究. 植物生态学报, 1987, 11(2): 124 ~ 132.
- [43] 许新健, 陈金耀, 俞新妥. 武夷山六种杉木伴生树种落叶养分归还的研究. 福建林学院学报, 1995, 15(3): 213 ~ 217.
- [44] 屠梦照, 姚文华, 翁轰, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物的特征. 土壤学报, 1993, 30(1): 35 ~ 41.
- [46] 贾黎明, 方陆明, 胡延杰. 杨树刺槐混交林及纯林枯落叶分解. 应用生态学报, 1998, 9(5): 463 ~ 467.
- [47] 莫江明, 布朗, 孔国辉, 等. 鼎湖山生物圈保护区马尾松林凋落物的分解及其营养动态研究. 植物生态学报, 1996, 20(6): 534 ~ 542.