

长白山各植被带主要树种凋落物分解速率 及模型模拟的试验研究

郭忠玲^{1,*}, 郑金萍¹, 马元丹², 李庆康³, 于贵瑞³, 韩士杰⁴, 范春楠¹, 刘万德¹

(1. 北华大学林学院, 吉林市 132013; 2. 南京大学生物学院, 南京 210093;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要:2001~2003 年在长白山自然保护区内 3 个垂直植被带的典型群落红松阔叶林、云冷杉林和岳桦林内, 利用网袋埋藏法对群落内的 6 个主要优势乔木树种凋落物进行埋藏分解试验, 研究凋落物分解速率及其变化动态; 同时利用分解模型, 模拟预测凋落物的分解进展, 为深入研究这 6 个树种的营养策略、群落养分循环等奠定基础, 也为森林生态系统管理提供理论依据。研究表明, 所研究的 6 个树种凋落物都表现出随时间进程失重率增大的现象, 但失重率并不与时间呈线性相关。在分解的 638d(1.75a)后, 6 种叶凋落物的分解速率明显升高。到分解实验终止时(699d), 叶凋落物干重剩余率从小至大依次为白桦(24.56%)、紫椴(24.81%)、红松(38.48%)、鱼鳞云杉(41.15%)、岳桦(41.53%)和臭冷杉(42.62%)。枝凋落物分解速率明显低于叶, 枝干重剩余率从小至大依次为紫椴(44.98%)、臭冷杉(64.62%)、红松(72.07%)、鱼鳞云杉(73.51%)、白桦(77.37%)和岳桦(80.35%)。在同一海拔高度, 阔叶树种叶凋落物分解速率大于针叶树种。并且随着海拔的升高, 叶凋落物分解速率逐渐减慢。模型分析预测结果表明, 长白山北坡各垂直植被带的优势树种叶凋落物分解 95% 需 4.5~8.0a; 年分解系数为紫椴(0.686) > 白桦(0.624) > 红松(0.441) > 鱼鳞云杉(0.406) > 臭冷杉(0.397) > 岳桦(0.385); 枝凋落物分解 95% 需 7.8~29.3a, 不同树种间的差异明显。枝年分解系数为紫椴(0.391) > 臭冷杉(0.204) > 红松(0.176) > 鱼鳞云杉(0.157) > 白桦(0.148) > 岳桦(0.102)。

关键词:优势树种; 凋落物; 分解速率; 分解模型; 长白山

文章编号:1000-0933(2006)04-1037-10 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Researches on litterfall decomposition rates and model simulating of main species in various forest vegetations of Changbai Mountains, China

GUO Zhong-Ling^{1,*}, ZHENG Jin-Ping¹, MA Yuan-Dan², LI Qing-Kang³, YU Gui-Rui³, HAN Shi-Jie⁴, FAN Chun-Nan¹, LIU Wan-De¹

(1. Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, China; 2. Biology College of Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1037~1046.

Abstract: litter decomposition rates of dominant tree species were determined using litterbag burying method in three altitudinal belts of the Broad-leaved Korean Pine forest, Spruce-fir forest and Ermans Birch forest in Changbai Mountain nature reserve during a period of three years from 2001 to 2003. Spatial and temporal dynamics and impact of litter quality were examined with a simulation model for understanding the trophic strategy of main species and ecosystem circulation of material and promoty ecosystem based forest management. The results indicated that annual mass loss increased over time, following a non-linear pattern. The leaf

基金项目:中国科学院知识创新课题资助项目(CX0G-E01-02); 国家自然科学基金资助项目(30240084); 中国科学院知识创新课题资助项目(KZCX1-SW-01-03)

收稿日期:2005-07-28; **修订日期:**2006-02-10

作者简介:郭忠玲(1965~), 男, 博士, 教授, 主要从事森林生态系统结构和功能、生态恢复研究. E-mail: gzl65@163.com

Foundation item: The project was supported by the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (CAS) "(CX0G-E01-02 and KZCX1-SW-01)", the National Natural Science Foundation of China (No. 30240084).

Received date: 2005-07-28; **Accepted date:** 2006-02-10

Biography: GUO Zhong-Ling, Ph.D., Professor, mainly engaged in the forest ecosystem. E-mail: gzl65@163.com

decomposition of all major tree species accelerated after 683 day(1.75year). By the end of study period(699 day), the remaining dry weight of buried leaves from less to bigger was 24.56 for Asian White Birch(*Betula platyphylla*), 24.81% for Amur Linden(*Tilia amurensis*), 38.48% for Korean Pine(*Pinus koraiensis*), 41.15% for Yezo Spruce Cheng et L. K. Fu(*Picea jezoensis* var. *microsperma*), 41.53% for Ermans birch(*Betula ermanii*) and 42.62% for Khingan Fir(*Abies nephrolepis*). The decomposition rates of twigs were lower than those of leaves, and the remaining dry weight followed to order of AL(44.98%) < KF(64.62%) < KP(72.07%) < YS Cheng et L. K. Fu(73.51%) < AWB(77.37%) < E B(80.35%). At the same altitude, the decomposition rates of broad-leaved litterfall were higher than those of conifer's. Among different altitude, decomposition decreased with the increase elevation.

The modelly analysis suggested that 95% decomposition of leaves takes about 4.5 to 8.0 years for major tree species in the three altitudinal belts. Annual leaf decomposition rates (k) 0.686 for AL, 0.624 for AWB, 0.441 for KP, 0.406 for YS Cheng et L. K. Fu, 0.397 for KF and 0.385 for EB. The 95% decomposition for twig ranged from 7.8 to 29.3 years, with large differences among different species. The annual decomposition rate (k) for twigs from high to low was 0.391 for AL, 0.204 for KF, 0.176 for KP, 0.157 for YS Cheng et L. K. Fu, 0.148 for AWB and 0.102 for EB.

Key words: dominant tree species; litterfall; decomposition rate; decomposition model; Changbai Mountain

凋落物的分解不仅是森林生态系统内养分循环的关键过程之一^[1],也是森林生态系统生物地球化学循环的重要环节,其在维持土壤肥力,保证植物再生长养分的可利用性,促进森林生态系统正常的物质生物循环和养分平衡方面起着重要的作用,也是土壤动物、微生物的能量和物质的来源。根据研究,估计植物凋落物分解过程中每年释放的营养元素可满足 69%~87% 的森林生长所需量^[2]。凋落物分解速率的高低在很大程度上决定了一个生态系统(尤其是森林生态系统)生产力高低和生物量大小^[3,4]。

早在 1876 年,德国的 E. Ebermayer 就开始研究凋落物在养分循环中的作用。此后国外许多学者对世界范围内凋落物的分解及养分释放进行了大量报道。有关森林生态系统凋落物分解的研究在中国直到 20 世纪 80 年代以后才逐渐有所报道,并且多集中于叶凋落物的分解研究^[4]。

长期以来,国内外的研究者对影响凋落物分解的生物环境、非生物环境及凋落物的基质质量等因素进行了深入的研究^[4-13]。目前,凋落物分解的研究一方面在继续探讨分解时的养分动态、分解与凋落物质量、生境、生物以及气候之间的关系^[14-17],另一方面又将分解与一些环境热点问题结合起来,如多样性丧失对凋落物分解过程的影响^[13,18,19]以及凋落物分解在碳循环和氮循环中的作用^[20]等。

近年来一些研究者对长白山自然保护区中的原始森林生态系统凋落物分解、凋落物对土壤 CO₂ 及 N₂O 释放通量的影响^[21,22]及高山冻原生态系统的凋落物养分归还功能和养分含量空间分布^[23,24]等方面的研究开展了调查和研究,取得了一定进展,但针对长白山主要植被类型中的凋落物分解及比较分析方面研究的极少^[24]。本研究以长白山北坡不同海拔梯度分布的红松阔叶林、云冷杉林和岳桦林中的优势树种为对象,通过野外模拟实验的方法研究树种、海拔等因素对凋落物分解的影响及其变化规律,从而为深入研究优势种的营养策略、群落养分循环、森林生态系统管理以及森林对 CO₂ 的调节作用等提供理论参考依据。

1 研究地点自然概况

长白山自然保护区位于吉林省东南部安图、抚松和长白三县境内,地理坐标为 41°42'45"~42°45'18"N, 127°33'30"~128°16'48"E,年平均气温在 4.9~7.3℃,年雨量 600~900mm。本研究地点位于保护区北坡,由于海拔高度的上升导致小气候变化,在不同海拔梯度上形成了不同的森林类型,其中海拔 500~1100m 分布着红松阔叶林群落,1100~1800m 为云冷杉林群落,1800~2000m 为亚高山岳桦林。各实验样地的具体气候指标见表 1^[25]。

红松阔叶林群落主要乔木为红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、色木槭(*Acer mono*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)、枫桦(*Betula costata*)等,林分郁闭度 0.8;主要灌木为毛榛子(*Corylus mandshurica*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、东北溲疏(*Deutzia amurensis*)、刺五加(*Eleutherococcus*

senticosus)等;主要草本为山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)、单穗升麻(*Cimicifuga simplex*)、透骨草(*Phryma leptostachya*)、水金凤(*Impatiens nolitangere*)等;土壤类型为暗棕色森林土。

表 1 长白山北坡沿海拔变化的气候指标^[25]

Table 1 Climate index along altitude gradient in the northern slope of Changbai Mountain									
植被类型 Community type	海拔 Altitude (m)	年均温 Annual average temperature (℃)	年降水 Annual average rainfall (mm)	6~9 月份 降水 Rainfall (mm)	干燥指数 Dryness index	湿润指数 Wetness index	1 月份均温 Average temperature in Jan. (℃)	7 月份均温 Average temperature in Jul. (℃)	积雪日数 Snow day (d)
BIKp	740	2.52	688.96	489.97	0.65	2.03	- 17.52	19.29	133.51
Sf	1350	- 0.50	854.81	607.93	0.46	3.89	- 19.37	16.01	174.92
EB	1996	- 3.33	1074.04	763.83	0.33	5.86	- 21.10	12.92	218.77

注:BIKp 红松阔叶林 Broad-leaved Korean Pine forest;Sf 云冷杉林 Spruce-fir forest; EB 岳桦林 Ermans Birch forest. 以下同 the same below

云冷杉林带由于其跨度较大,根据植被类型由高海拔到低海拔依次可分为苔藓岳桦云杉林、山地中部暗针叶林、苔藓红松云杉林,本研究地设在山地中部暗针叶林,该地主要乔木为鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)等,林分郁闭度 0.9 以上;主要灌木为花楷槭(*Acer ukurunduense*)、蓝靛果忍冬(*Lonicera edulis*)、瘤枝卫矛(*Evonymus pauciflorus*)等;主要草本为二叶舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、羊胡子苔草(*Carex callitrichos*)兴安一枝黄花(*Solidago virga-aurea* var. *dahurica*)、林奈草(*Linnaea borealis*)等;土壤类型为棕色针叶林土。

岳桦林主要乔木为岳桦(*Betula ermanii*),混有少量耐寒的长白落叶松(*Larix olgensis*)和花楸(*Sorbus amurensis*)等,林分郁闭度 0.7;林下灌木有蓝靛果忍冬(*Lonicera edulis*)、牛皮杜鹃(*Rhododendron chrysanthum*)、笃斯越橘(*Vaccinium uliginosum*)、松毛翠(*Phyllodoce caerulea*)等。草本植物主要有耳叶蟹甲草(*Cacalia auriculata*)、细叶地榆(*Sanguisorba tenuifolia*)等;土壤类型为山地生草森林土。

2 研究内容与方法

2001 年 10 月初,于红松阔叶林、云冷杉林和岳桦林中分别收集优势树种的当年枝叶凋落物。其中紫椴、白桦和红松凋落物在红松阔叶林收集,臭冷杉和鱼鳞云杉凋落物在云冷杉林收集(由于臭松和鱼鳞云杉的叶凋落物在林地里极难辨别,故收集仍宿存于小枝上的叶凋落物),岳桦凋落物在岳桦林收集。首先将收集的每种凋落物充分混合后,于 60℃烘干 12h,用电子天平分别各树种凋落物称取叶凋落物 10g 左右、枝凋落物 20g 左右装入 15×15cm² 孔径为 1mm 的尼龙网袋中。每种凋落物 36 个分解袋。另取各种凋落物的部分样品于 80℃烘干 24h 至恒重,测定含水率,并进行凋落物化学成分初始含量的测定。在 2001 年 10 月初将各树种样品分解袋同时放入原取样样地内,设立 3 个区组,每个区组 12 袋。放置时贴近土表,尽量模拟凋落物分解的自然状况。

在 2002 和 2003 年的 5、7、9 月末,定时在每个区组收集 2 袋分解样品。取回后仔细洗净分解剩余凋落物表面沾的泥沙,剔除长入分解袋内的根系,于 80℃烘干至恒重。测定剩余凋落物的重量后粉碎,进行全 N、全 P、全 K、C、木质素、灰份、综纤维素等的测定。

3 结果与分析

3.1 不同树种凋落物的分解动态

到本次分解实验结束时 699d(1.92a),3 个群落的 6 种种叶凋落物、枝凋落物随时间进程失重率有逐渐增大的趋势(见图 1、图 2)。

从图 1 中可以看出,叶凋落物最终干重剩余率从小至大依次为白桦(24.56%)、紫椴(24.81%)、红松

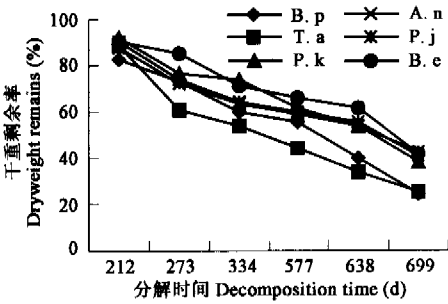


图 1 叶凋落物分解干重剩余率动态

Fig.1 Dynamic of dry weight remain rate of leaf litter decomposition
B.p 白桦(*Betula platyphylla*); T.a 紫椴(*Tilia amurensis*); P.k 红松(*Pinus koraiensis*); A.n 臭冷杉(*Abies nephrolepis*); P.j 鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*); B.e 岳桦(*Betula ermanii*); 以下同 the same below.

(38.48%)、鱼鳞云杉(41.15%)、岳桦(41.53%)和臭冷杉(42.62%),其中白桦、紫椴叶凋落物剩余量较低,而其它树种叶凋落物相对较高。不同树种枝分解速率明显低于叶(见图2)。凋落物分解的699d(1.92a)中3个群落的6种枝凋落物随时间剩余率减小。到分解实验结束时(699d),除椴树枝凋落物较低外,其它相差相对较小。枝凋落物干重剩余率从小至大依次为紫椴(44.98%)、臭冷杉(64.62%)、红松(72.07%)、鱼鳞云杉(73.51%)、白桦(77.37%)和岳桦(80.35%)。

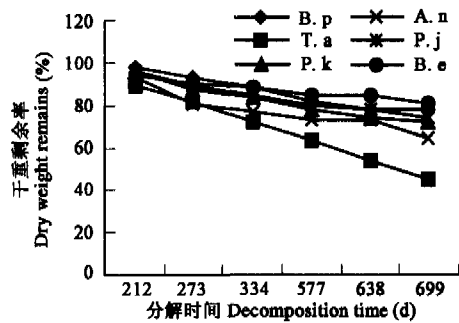


图2 枝凋落物分解剩余率动态

Fig.2 Dynamic of dry weight remain rate of twig litter decomposition

凋落物的分解过程是将生物大分子降解为无机小分子,最后大部分转化为 CO_2 和 H_2O ,只剩下少量的腐殖质进入土壤。森林凋落物的分解既有物理过程,又有生物化学过程,一般由淋溶作用、自然粉碎作用、代谢作用等共同完成^[26]。很多研究成果表明凋落物在淋溶、粉碎、代谢这3个同时发生的分解过程中,易溶、易分解的物质在开始较短的时间内迅速分解,剩下的相对较难分解的物质使凋落物随时间变化趋向相对稳定,分解缓慢。Berg认为,凋落物的分解至少经历两个过程的变化,即营养控制阶段和纤维素控制阶段^[26]。第一阶段,凋落物分解速率较快,而第二阶段则较慢,直到靠近一个极限值,几乎不分解了。开始分解快是因为易分解的碳水化合物的损失,后来分解速率减慢是因为难分解的纤维素、单宁等物质的积累^[4,27,28]。

显然,凋落物分解是一个复杂的过程,受到诸多因素的影响,但通过本实验的结果可以看出,在同一群落内气候、生物非生物条件基本均质的情况下,阔叶树种叶凋落物分解速率大于针叶树种,同时随着海拔的升高,叶凋落物分解速率逐渐减慢,枝凋落物分解速率树种的影响要比海拔的影响大。

3.2 凋落物分解的时间动态

凋落物在分解过程中,不同季节失重率增加的快慢也有较大差异(见图3、4)。

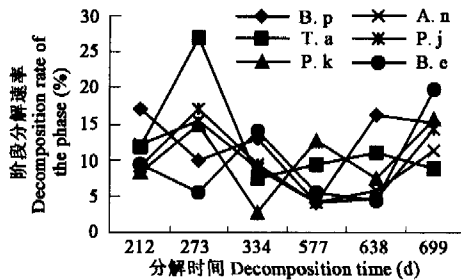


图3 叶凋落物阶段分解速率

Fig.3 Leaf decomposition rate of the period time(%)

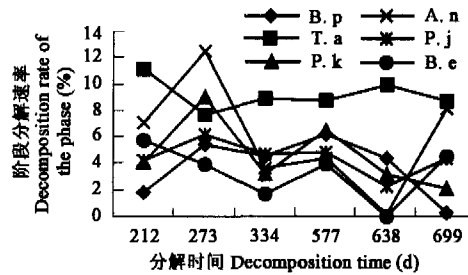


图4 枝凋落物阶段分解速率

Fig.4 Twig decomposition rate of the period time(%)

虽然分解开始的212d(2001年10月~2002年5月)正值长白山严寒的冬季,但白桦叶凋落物的失重率明显较其它树种高,在分解699d时干重损失最多,这可能主要与它的基质质量有关。紫椴、红松、臭冷杉和鱼鳞云杉叶凋落物在212~273d(2002年5~7月)的失重率较快,可能与该段时间雨量相对较多、相对湿度和温度都较高有关(见表1)。岳桦叶凋落物在273~334d(2002年7~9月)分解较快,而前期分解较慢可能与海拔较高(1996m)、7月之前温度过低有关。在分解开始的334d里,臭冷杉和鱼鳞云杉叶凋落物的分解速率高于红松,此后红松的分解速率又快于这两个树种。

在分解的638d(1.75a)后,6种叶凋落物的分解速率明显升高。这有可能是由于在分解实验终止(即分解1.92a)时各叶凋落物还并未进入缓慢的纤维素控制分解阶段,仍处于分解速率波动较大时期,但这个假设还有待于进一步实验的证实。

不同阶段的枝凋落物分解速率有差异(见图4),紫椴枝凋落物在分解开始的212d(2001年10月~2002年5月)分解最快,与其他树种的枝相比在整个实验过程中一直保持较高的分解速率,并且分解699d时干重损失最多。由于白桦与紫椴生长和凋落物分解的外界环境基本相同,可见紫椴枝的快速分解主要因素取决于本身的凋落物质量。白桦、红松、臭冷杉和鱼鳞云杉枝凋落物在212~273d(2002年5~7月)的失重率较快。这与该段时间雨量较多、相对湿度和温度都较高有关(见表1)。岳桦叶凋落物在212d即分解(2002年5月)分解较快。臭冷杉、鱼鳞云杉和岳桦在分解的577~638d(2003年5~7月)分解速率达最低值。

3.3 凋落物分解速率的模型模拟

凋落物的分解是一个复杂的动态过程,为进一步验证不同林分叶凋落物分解时重量损失的变化情况,普遍采用Olson提出的负指数衰减模型^[29] $X/X_0 = e^{-kt}$,式中 t 为时间,通常以年表示, X_0 为凋落物的初始重量, X 为 t 时刻的凋落物残留重量, k 为年分解速率($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)。但在实际应用中,多用 $y = ae^{-kt}$ 来描述^[4],式中 y 为重量残留率(%),其中 a 为拟合参数, k 即为年腐解系数,通常又称为分解系数($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)。

根据Olson模型,构造出本研究中各凋落物分解残留率随时间的指数回归方程。利用该模型对凋落物分解50%时所需时间即半分解时间和分解95%时所需时间进行估测结果见表2。

表2 叶凋落物分解残留率(%)随时间的指数回归方程

Table 2 Equation of litter decomposition remains

凋落物种类 Species	回归方程 Equation	相关系数 Correlation efficiency(R^2)	分解系数 Decomposition rate	半分解时间 Time of half decomposition (a)	分解95%所需时间 Time of 95% decomposition(a)
B.p	$y = 111.24e^{-0.6242x}$	0.844	0.624	1.281	4.970
B.p	$y = 102.61e^{-0.1482x}$	0.952	0.148	4.851	20.388
T.a	$y = 108.98e^{-0.6857x}$	0.923	0.686	1.136	4.494
T.a	$y = 105.97e^{-0.3912x}$	0.937	0.391	1.920	7.806
P.k	$y = 108.97e^{-0.4414x}$	0.886	0.441	1.765	6.982
P.k	$y = 101.13e^{-0.1759x}$	0.960	0.176	4.004	17.095
A.n	$y = 101.01e^{-0.3966x}$	0.913	0.397	1.773	7.579
A.n	$y = 98.66e^{-0.2044x}$	0.898	0.204	3.325	14.590
P.j	$y = 103.09e^{-0.4057x}$	0.885	0.406	1.784	7.459
P.j	$y = 101.09e^{-0.1567x}$	0.959	0.157	4.493	19.187
B.e	$y = 107.41e^{-0.3853x}$	0.835	0.385	1.985	7.961
B.e	$y = 99.13e^{-0.1018x}$	0.953	0.102	6.723	29.342

从表2可以看出,6种叶凋落物年分解系数的变化范围为0.385~0.686,分解最快的是紫椴凋落叶,其分解一半所需的时间是1.136a,分解95%需要4.494a;其次是白桦凋落叶,分解一半所需的时间是1.281a,95%被分解需要4.970a;分解最慢的是岳桦凋落叶,其分解一半所需的时间是1.985a,分解95%需7.961a。

由于紫椴、白桦和红松的凋落物分解环境相同(红松阔叶林内),因而分解速率差异的主要因素与凋落物的质量和叶的结构特征有关。臭冷杉和鱼鳞云杉凋落物分解所处的外界环境相近,分解速率相差不大,分解95%所需的时间分别为7.579a和7.459a,但它们的分解慢于红松(分解95%所需的时间分别为6.982a),其中原因可能还与海拔变化有关。岳桦叶凋落物分解最慢是外界环境和自身化学组成的双重不利因素综合作用的结果。一些研究结果显示,长白山自然保护区内土壤动物的种数、个体数、生物量和某种活跃的微生物的菌数^[23,30]随着海拔的升高而下降。而且在土壤动物和微生物的多样性之外,仅为-3.33℃年均温度也降低了土壤生物的活性。

长白山北坡各垂直植被带的优势树种叶凋落物分解95%需4.5~8.0a,与陈永亮等对东北帽儿山地区的胡桃楸和落叶松凋落物分解的研究类似,在他的研究中发现胡桃楸和落叶松分解95%所需时间分别为4.1a和11.5a^[31]。

此外,从表3可以看出6种枝凋落物年分解系数的变化范围为0.102~0.391,分解最快的是紫椴枝,其分解一半所需的时间是1.920a,分解95%需要7.806a,其次是臭冷杉枝,分解一半所需的时间是3.325a,95%被分解需要14.590a;分解最慢的是岳桦枝,其分解一半所需的时间是6.723a,分解95%时间需29.342a。紫椴枝

分解速度快首先是由于它所在的红松阔叶林的水热条件要比处于云冷杉林的臭冷杉和鱼鳞云杉及处于亚高山岳桦林的岳桦枝更有利于分解活动的进行。岳桦枝凋落物的分解最慢主要是不利于分解的环境条件导致的。但是臭冷杉枝的分解速率仅次于紫椴,白桦枝的分解速率仅高于岳桦,其机理还不清楚,尚需进一步的调查分析。

综合来看,长白山北坡各垂直植被带的优势树种枝凋落物分解 95% 需要 7.8 ~ 29.3a,不同树种间的差异明显。

在凋落物分解的研究中,由于 Olson 提出的负指数衰减模型的广泛应用,很多中国学者分析了由此模型模拟得出的年分解系数 k 。表 3 为本研究及国内相关部分文献中有关凋落物年分解系数、半分解时间和分解 95% 所需时间的资料。

表 3 不同森林类型凋落物年分解系数比较
Table 3 The decomposition rates of litter of varied forest communities

气候带 Climate zone	森林类型 Forest type	试验地 Site	年分解系数 Decomposition rate	半分解时间 Time of half decomposition (a)	分解 95% 时间 Time of 95% decomposition (a)	文献 References	备注 Remark
寒温带	红松阔叶林	长白山北坡	0.584	1.4	5.5	本文	叶
寒温带	云冷杉林	长白山北坡	0.400	1.8	7.5	本文	叶
寒温带	亚高山岳桦林	长白山北坡	0.385	2.0	8.0	本文	叶
寒温带	红松阔叶林	长白山北坡	0.240	3.6	15.1	本文	枝
寒温带	云冷杉林	长白山北坡	0.181	3.9	16.9	本文	枝
寒温带	亚高山岳桦林	长白山北坡	0.100	6.7	29.3	本文	枝
寒温带	胡桃楸纯林	黑龙江帽儿山	0.375	0.5	4.1	陈永亮等 ^[31] , 2004	叶
寒温带	落叶松纯林	黑龙江帽儿山	0.130	1.5	11.5	陈永亮等, 2004	叶
寒温带	胡桃楸与落叶松混交林	黑龙江帽儿山	0.235	0.8	6.2	陈永亮等, 2004	叶
亚热带	亚高山人工云杉林 30a	川西地区	0.280	2.5		林波等 ^[32] , 2003	
亚热带	亚高山人工云杉林 40a	川西地区	0.260	2.7		林波等, 2003	
亚热带	亚高山云杉次生林	川西地区	0.460	1.5		林波等, 2003	
亚热带	亚高山云杉原始林	川西地区	0.395	1.8		林波等, 2003	
亚热带	18 年生杉木林	广西田林老山	0.330			梁宏温 ^[33] , 1993	叶
亚热带	18 年生杉木林	广西田林老山	0.206			梁宏温, 1993	枝
亚热带	18 年生杉木林	广西田林老山	0.240			梁宏温, 1993	果
亚热带	24 ~ 28 年生杉木林	广西龙胜里骆	0.499			温肇穆 ^① , 1990	叶
亚热带	24 ~ 28 年生杉木林	广西龙胜里骆	0.420			温肇穆, 1990	枝
亚热带	24 ~ 28 年生杉木林	广西龙胜里骆	0.417			温肇穆, 1990	果
亚热带	8 年生杉木林	福建尤溪	0.520			马祥庆等 ^[15] , 1997	叶
亚热带	8 年生杉木林	福建尤溪	0.275			马祥庆等, 1997	枝
亚热带	8 年生杉木林	福建尤溪	0.340			马祥庆等, 1997	果
亚热带	池杉林网	广东崖南围垦区	1.071			周毅 ^[34] , 2003	
亚热带	黄果厚壳桂群落	鼎湖山	1.070			蚁伟民等 ^[35] , 1994	
亚热带	原始云杉林	四川理县米亚罗林区	0.460	2.5	10.85	庞学勇等 ^[36] , 2004	
亚热带	次生桦木林	四川理县米亚罗林区	0.390	2.7	11.5	庞学勇等, 2004	
亚热带	30a 人工云杉林	四川理县米亚罗林区	0.280	1.5	6.5	庞学勇等, 2004	
亚热带	40a 人工云杉林	四川理县米亚罗林区	0.260	1.8	7.6	庞学勇等, 2004	
亚热带	27a 生杉木林	福建三明	0.769	0.9	3.9	何宗明等 ^[37] , 2003	叶
亚热带	27a 生杉木林	福建三明	0.250	2.8	1.7	何宗明等, 2003	枝
亚热带	25a 生杉木林	福建南平	1.475			林开敏 ^[19] , 2001	带叶小枝
亚热带	常绿阔叶林	浙江天童	0.558 ~ 6.280	1 ~ 4		王希华, 2004	叶
亚热带	常绿阔叶林	浙江天童			3.7	张庆费等, 1999	
热带	山地雨林	海南岛尖峰岭	0.836 ~ 1.597			卢俊培等 ^[38] , 1994	
热带	半落叶季雨林	海南岛尖峰岭	1.578 ~ 2.172			卢俊培等, 1994	

① 刘东霞. 万木林主要群落凋落物的动态研究. 南坪: 福建农林大学硕士论文, 2004

不同气候带的植物由于凋落物质量和环境的差异,必然在分解速率上表现出一定的差异。由表 3 可见,随着纬度的增加,凋落物的年分解系数有逐渐减小的趋势,但因各群落组成的很大差异,趋势并不十分明显。在同一气候带,阔叶树种群落的 k 值大于针叶树种群落。很多研究成果报道的是枝叶混和凋落物的分解情况,而本研究是将枝叶分别进行分解分析,这给横向比较造成了一定困难。总的看来,长白山地区所处的纬度较高,凋落物的分解系数较小,半分解及分解 95% 所需时间较长。

3.4 凋落物年失重率

凋落物分解速率的早期研究,多集中于测定特定群落凋落物的失重率或腐解率。陈灵芝等研究了英国 Hampsfell 碳岩地区蕨菜草地生态系统中的凋落物,其 10 个月的失重率为 22%,这是中国国内有关凋落物分解速率的最早报道^[4]。现将本研究及所查阅国内部分文献中有关凋落物年失重率的资料整理如表 4。

表 4 各种森林类型的年失重率比较
Table 4 The annual mass loss rates of litters of varied forest communities

气候带 Climate zone	森林类型 Forest type	试验地点 Site	年失重率 Annual mass loss rate(%)	文献 References	备注 Remark
寒温带	红松阔叶林	长白山北坡	38.48	本文	叶
寒温带	云冷杉林	长白山北坡	31.67	本文	叶
寒温带	亚高山岳桦林	长白山北坡	26.93	本文	叶
寒温带	红松阔叶林	长白山北坡	18.35	本文	枝
寒温带	云冷杉林	长白山北坡	16.58	本文	枝
寒温带	亚高山岳桦林	长白山北坡	10.47	本文	枝
寒温带	胡桃楸纯林	黑龙江帽儿山	61.50	陈永亮等,2004	
寒温带	胡桃楸与落叶松混交林	黑龙江帽儿山	40.90	陈永亮等,2004	
寒温带	落叶松纯林	黑龙江帽儿山	24.70	陈永亮等,2004	
温带	人工油松林和栓皮栎林	北京西山	21.84	胡肆慧等 ^[39] ,1986	
亚热带	亚高山人工云杉林 30a	川西地区	24.35	林波等,2003	
亚热带	亚高山人工云杉林 40a	川西地区	22.87	林波等,2003	
亚热带	亚高山云杉次生林	川西地区	36.96	林波等,2003	
亚热带	亚高山云杉原始林	川西地区	32.23	林波等,2003	
亚热带	马尾松林	广西	33.03	梁宏温等,1991	
亚热带	杉木幼林	福建龙溪	39.73	马祥庆等,1997	
亚热带	池杉林网	广东崖南围垦区	57.48	周毅,2003	
亚热带	19a 生杉木林	广西田林老山	44.50	梁宏温 ^[40] ,1993	
亚热带	黄果厚壳桂群落	鼎湖山	70.20	蚁伟民等,1994	
亚热带	27a 生杉木林	福建三明	53.66	何宗明等 ^[37] ,2003	叶
亚热带	27a 生杉木林	福建三明	22.13	何宗明等,2003	枝

枝凋落物的年失重率明显小于叶凋落物。并且随着纬度增加,凋落物的年失重率有逐渐变小的趋势。阔叶林凋落物年失重率大于针叶林,并且寒温带阔叶林小于亚热带阔叶林,表明了凋落物的分解与纬度间的相关性。所调查 6 种叶凋落物年失重率介于 10% ~ 20% 之间,枝凋落物介于 25% ~ 40% 之间。

4 结论和讨论

通过实验,可以发现阔叶树种凋落物分解速率大于针叶树种。叶分解速率在分解初期达最大值,随后变缓,分解 1.75a 后分解速率又开始增快;而枝分解速率明显低于叶。随着海拔的升高,凋落物分解速率逐渐减慢。叶凋落物年分解系数为紫椴(0.686) > 白桦(0.624) > 红松(0.441) > 鱼鳞云杉(0.406) > 臭冷杉(0.397) > 岳桦(0.385),枝年分解系数为紫椴(0.391) > 臭冷杉(0.204) > 红松(0.176) > 鱼鳞云杉(0.157) > 白桦(0.148) > 岳桦(0.102)。叶 95% 分解的年限最短为紫椴(4.494a),最长岳桦(7.961 a);枝 95% 分解的年限最短为紫椴(7.806a),最长为白桦(29.342a)。不同气候带的植物由于凋落物质量和环境的差异,必然在分解速率上表现出一定的差异。随着纬度的增加,凋落物的年失重率逐渐减小。所调查 6 种叶凋落物年失重率介于 10% ~ 20% 之间,枝凋落物介于 30% ~ 40% 之间。本研究在进行凋落物的基质质量和分解系数的相关分析中发现,不同树种间的枝或叶分解速率的差别与初始化学组分含量无显著的相关性。

本研究中表 3 和表 4 显示,随着纬度的升高,凋落物分解速率及凋落物的失重率逐渐减慢。通常温度高、

湿度大的条件下,群落内微生物及酶的活性大,凋落物分解得较快^[41]。表3和表4中所列的国内的研究结果已证明了这一点。代力民等^[42]对长白山的凋落物在不同群落的研究结果显示,红松阔叶林月平均气温最高,其次是云冷杉林,云冷杉岳桦林,岳桦林,最低的是高山苔原带。在红松阔叶林中,5月份平均气温为9.7℃,7月为18.9℃,而高海拔的苔原带6月份平均气温才达6.9℃,7月仅为11.3℃。因此,在红松阔叶林带红松针叶分解快,主要是由于该带生长季气温高于其它各带。同时他的研究结果表明不同海拔的各植被带月平均湿度有相似性,生长期各地带降雨量充足,说明湿度对红松分解速度的影响不大。

在本研究中,臭冷杉和鱼鳞云杉叶凋落物在分解开始的334d里分解速率高于红松。臭冷杉枝的分解速率仅次于紫椴,白桦枝的分解速率仅高于岳桦,其机理还不清楚,尚需进一步的调查分析。可见,长白山凋落物分解速率受诸多因素影响,其变化特征是这些因素综合作用的结果,目前的研究手段和技术还有待于进一步改进,凋落物分解的复杂过程和理论还有待于更全面和深入的探讨。

一般认为,凋落物的分解速率主要决定于凋落物分解的生物、非生物环境和凋落物的质量。由于土壤动物和微生物参与凋落物分解的过程,有利于提高土壤生物生长和活动的条件将会促进凋落物分解速率。因此由海拔高度不同引起的土壤的水热条件差异将在一定程度上通过影响微生物活动来控制凋落物的分解速率。根据黄锡畴等^[45]对长白山森林生态系统的化学环境背景研究结果显示,长白山北坡土壤动物种数、个体数、生物量,在4个垂直景观带的分布,皆随海拔高度的增加而递减。许光辉等^[44]年对长白山自然保护区森林土壤微生物分布的研究表明微生物特别是芽孢杆菌(芽孢杆菌在自然界中分布甚广,是土壤中较活跃的常见细菌类群之一。它们积极参与土壤有机质的分解和合成,在物质转化,特别是含氮有机物的氨化等重要过程中起着重要作用。)的数量有较明显的垂直带性分布,菌数随海拔上升而下降。据土壤生物生物量随海拔升高而降低的趋势,可以解释随着海拔的升高,叶凋落物分解速率逐渐减慢,但枝凋落物的分解却没有表现出这一规律。可见由于海拔升高造成的分解水热条件的改变在这6种叶凋落物的分解进程中是主要的影响因子,对于这6种枝凋落物却不然。那么究竟是枝凋落物的基质质量对分解的影响程度大于外界环境的影响,还是复杂的内因外因综合作用的结果使然,还需要进一步的研究探讨。

在气候、生物、非生物条件基本均质的情况下,阔叶树种叶凋落物分解速率大于针叶树种。根据王希华的研究^[13],叶凋落物分解还受SLA(比表面积)的影响,SLA大则意味单位重量的叶凋落物和地表接触的面积就越大,因而也就有利于更多的土壤微生物在其上定居而加速凋落物的分解。同时,SLA小往往意味着叶片较厚,角质类物质多,这不利于降雨淋溶、土壤动物的机械破坏,也不利于菌丝的入侵。所以阔叶树种与针叶树种SLA的差异,可能是引起分解速率相差很大的主要原因。

关于对样品烘干处理的疑问,分为两个方面。首先本实验在凋落物埋于林内之前为准确称重进行了烘干处理(于60℃烘箱,12h)。虽然在利用分解袋法研究凋落物分解的实验中,有一些研究者进行了这一处理^[45,46],但是烘干是否会对凋落物的质量造成影响还不清楚。另一方面,在分解袋取回在称重前几乎都需要对其进行烘干至恒重再称量剩余量。这时的烘干处理是否会给接下来的凋落物养分分析带来系统误差,仍不清楚。所以关于烘干处理是否会影响凋落物的化学组成还需进一步的研究。

References:

- [1] Swift M J, Heal O W, Andreason J M. Decomposition in terrestrial ecosystem. Berkley, California: University of California Press, 1979.
- [2] Warning R H, Schlesinger W H. Forest ecosystems: concepts and management. New York: Academic Press, 1985. 181 ~ 210.
- [3] Adrien C F, Andrew S A., Evan H D, et al. Forest litter production, chemistry, and decomposition following two years of free-air CO₂ enrichment. Ecology, 2001, 82(2): 470 ~ 484.
- [4] Huang J H, Chen L Z, Han X G. Advances in the studies of forest litter decomposition. In: Advance in plant sciences. Beijing: Higher Education Press, 1998. 218 ~ 316.
- [5] Harmon M E. Coarse woody debris in mixed-conifer forests, Sequoia National Park, California. Can. J. For Res, 1987, 17: 1265 ~ 1272.
- [6] Harrison A F. The inhibitory effect of oak leaf litter tannins on the growth of fungi, in relation to litter decomposition. Soil Biol. Biochem., 1971, 3: 167 ~ 172.
- [7] Hornsby D C, Lockaby B G, Chappelka A H. Influence of microclimate on the decomposition in loblolly pine stands: a field micocosm approach. Canadian

- Journal of Forest Research, 1995, 25: 1570 ~ 1577.
- [8] Moorhead D L, Reynolds J F. Mechanisms of surface litter mass loss in the northern Chihuahuan desert: a reinterpretation. J. Arid. Environ., 1989, 16: 157 ~ 163.
 - [9] O'neill E G, Johnson D W, Ledford J, et al. Acute seasonal drought does not permanently alter mass loss and nitrogen dynamics during decomposition of red maple (*Acer rubrum* L.) litter. Global Change Biology, 2003, 9: 117 ~ 123.
 - [10] Pauli F. Dynamics of organic matter in soils. Plant Soil, 1984, 76: 275 ~ 285.
 - [11] Reid I D. Nutritional regulation of synthetic lignin (DHP) degradation by *Phlebia* (*Merulius*) *tremellosa*: effect of nitrogen. Can. J. Bot., 1991, 69: 156 ~ 160.
 - [12] Schaefer D, Steinberger Y, Whitford W G. The failure of nitrogen and lignin control of decomposition in a North American desert. Oecologia (Berlin), 1985, 65: 382 ~ 386.
 - [13] Wang X H, Huang J J, Yan E R. Leaf litter decomposition of common trees in Tiantong. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(4): 457 ~ 467.
 - [14] Cheng Y. Study on litter-fall decomposing dynamic and nutrients Releasing Rule of *Phoebe bournei*. Nanping: Graduate thesis of Fujian Agriculture & Forestry University, 2003.
 - [15] Ma X Q, Li A Q, He Z Y, et al. The litter and its decomposition in young Chinese fir plantation ecosystem. Acta Phytocologica Sinica, 1997, 21(6): 564 ~ 570.
 - [16] Liu W Y, Liu L H, Jing G F, et al. Decomposition of leaf litter in *Pinus yunnanensis* forest and Evergreen Broad-leaved forest in central Yunnan. Acta Botanica Yunnanica, 2000, (22): 298 ~ 306.
 - [17] Qi Z M, Wang K Y, Song G Y, et al. Bio-chemical properties of forest floor in subalpine bamboo communities in western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1230 ~ 1236.
 - [18] Liao L P, Gao H, Wang S L, et al. The effect on nitrogen addition on soil nutrient leaching and the decomposition of Chinese fir leaf litter. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(1): 34 ~ 39.
 - [19] Lin K M, Hong W, Yu X T. Decomposition interaction of mixed litter between Chinese fir and various accompanying plant species. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 21(3): 321 ~ 325.
 - [20] Xiao D M, Wang M, Ji L Z, et al. Variation characteristics of soil N_2O emission flux in broad-leaved *Korean pine* forest of Changbai Mountain. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 46 ~ 52.
 - [21] Lin L S, Han S J, Wang Y S, et al. Soil CO_2 flux in several typical forests of Changbai Mountain. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 42 ~ 45.
 - [22] Xiao D M, Wang M, Ji L Z, et al. Soil N_2O and CH_4 fluxes in broad-leaved *Korean pine* forest of Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1855 ~ 1859.
 - [23] Wei J, Wu G, Deng H B. Spatial variations in nutrient accumulations within the tundra zone Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2360 ~ 2366.
 - [24] Yang L Y, Li W H. The underground root biomass and C storage in different forest ecosystems of Changbai Mountains in China. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 204 ~ 209.
 - [25] Hao Z Q, Guo S L, Cao T. Plant diversity and distribution patterns in Changbai Mountain. Liaoning. Technology Publishing Company of Liaoning, 2002. 4 ~ 9.
 - [26] Berg B, Berg M P, Bottner P, et al. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: Some relationships with climate and litter quality. Biogeochemistry, 1993, 20: 127 ~ 159.
 - [27] Moroni M T, Smethurst P J. Litterfall nitrogen and phosphorus fluxes in two *Tasmanian Eucalyptus nitens* plantations. Tasforests, 2003, 14: 53 ~ 64.
 - [28] Mo J M, Xue H, Fang Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7): 1413 ~ 1420.
 - [29] Ma Z G, Wang J X. Studies on the forest litters dynamics of the environment inhabited by the giant panda. Journal of Botany and Geography, 1993, 5(2): 45 ~ 49.
 - [30] Wei J, Wu G, Deng H B. Researches on nutrient return of litterfall in the alpine tundra ecosystem of Changbai Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2211 ~ 2216.
 - [31] Chen Y L, Li S L. Study on the decomposition and nutrient return of the leaf litter under the pure and mixed plantations of *Juglans mandshrica* and *Larix gmelinii*. Forestry Science & Technology, 2004, 29(5): 9 ~ 12.
 - [32] Lin B, Liu Q, Wu Y, et al. Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in subalpine coniferous forests of western Sichuan. Appl Environ Biol, 2003, 9(4): 346 ~ 351.
 - [33] Liang H W. Studies on litterfall dynamics of the planted Chinese fir forest in mid-altitude of Laoshan Mountain in Tianlin. Journal of Botany and Geography, 1991, 17(2): 155 ~ 163.
 - [34] Zhou Y, Gan X H, Li Y W. Study on litterfall in forest network of *Taxodium ascendens* in Pearl River Delta. Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition), 2003, 24(2): 19 ~ 21.
 - [35] Yi W M, Ding M K, Zhang Z P, et al. Litter mass and its nitrogen dynamics of *Cryptocarya oocinnia* community in the dinghushan biosphere reserve. Acta Phytocologica Sinica, 1994, 18(3): 228 ~ 235.
 - [36] Pang X Y, Liu S Q, Liu Q, et al. Degradation and control of soil organic matter and nutrient pool under subalpine spruce plantation in western Sichuan. Acta

- Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 126 ~ 133.
- [37] He Z M, Chen G S, Liu J B, et al. Relationships among litter production, decomposition and accumulation in Chinese fir plantation. Appl. Environ. Biol., 2003, 9(4): 352 ~ 356.
- [38] Lu J P, Liu Q H. Study on tropic forests litters and its decomposition process of Jianfeng Mountain in Hai Nandao. Placement research of forestry system in China, 1994, 5: 178 ~ 179.
- [39] Hu S H. Studies on the decomposition rates of leaf litter of several trees. Journal of plant ecology and biology, 1987, 11(2): 124 ~ 131.
- [40] Liang H W, Huang C B, Hu C B. Studies on litters and soil fertility of the planted forest of the different forest types of Yishan country in Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 1993, 13(3): 233.
- [41] Hornsby D C, Lockaby BG, Chappelka AH. Influence of microclimate on the decomposition in loblolly pine stands: a field micocosm approach. Canadian Journal of Forest Research, 1995, 25: 1570 ~ 1577.
- [42] Dai LM, Xu ZB, Zhang YJ, Chen H. Study on decomposition rate and fall of *Pinus koraiensis* needle. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(8): 1296 ~ 1300.
- [43] Huang X C, Zhu Y M, Meng X X, et al. Environmental background value at area of Changbai Mountain. Placement Research of Forest System, 1980, 1: 171 ~ 180.
- [44] Xu G H, Zheng G H, Zhang D S, et al. The vertical distribution of woody phytoedaphon in Changbai Mountain Nature Reserve. Placement Research of Forest System, 1980, 1: 153 ~ 160.
- [45] Chen L Z, Hampsfell. Studies on the decomposition functions of leaf litter in *Pteridium aquilinum* meadow ecosystem. Journal of botany and geography, 1982, 6(4): 302 ~ 313.
- [46] Zhang Q F, Song Y C, Wu H Q, et al. Litters quantity and decomposition dynamics of the green Broad-leaved forest succession process of Tiantong in Zhejian. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(3): 250 ~ 255.

参考文献:

- [4] 黄建辉, 陈灵芝, 韩兴国. 森林生态系统中凋落物分解的研究进展. 见: 植物科学进展, 1. 北京, 高等教育出版社, 1998. 218 ~ 316.
- [13] 王希华, 黄建军, 同恩荣. 天童国家森林公园常见植物叶凋落物分解的研究. 植物生态学报, 2004, 28(4): 457 ~ 467.
- [14] 程煜. 闽南叶凋落物分解动态及其养分释放规律研究. 南坪: 福建农林大学硕士论文, 2003.
- [15] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英. 杉木幼林生态系统凋落物及其分解作用研究. 植物生态学报, 1997, 21(6): 564 ~ 570.
- [16] 刘文耀, 刘伦辉, 荆桂芬, 和爱军. 云南松林与常绿阔叶林中枯落叶分解研究. 云南植物研究, 2000, (22): 298 ~ 306.
- [17] 齐泽民, 王开运, 宋光煜, 杨万勤. 川西亚高山箭竹群落枯枝落叶层生物化学特性. 生态学报, 2004, 24(6): 1230 ~ 1236.
- [18] 廖利平, 高洪, 汪思龙, 等. 外加氮源对杉木叶凋落物分解及土壤养分淋失的影响. 植物生态学报, 2000, 24(1): 34 ~ 39.
- [19] 林开敏, 洪伟, 俞新妥. 杉木与伴生植物凋落物混合分解的相互作用研究. 应用生态学报, 2001, 21(3): 321 ~ 325.
- [20] 肖冬梅, 王森, 姬兰柱, 等. 长白山阔叶红松林土壤 N_2O 排放通量的变化特征. 生态学杂志, 2004, 23(5): 46 ~ 52.
- [21] 林丽莎, 韩士杰, 王跃思, 等. 长白山四种林分土壤 CO_2 释放通量的研究. 生态学杂志, 2004, 23(5): 42 ~ 45.
- [22] 肖冬梅, 王森, 姬兰柱, 等. 长白山阔叶红松林土壤氮化亚氮和甲烷的通量研究. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1855 ~ 1859.
- [23] 魏晶, 邓红兵, 吴钢, 等. 长白山高山冻原生态系统三种养分含量的空间分布. 生态学报, 2004, 24(11): 2360 ~ 2366.
- [24] 杨丽韞, 李文华. 长白山不同生态系统地下部分生物量及地下 C 贮量的调查. 自然资源学报, 2003, 18(2): 204 ~ 209.
- [25] 郝占庆, 郭水良, 曹同, 著. 长白山植物多样性及其格局. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2002. 4 ~ 9.
- [28] 莫江明, 薛花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1413 ~ 1420.
- [29] 马志贵, 王金锡. 大熊猫栖息环境森林凋落物动态研究. 植物生态与地植物学学报, 1993, 5(2): 45 ~ 49.
- [30] 魏晶, 吴钢, 邓红兵. 长白山高山冻原生态系统凋落物养分归还功能. 生态学报, 2004, 24(10): 2211 ~ 2216.
- [32] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响. 应用与环境生物学报, 2003, 9(4): 346 ~ 351.
- [31] 陈永亮, 李淑兰. 胡桃楸、落叶松纯林及其混交林下叶凋落物分解与养分归还的比较研究. 林业科技, 2004, 29(5): 9 ~ 12.
- [33] 梁宏温. 田林老山中山杉木人工林凋落物动态研究. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 17(2): 155 ~ 163.
- [34] 周毅, 甘先华, 黎元伟. 池杉林凋落物特征的研究. 华南农业大学学报(自然科学版), 2003, 24(2): 19 ~ 21.
- [35] 蚁伟民, 丁明慧, 张祝平, 等. 鼎湖山黄果厚壳桂群落的凋落物及其氮素动态. 植物生态学与地植物学学报, 1994, 18(3): 228 ~ 235.
- [36] 庞学勇, 刘世全, 刘庆, 等. 川西亚高山人工云杉林地有机物和养分库的退化与调控. 土壤学报, 2004, 41(1): 126 ~ 133.
- [37] 何宗明, 陈光水, 刘剑斌, 等. 杉木林凋落物产量、分解率与储量的关系. 应用与环境生物学报, 2003, 9(4): 352 ~ 356.
- [38] 卢俊培, 刘其汉. 海南岛尖峰岭热带林凋落物及其分解过程的研究. 中国森林生态系统定位研究, 1994, 5: 178 ~ 179.
- [39] 胡肆慧. 几种树木枯叶分解速率的实验研究. 植物生态学与地植物学学报, 1987, 11(2): 124 ~ 131.
- [40] 梁宏温, 黄承标, 胡承彪. 广西宜山县不同林型人工林凋落物与土壤肥力的研究. 生态学报, 1993, 13(3): 233.
- [42] 代力民, 徐振邦, 张扬建, 陈华. 红松针叶的凋落及其分解速率研究. 生态学报, 2001, 21(8): 1296 ~ 1300.
- [43] 黄锡畴, 朱颜明, 孟宪玺, 等. 长白山地区环境背景值研究. 中国森林生态系统定位研究, 1980, 1: 171 ~ 180.
- [44] 许光辉, 郑洪元, 张德生, 等. 长白山自然保护区森林土壤微生物垂直分布. 中国森林生态系统定位研究, 1: 153 ~ 160.
- [45] 陈灵芝, Hampsfell(英国). 蕨类草地生态系统中枯叶分解作用的研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 1982, 6(4): 302 ~ 313.
- [46] 张庆费, 宋永昌, 吴化前, 由文辉. 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.