

文章编号: 1001-1498(2008)05-0675-06

# 北亚热带 6种森林类型凋落物分解过程中 有机碳动态变化\*

李正才<sup>1</sup>, 徐德应<sup>2</sup>, 杨校生<sup>1</sup>, 傅懋毅<sup>1</sup>, 孙雪忠<sup>3</sup>, 奚金荣<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境  
与保护研究所, 北京 100091; 3. 浙江省富阳市林业局, 浙江 富阳 311400)

**摘要:**运用凋落物野外分解模拟实验的方法,对北亚热带地区 6种主要森林类型凋落物分解过程中有机碳的变化进行了研究,结果表明:(1)6种土地利用类型森林凋落物分解过程中,有机碳相对含量在分解初始阶段都呈现增加的趋势,表现为凋落物有机碳相对含量的积累过程;分解开始的第 3~4 个月后,凋落物有机碳相对含量下降;经过 1 a 的分解周期以后,粗放经营毛竹林凋落物有机碳相对含量变化最大,下降 11.7%;(2)集约经营毛竹林凋落物有机碳数量从分解开始就减少,而其它几种类型分解初期有机碳数量都表现一个净积累的过程,然后才逐步释放;经过 1 a 分解周期以后,粗放经营毛竹林凋落物 53.8% 的有机碳净释放;凋落物有机碳释放速率由高到低的顺序为:粗放经营毛竹林、早竹林、杉木林、天然次生林、集约经营毛竹林、马尾松林;(3)6种土地利用类型森林凋落物在分解过程中,有机碳剩余率随时间变化的模型都极其显著地符合分解指数模型,因此都可以用指数方程表达;(4)影响凋落物分解的环境因子所发挥的作用不尽相同,凋落物的分解速率和温度之间呈现显著的正相关关系。

**关键词:**森林凋落物;凋落物分解;有机碳分解;土地利用方式

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

## Carbon Dynamics of Litter Decomposition in Six Forest Stands of Subtropical China

LI Zheng-cai<sup>1</sup>, XU De-ying<sup>2</sup>, YANG Xiao-sheng<sup>1</sup>, FU Mao-yi<sup>1</sup>, SUN Xue-zhong<sup>3</sup>, XI Jin-rong<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang, China; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China; 3. Forestry Bureau of Fuyang City, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** Based on the field study, this paper deals with carbon dynamics of litter decomposition in six land-use types of forests in the subtropical area of south China. The results showed that (1) at the beginning of the decomposition, the carbon content in litter increased, indicating the accumulation process of carbon; later, the carbon content decreased, while after one year of decomposition, the carbon content of that in the *Phyllostachys edulis* extensively managed stand was reduced by 11.7%; (2) the carbon quantity of litter in the *Phyllostachys edulis* stand decreased from the beginning, while those for the others increased first and then decreased; after one year, the carbon quantity of the extensively managed *Ph edulis* stand decreased by 53.8%; the release rate of carbon from the highest to lowest was ranked as follows: the extensively managed *Ph edulis* stand, *Ph praecox* stand, *Cunninghamia lanceolata* stand, the intensively managed *Ph edulis* stands and *Pinus massoniana*; (3) the remaining carbon amount of forest litter could be described by exponential equation models; (4) the decomposition

收稿日期: 2007-05-11

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y507684)和国际合作项目(CPR/00/G33/A/1G/99)部分研究内容

作者简介: 李正才(1965—),男,江苏扬州人,副研究员,主要从事森林生态研究。

\*外业调查得到了浙江省富阳市林业局的大力支持,内业分析得到本所国家林业局亚热带林木培育重点实验室的协助,本所首席专家顾小平博士认真仔细地审阅了全文,在此一并致谢。

rate of litter was positively correlated with air temperature

**Key words:** forest litter; litter decomposition; release of organic carbon; land-use pattern

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分,是森林生态系统物质循环的重要环节,凋落物的分解是森林生态系统生物地球化学循环的一个重要组成部分,分解速率对生态系统生产力有重要影响,凋落物的分解还是森林地表层生物量和养分含量的主要决定因素,并显著影响土壤的理化性质,凋落物分解释放的有机碳是土壤中有有机碳的一个重要来源<sup>[1-5]</sup>。同时,通过凋落物的分解归还到大气中的 C 量是全球 C 预算中一个重要的组成成分,Raich 等<sup>[6]</sup>估计全球因凋落物分解(包括枯死根)释放的 CO<sub>2</sub>量为 68 Gt (C) · a<sup>-1</sup>,约占全球年 C 总流通量的 70%。

森林凋落物分解过程中对 N、P、K 等营养元素的研究较多,而对分解过程中有机碳含量(浓度)和释放量的研究相对薄弱<sup>[7-14]</sup>。随着全球碳循环问题受到广泛关注,凋落物的分解对森林生态系统碳预算具有重要科学意义。Lupwayi 等<sup>[15]</sup>用指数模型很好地拟合了新银合欢(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit cv. Salvador)有机碳分解过程,孙辉等<sup>[16]</sup>对植物篱枝叶有机碳分解过程进行了研究,但对森林凋落物分解过程中有机碳浓度和有机碳释放数量的动态变化还很欠缺,特别是对北亚热带地区森林凋落物有机碳动态研究更是空白。本文基于凋落物野外分解模拟实验的方法,对北亚热带地区 6 种主要森林类型凋落物分解过程中有机碳的变化进行了研究,目的是探讨凋落物分解释放出 CO<sub>2</sub>对温室效应的贡献以及对区域生态系统有机碳的恢复影

响,为全球变化和生态系统恢复提供基础材料。

## 1 试验地概况

### 1.1 试验地区概况

试验区位于浙江省富阳市春建乡,地理位置 119°25' ~ 120°09' E, 29°44' ~ 30°12' N,属亚热带季风气候,雨量充沛,气候温和,年均气温 16.2 °C,年均降水量 1 464 mm,无霜期 237 d。

该地区历史上为森林地带,顶极群落是北亚热带常绿阔叶林,由于过去对木材、薪炭需求量的增加以及农业活动的发展,本地区天然原始林大多已遭到破坏,森林被砍伐转化为次生林、农业用地和人工林等。该地区现存主要是次生林(以壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)和木兰科(Magnoliaceae)植物为主)和人工林,人工主要栽培杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)、早竹(*Phyllostachys praecox* C. D. Chu et C. S. Chao)和茶树(*Camellia sinensis* O. Ktze)等。

### 1.2 试验地选择和样地经营概况

本研究采用相邻样地比较方法,即通过土地利用变化巨大林区,选择邻近相同海拔、坡向,成土母质、土壤条件和环境因子基本一致的不同土地利用/覆盖变化类型作为研究对象,试验样地基本情况见表 1。

表 1 试验样地基本情况

土地利用 / 覆盖类型	主要植物	平均树高 / m	平均胸径 / cm	立木密度 / (株 · hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	管理方式	林龄或生长期 / a
天然次生林	壳斗科、樟科、山茶科和木兰科	10 ~ 15	11 ~ 25	825 ~ 975	0.7 ~ 0.9	封山育林	50
集约经营毛竹林	毛竹	9 ~ 12	8 ~ 14	1 800 ~ 2 250	0.7 ~ 0.8	林地每年劈山 1 次,两年垦复 1 次	至少 18
粗放经营毛竹林	毛竹	8 ~ 11	7 ~ 11	2 100 ~ 2 700	0.7 ~ 0.8	不劈山、不垦复和不施肥	至少 50
杉木林	杉木	8 ~ 11	15 ~ 20	1 800 ~ 2 250	0.7 ~ 0.8	抚育	20
马尾松林	马尾松	7 ~ 9	11 ~ 17	1 250	0.8	抚育	16
早竹林	早竹	3 ~ 6	3 ~ 5	12 150 ~ 12 750	0.8 ~ 0.9	劈山、垦复	15

## 2 研究方法

在植物生长季节末期,收集天然次生林、杉木林、马尾松林、集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和

早竹林新鲜凋落物,将风干的凋落物 200 g 装入孔径为 2 mm 的尼龙网袋中(网袋大小为 30 cm × 30 cm),于 2003 年 12 月底分别随机布置在调查样地(研究不同土地利用类型土壤有机碳储量时所设

置的样地)的地表面,每个样地放置 30 个,重复 3 次,共计 90 个分解袋,所有分解样品袋固定在一根长的铁丝上,以防被风刮走。

2004 年每个月月末在每种土地利用类型样地内随机取 3 个分解袋,清除泥土后称湿质量,然后分别从 3 个分解袋中抽取充分混合的分解样品 3 个,带回实验室,在 80 ℃ 下烘干至恒质量,测定样品含水率,计算凋落物分解  $t$  时间以后的剩余干质量,计算凋落物的分解速率,同时实验室采用重铬酸钾法测定样品的有机碳含量<sup>[17]</sup>;记载 2004 年富阳市月平均气温、月平均降水量和月平均日照等气象因子数据。

凋落物分解过程中有机碳分解释放速率采用如下公式计算:

$$\text{有机碳分解释放速率} = [(\text{初始浓度} \times \text{初始质量}) - (t \text{时刻浓度} \times t \text{时刻质量})] / (\text{初始浓度} \times \text{初始质量}) \times 100\%$$

所有的统计分析均采用 SPSS10.0 统计软件包中的相应程序进行分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 凋落物分解过程中有机碳含量(浓度)的动态变化

凋落物分解过程中,随着有机物的降解,各营养

元素逐步被释放,所以凋落物中养分总量不断减少,但某种元素的相对含量在分解过程中可能变大或变小。当凋落物中某种元素的释放速率低于凋落物的干质量损失时,元素的含量就会上升,反之则下降。

由图 1 可以看出,凋落物分解过程中,有机碳含量呈现一定的变化趋势:(1)6 种土地利用类型凋落物有机碳相对含量初始阶段都呈现增加的趋势,表现为凋落物有机碳含量的积累过程,积累的程度不一样,其中马尾松林积累的幅度最大,粗放经营毛竹林、集约经营毛竹林和早竹林积累的幅度要小于天然次生林、马尾松林和杉木林。(2)分解开始的第 3~4 个月后,凋落物有机碳相对含量下降,但是下降的幅度不一样:马尾松林开始下降幅度较大,以后平缓下降;天然次生林、粗放经营毛竹林、集约经营毛竹林、早竹林和杉木林一直处于缓慢的下降,9—10 月份,凋落物有机碳含量又有上升的趋势,之后,凋落物有机碳含量又开始下降。(3)经过 1 a 的分解周期以后,粗放经营毛竹林凋落物有机碳含量变化最大,下降 11.7%,其次是杉木林凋落物有机碳含量下降 10.9%,早竹林下降 9.8%,集约经营毛竹林和天然次生林凋落物有机碳含量下降 3.7%,马尾松林凋落物有机碳含量下降最小,为 1.3%。

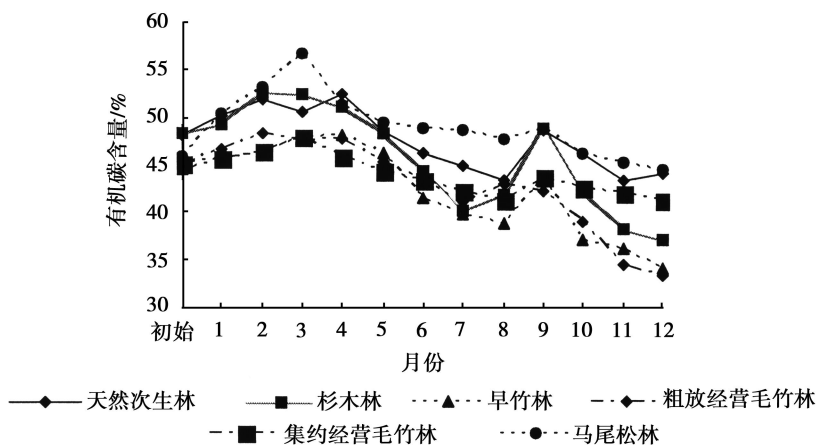


图 1 凋落物分解过程中有机碳含量动态变化趋势

#### 3.2 凋落物分解过程中有机碳释放速率的动态变化

在自然状态下,凋落物不可能从其它有机物质中分离出来孤立分解,而是不同凋落物协同分解,而且凋落物在混合分解过程中,不仅发生量变,也会发生质变,其化学成分进行着转移或转化,不同化学成分的损失存在差异。由于凋落物的有机碳含量不一

样,同时凋落物分解过程中凋落物分解的速率不尽相同,上述用凋落物分解过程中凋落物有机碳的相对含量来表征凋落物分解过程中有机碳的动态变化还不尽确切,图 2 用凋落物分解过程中有机碳释放速率来反映凋落物分解过程中有机碳的动态变化更能说明问题。

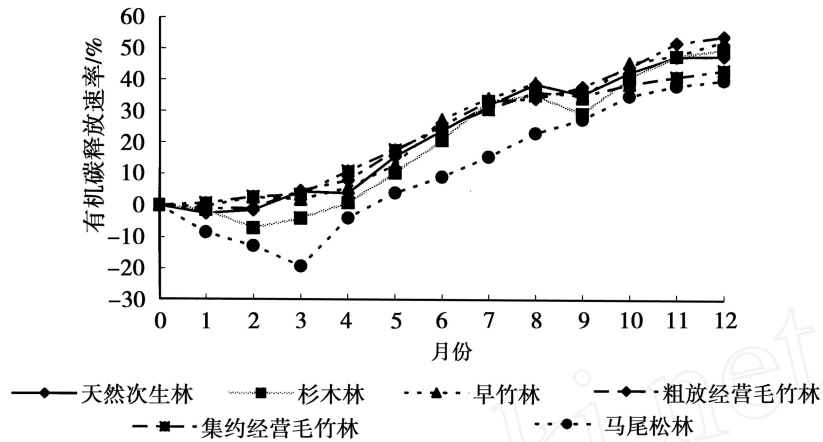


图 2 凋落物分解过程中有机碳释放速率

由图 2 可以看出: (1) 由于集约经营毛竹林凋落物分解环境不同于粗放经营毛竹林和早竹林, 因此凋落物分解过程中, 有机碳从分解起始就释放, 而早竹林和粗放经营毛竹林分解起始阶段则是有机碳数量表现净积累的过程, 然后才开始分解释放。(2) 马尾松林、天然次生林和杉木林也表现为开始阶段净积累, 然后释放的过程, 但是净积累的幅度不一样, 马尾松林有机碳数量净积累的幅度最大, 达到 19.3%。(3) 经过一个分解周期以后, 6 种森林类型凋落物分解过程中累计释放的有机碳速率存在一定的差异, 粗放经营毛竹林释放速率最多, 53.8% 的有机碳净释放, 其次是早竹林, 为 52.3%; 而从起始阶段就释放有机碳的集约经营毛竹林经过一个分解周期以后, 释放的有机碳比早竹林和粗放经营毛竹林低, 这一点和分解环境有关系; 马尾松林凋落物经过一个分解周期以后, 有机碳释放速率最小, 仅 39.8%。不同土地利用类型之间有机碳释放速率的差异达到极显著水平 (表 2)。(4) 6 种森林类型凋落物有机碳分解释放速率由高到低的顺序为: 粗放经营毛竹林、早竹林、杉木林、天然次生林、集约经营

毛竹林、马尾松林。

利用尼龙网袋分解法是野外测定森林凋落物分解速率最常用的方法, 但由于网袋的隔离作用及其形成的小环境限制了土壤动物、微生物的活动, 从而使凋落物的分解活动减缓。在温带和暖温带地区, 土壤小动物对凋落物的分解过程影响较小, 但在热带、亚热带地区, 土壤动物对凋落物的取食往往对分解作用起着相当重要的作用; 网袋材料的孔径和强度对分解速率也有很大影响, 网孔愈小, 通气性愈差, 且妨碍小动物的破碎活动, 结果差异也愈大; 但可以肯定的是, 伴随着凋落物的分解养分不断发生释放, 对于森林生态系统养分循环和系统生产力的维持具有重要意义。有机碳分解释放速率表明, 单从凋落物有机碳分解速率来看, 粗放经营毛竹林更有利于土壤有机碳的恢复, 而马尾松林由于凋落物有机碳释放速率低, 反而不利于土壤有机碳的恢复。影响土壤有机碳储量的因素很多, 除了凋落物分解外, 植物根系分布和人为扰动土壤的方式等不同也会对土壤有机碳储量产生较大的影响。

表 2 凋落物分解过程中有机碳含量和剩余率的方差分析

项目	粗放经营毛竹林	早竹林	杉木林	天然次生林	集约经营毛竹林	马尾松林
同一土地利用类型不同月份之间	有机碳含量的变化	$F = 28.248$ $P = 0.000$	$F = 22.554$ $P = 0.000$	$F = 19.542$ $P = 0.000$	$F = 12.422$ $P = 0.000$	$F = 13.500$ $P = 0.000$
	有机碳分解剩余率	$F = 24.618$ $P = 0.000$	$F = 21.554$ $P = 0.000$	$F = 16.113$ $P = 0.000$	$F = 13.350$ $P = 0.000$	$F = 12.482$ $P = 0.000$
不同土地利用类型之间	有机碳含量的变化	$F = 54.48$ $P = 0.000$				
	有机碳分解剩余率	$F = 309.18$ $P = 0.000$				

### 3.3 凋落物分解过程中有机碳剩余率随时间变化的指数模型

目前普遍采用的衡量凋落物分解速率大小的指标主要有 CO<sub>2</sub>释放速率、凋落物分解系数 (K 值) 及质量损失率。这些指标便于不同凋落物分解速率的比较,但不足之处在于它们都使分解过程过于简单化,无法得到分解速率的精确值。许多学者采用数学模型模拟凋落物分解过程及外界因素(如 CO<sub>2</sub>浓度升高、酸沉降、施肥等)对分解的影响。Olson (1963)提出的指数方程  $W/W_0 = e^{-kt}$  是描述凋落物分解过程中质量损失率变化的最常见模型,而有些研究者发现线性回归模型模拟效果更好,还有人提出了“最适指数曲线模型”<sup>[18]</sup>,这些模型已在研究中

得到广泛应用。

本文运用指数方程对凋落物分解过程中有机碳剩余率随时间的变化进行了模拟,由表 3 可以看出:6种土地利用类型森林凋落物分解过程中,有机碳剩余率随时间的变化都极其显著地符合分解指数模型,并且集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林、早竹林、杉木林和天然次生林凋落物分解指数模型的决定系数 (R<sup>2</sup>) 都在 0.90 以上,马尾松林凋落物分解指数模型的决定系数 (R<sup>2</sup>) 也在 0.87 以上,因此 6 种森林类型凋落物分解过程中有机碳剩余率随时间变化的模型用指数方程模拟都能够得到较好的效果,与 Olson 等用指数方程  $W/W_0 = e^{-kt}$  描述凋落物分解过程中质量损失率变化的模型相吻合。

表 3 凋落物分解过程中有机碳剩余率随时间变化的指数模型

土地利用类型	指数模型	F 值	P 值	复相关系数 (R)	决定系数 (R <sup>2</sup> )
粗放经营毛竹林	$Y = 1.125 e^{-0.8454x}$	260.94	0.000 0	0.979 5	0.959 5
早竹林	$Y = 1.115 e^{-0.8152x}$	167.87	0.000 0	0.968 7	0.938 5
杉木林	$Y = 1.158 e^{-0.7948x}$	106.67	0.000 0	0.952 1	0.906 5
天然次生林	$Y = 1.114 e^{-0.7720x}$	202.18	0.000 0	0.973 8	0.948 4
集约经营毛竹林	$Y = 1.058 e^{-0.6470x}$	300.73	0.000 0	0.982 2	0.964 7
马尾松林	$Y = 1.213 e^{-0.6750x}$	76.49	0.000 0	0.935 0	0.874 2

### 3.4 气象因子对凋落物分解速率的影响

凋落物的分解是在多种因素作用下进行的,除了受化学组成影响外,环境因子也是主要控制因素。研究表明,凋落物分解速率与土壤水分、地表温度和土壤 pH 呈指数正相关,与相对湿度呈线性正相关,其对凋落物分解的重要性依次为:土壤水分、土壤 pH、地表温度、相对湿度。本文主要对 6 种不同土地利用类型的凋落物分解速率与凋落物分解研究年份月平均气温、月降水量和月日照等主要气象因子的相关性进行了分析,结果见表 4。

由于不同土地利用类型形成的森林小气候不一样,不同土地利用类型凋落物分解环境不同,因此影响凋落物分解的环境因子所发挥的作用也不尽相同。由表 4 可以看出:(1)杉木林、马尾松林、天然次生林和气温的关系均达到了极显著的相关水平,且这 3 种林分和日照的相关性也达到了显著水平,但是和降水的相关性没有达到显著水平,可能因为南方地区降水充足,降水量并不是限制因子。(2)粗放经营毛竹林和集约经营毛竹林凋落物的分解速率主要和气温呈显著相关性,和降水量、日照时数相关性均达不到显著水平。(3)早竹林凋落物分解速率与气温、降水和日照 3 个气象因子的相关性均不显

著。当然凋落物的分解不仅仅受环境因子的影响,凋落物内在的质量也决定了凋落物的分解速率。

表 4 凋落物分解速率和气象因子的相关分析

土地利用类型	气温	降水	日照
集约经营毛竹林	0.675*	0.460	0.431
粗放经营毛竹林	0.640*	0.483	0.464
早竹林	0.569	0.506	0.361
杉木林	0.932**	0.341	0.694*
马尾松林	0.942**	0.413	0.577*
天然次生林	0.836**	0.185	0.786*

注: \*、\*\* 分别表示 t 检验 0.05、0.01 水平差异显著。

## 4 结论与讨论

(1) 6 种土地利用类型的凋落物在分解过程中,有机碳相对含量在分解初始阶段都呈现增加的趋势,表现为有机碳相对含量的积累过程;分解开始的第 3~4 个月,有机碳相对含量下降;经过 1 a 的分解周期以后,粗放经营毛竹林凋落物的有机碳相对含量变化最大,下降 11.7%,马尾松林凋落物的有机碳相对含量下降最小,为 1.3%。

(2) 随着凋落物干物质的分解,有机碳数量也呈现一定的变化规律,集约经营毛竹林凋落物有机碳从起始阶段就释放,而其它几种类型分解初期有

机碳都表现一个净积累的过程,然后才逐步释放;经过 1 a 分解以后,粗放经营毛竹林 53.8% 的有机碳净释放,马尾松林释放的有机碳数量最小,仅 39.8%;凋落物有机碳释放速率由高到低的顺序为:粗放经营毛竹林、早竹林、杉木林、天然次生林、集约经营毛竹林、马尾松林。

(3) 本研究凋落物分解中有机碳释放速率趋势和孙辉等<sup>[16]</sup>、刘强等<sup>[19]</sup>的研究规律基本一致,但是由于刘强的试验研究样地位于海南热带地区的尖峰岭和广东南亚热带地区的鼎湖山,温度、湿度条件要明显好于位于北亚热带地区的浙江富阳,因此,富阳点凋落物年有机碳释放速率要低于尖峰岭和鼎湖山凋落物年有机碳释放速率。

(4) 6 种土地利用类型森林凋落物分解有机碳剩余率随时间的变化规律都极其显著符合分解指数模型,与 Olson, Lupwayi 和孙辉等研究用指数方程  $W/W_0 = e^{-kt}$  描述凋落物分解过程中质量损失率变化的模型相吻合。

(5) 尽管有机碳是组成凋落物的重要组成部分,占凋落物干物质总量的 40%,但是有机碳的分解与凋落物干物质的分解却有很大的区别。首先对每种凋落物而言,凋落物有机碳的分解和凋落物干物质降解的过程不一样;其次,凋落物干物质分解快慢的顺序和有机碳分解的顺序不尽相同,说明凋落物有机碳的分解和凋落物干物质的分解调控机制不完全相同。

#### 参考文献:

- [1] McFee W W, Stone E L. The persistence of decaying wood in humus layers of northern forests[J]. Soil Science Society of America Journal, 1966, 30: 513 - 516
- [2] 林波,刘庆一,吴彦,等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 60 - 64
- [3] 王希华,黄建军,闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 457 - 467
- [4] 刘增文. 森林生态系统中枯落物分解速率研究方法[J]. 生态学杂志, 2002, 22(6): 954 - 956
- [5] 吴承祯,洪伟,姜志林,等. 我国森林凋落物研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(3): 405 - 410
- [6] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44: 81 - 89
- [7] 马祥庆,刘爱琴,何智英,等. 杉木幼林生态系统凋落物及其分解作用研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(6): 564 - 570
- [8] 郝占庆,吕航. 木质物残体在森林生态系统中的功能评述[J]. 生态学进展, 1989, 6(3): 179 - 183
- [9] 杨细明. 马尾松人工林凋落物分解及养分释放规律[J]. 福建林学院学报, 2002, 22(1): 1 - 3
- [10] 黄耀,刘世梁,沈其荣,等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 709 - 714
- [11] Aerts R, Caluwe H D. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of *Carex* species[J]. Ecology, 1997, 78(4): 244 - 260
- [12] Ritter E. Litter decomposition and nitrogen mineralization in newly formed gaps in a Danish beech (*Fagus sylvatica*) forest[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(7): 1237 - 1247
- [13] Singh K P, Singh P K, Tripathi S K. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India[J]. Biol Fertile Soils, 1999, 29(4): 371 - 378
- [14] Xuluc-Tolosa F J, Vester H F M, Ramirez-Marcial N, et al. Leaf litter decomposition of tree species in three successional phases of tropical dry secondary forest in Campeche, Mexico[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 174: 401 - 412
- [15] Lupwayi N Z, Haque I. Leucaena hedgerow intercropping and cattle manure application in the Ethiopian highlands. I. Deposition and nutrient release[J]. Biol Fertile Soils, 1999, 28: 182 - 195
- [16] 孙辉,唐亚,赵其国,等. 植物篱枝叶有机碳分解研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 361 - 367
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [18] Antonov G, Antonov I. A mathematical model of the rate of decomposition of the forest residue litter[J]. Nauka-za-Gorata, 1995, 32(4): 43 - 47
- [19] 刘强,彭少麟,毕华,等. 热带亚热带森林凋落物交互分解的养分动态[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 24 - 32