

模拟酸雨对亚热带典型树种叶凋落物分解的影响

洪江华¹, 江 洪^{1,2,3,*}, 马元丹³, 余树全³, 李 巍⁴, 窦荣鹏³, 郭培培³, 曾 波¹

(1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;
3. 浙江林学院国际生态研究中心, 杭州 311300; 4. 北京师范大学环境学院 北京 100875)

摘要:通过在酸雨胁迫下中国亚热带典型树种马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) oersted) 叶凋落物分解的比较研究, 试图分析亚热带区域日益严重的酸雨是否会对森林凋落物的分解产生影响, 从而揭示酸雨胁迫下凋落物分解的变化规律。利用网袋法进行试验, 共设计有 3 个区组: 酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)、重度酸雨胁迫(pH2.5)。试验结果表明: 酸雨对 3 种亚热带树种凋落叶片的影响比较显著, 通常会减慢凋落分解的速率。酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)和重度酸雨胁迫(pH2.5)三个处理对分解系数的影响, 马尾松的分别为: 0.49、0.34、0.25; 木荷的分别为: 0.70、0.34、0.32; 青冈的分别为: 0.64、0.23、0.21; 酸雨对马尾松、木荷、青冈叶的凋落物的干重剩余率影响的大小为: pH(2.5) > pH(4.0) > pH(5.6)。中度酸雨处理(pH4.0)和重度酸雨处理(pH2.5)影响叶凋落物分解 95% 的时间分别推迟了: 马尾松 2.697a、5.869a; 木荷 4.531a、5.082a; 青冈 8.344a、9.584a。

关键词: 酸雨; 凋落物分解; 亚热带; 森林

文章编号: 1000-0933(2009)10-5246-06 中图分类号: Q142, Q948, S718.5 文献标识码: A

The influence of acid rain on the leaf litter decomposition of three dominant trees in the subtropical forests

HONG Jiang-Hua¹, JIANG Hong^{1,2,3,*}, MA Yuan-Dan³, YU Shu-Quan³, LI Wei⁴, DOU Rong-Peng³, GUO Pei-Pei³, ZENG Bo¹

1 Key Laboratory of Eco-environments of Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3 International Ecological Center of Zhejiang Forestry College, Hangzhou 311300, China

4 College of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5246 ~ 5251.

Abstract: This article researches the influence of acid rain stress on leaf litter decomposition of dominant trees (*Pinus massoniana* Lamb., *Schima superba* Gardn. et champ, *Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) oersted) in subtropical regions of China. The purpose of this report is to analyze the effect of acid rain on litter decomposition through control experiment. There are three pH value were set up for the experiment, include pH5.6, pH4.0 and pH2.5. The net bag of leaf litter placed on the ground to simulate natural conditions. The results show that acid rain plays an important role on the leaf litter decomposition of three dominant trees in the subtropical forests. The decomposition rate under pH values 5.6, 4.0 and 2.5 of acid rain influenced are respectively, *Pinus massoniana* Lamb.: 0.49, 0.34, 0.25; *Schima superba* Gardn. et champ: 0.70, 0.34, 0.32; *Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) oersted: 0.64, 0.23, 0.21; Acid rain also affected the dry weight

基金项目: 国家科技部 973 资助项目(2005CB422207); 国家自然科学基金资助项目(40671132); 国家科技部数据共享平台建设资助项目(2006DKA32300-08); 国家科技部国际合作项目(200073819); 国家科技基础性工作专项(2007FY110300-08); 浙江省森林培育重中之重学科开放基金资助项目(200608)

收稿日期: 2008-12-03; **修订日期:** 2009-02-05

致谢: 胡剑等参加有关试验工作, 特此致谢。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongjiang.china@gmail.com

remaining of leaf litter for three typical tree species. Comparing with control (pH5.6), the moderate acid rain (pH4.0) and severe acid rain (pH2.5) impacted the decomposition about 95% completely time of leaf litter, the results indicated: *Pinus massoniana* Lamb. postponed are 2.697a, 5.869a; *Schima superba* Gardn. et Champ are 4.531a, 5.082 a; *Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) Oersted are 8.344a, 9.584 a.

Key Words: acid rain; litter decomposition; subtropical regions; forest

酸雨(acid rain, acid precipitation)是 pH 小于 5.6 的大气降水的总称,包括各种酸性的雨、雾、雪、霜等形式^[1]。在 20 世纪 60~70 年代主要分布在欧洲和北美地区,但近年在东北亚地区出现了世界第三大酸雨区,该地区包括中国长江以南广大地区和朝鲜、日本等,其中酸性最强,面积最大的酸雨区在中国^[2~4]。从我国长期监测来看,酸性降雨的发生范围有扩大趋势。我国酸雨主要分布在长江以南地区,正好与酸性土壤分布区重合,导致一些地方已出现土壤酸化,养分淋溶,肥力下降,植被枯萎等现象。在自然条件下,土壤极度酸化后很难逆转,假如土壤大面积酸化,后果将不堪设想^[5]。而在维持森林生态系统生产力、净储碳量、缓解土壤的酸化作用等具有不可替代的作用和地位^[6~8]。

森林凋落物及其分解对于维持森林的养分循环、防止水土流失、保护土壤免受环境胁迫,具有重要的意义^[8]。前人对凋落物分解的研究工作发现了很多规律^[9],但缺乏与酸雨的联系^[10]。同时,虽然氮沉降、水分胁迫、干旱胁迫等对凋落物分解的影响有些报道^[11,12],但酸雨胁迫对凋落物分解的影响涉及的研究报告很少^[13~19]。从研究区域上,在亚热带的研究也不充分^[15]。在日益严重的酸雨胁迫压力下,在酸雨重度危害的亚热带地区,深入研究酸雨对凋落物分解的影响非常紧迫。

本文以中国亚热带典型树种马尾松、木荷、青冈叶的凋落物为研究对象,通过酸雨大棚试验方法研究酸雨胁迫对凋落物分解的影响,研究的结果可为维持森林生态系统生产力、缓解土壤的酸化作用等提供科学依据。本文凝练的无效科学假设是酸雨对凋落物分解无影响和不同树种叶凋落物对于酸雨的胁迫无差异。

1 实验方法

1.1 试验树种的特性

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)林是中国东南部湿润亚热带地区分布最广、资源最多的针叶林类型。天然马尾松林占亚热带森林面积的 50%。马尾松林在恢复森林生态系统中能起到先锋作用,在保持和重建中国亚热带山区生态平衡的工程中,具有独特的地位和重大作用^[6]。马尾松是可用于营建多林种的树种,而且其树干较直;树皮深褐色,长纵裂,长片状剥落;木材纹理直,结构粗;含树脂,耐水湿。是重要用材树种,而且树干可采割松脂,叶可提芳香油。茶科中的木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ)也是常绿阔叶林的重要组成部分,在中国南方各省有较丰富的资源。青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) Oersted)常组成常绿阔叶林的主要成分,分布很广,青冈属植物是亚热带常绿阔叶林的优势种或建群种。

1.2 实验设计

1.2.1 模拟酸雨配制

根据模拟酸雨的文献,按当地自然降水的监测结果,以分析纯硫酸和硝酸按摩尔浓度 $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-$ 按照 8:1 的比例配置母液,用纯净水稀释,配置成的酸性水溶液的 pH 值分别为:2.5、4.0 和 5.6(CK),喷淋酸总雨量相当于 1407.7mm/a 当地降水量,每周对凋落物喷淋 3~4 次模拟酸雨。

1.2.2 试验设计和样地处理

试验采用目前应用较多的分解袋法,是指将凋落物称重后放入分解袋中,置于土壤表层或埋置于土壤内,定期测定凋落物分解速率的方法。分解袋由尼龙网制成,3 个树种的凋落物采用孔径为 1.0mm×1.5mm 的分解袋。

2006 年初,于浙江西天目山等地分别采集 3 个树种即将脱落的衰老叶片,凋落物采集后,自然风干。风

干样留取一部分于 105℃ 烘至恒重,测定含水率,同时进行化学分析获得第一组数据,即凋落物未分解时初始化学组分含量。各种凋落物分别装入分解袋中,每袋约 10g。然后分别于 2006 年 5 月~7 月将凋落物分解网袋放入酸雨大棚内,试验地共有 3 个区组,分别为酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)和重度酸雨胁迫(pH2.5)3 个处理,凋落物分解网袋放置时贴近地表模拟凋落物分解的自然状况。

1.2.3 样品回收与处理

每 1 个月取回 1 次凋落物分解袋。每次取分解袋时,每类凋落物每区组取 1 袋,共取 3 袋。凋落物分解袋取回后,用清水快速洗净分解剩余凋落物表面附着的泥沙,剔除长入分解袋内的根系,于 80℃ 烘箱中烘干至恒重,测定剩余凋落物的质量。然后粉碎,进行化学组分的分析。

1.2.4 数据处理

凋落物的分解速率,采用负指数衰减模型计算: $y = ae^{-kt}$ 。式中, y 为重量残留率(%), t 为时间,通常以年表示, a 为拟和参数, k 即为年分解系数($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)。运用 Sigmaplot 进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨对典型树种叶凋落物干重剩余率的影响

凋落物由树体脱落后,随着时间的推移和逐渐分解。分解过程有 3 个:淋溶过程、自然粉碎过程和代谢过程,3 个同时发生的过程从而使凋落物的重量发生变化。衡量凋落物分解速率快慢的指标这主要有失重率或干重剩余率、 O_2 吸收速率、 CO_2 释放速率等^[16]。在凋落物的分解过程中,直观变化明显、较易度量的特征之一是凋落物的失重,因此本文将采用干重剩余率讨论酸雨对凋落物的分解特征的影响。图 1 是 3 种凋落物在不同 pH 值下分解过程中物质干重剩余率的变化情况:在酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨处理(pH4.0)、重度酸雨处理(pH2.5)3 种处理下,马尾松、木荷、青冈叶凋落物的 16 个月(每两个月取一数值)干重剩余率的变化情况。

(1) 马尾松 酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)、和重度酸雨胁迫(pH2.5)3 种处理下,叶凋落物干重剩余率(相同次数相比较)的大小为:中度酸雨胁迫和重度酸雨胁迫均大于酸雨对照处理,并且重度酸雨胁迫大于中度酸雨胁迫。这一结果表明,中度酸雨处理(pH4.0)和重度酸雨处理(pH2.5)对马尾松叶凋落物的分解有抑制作用,而且重度酸雨处理(pH2.5)对马尾松叶凋落物分解抑制程度更大。

(2) 木荷 开始几次的木荷叶凋落物干重剩余率的变化规律不同于马尾松,经初步推测可能与木荷叶本身的化学成分有关。后几次的干重剩余率符合这样的规律:酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)和重度酸雨胁迫(pH2.5)3 种处理下,叶凋落物干重剩余率(相同次数相比较)的大小为:中度酸雨胁迫和重度酸雨胁迫均大于酸雨对照处理,并且重度酸雨胁迫大

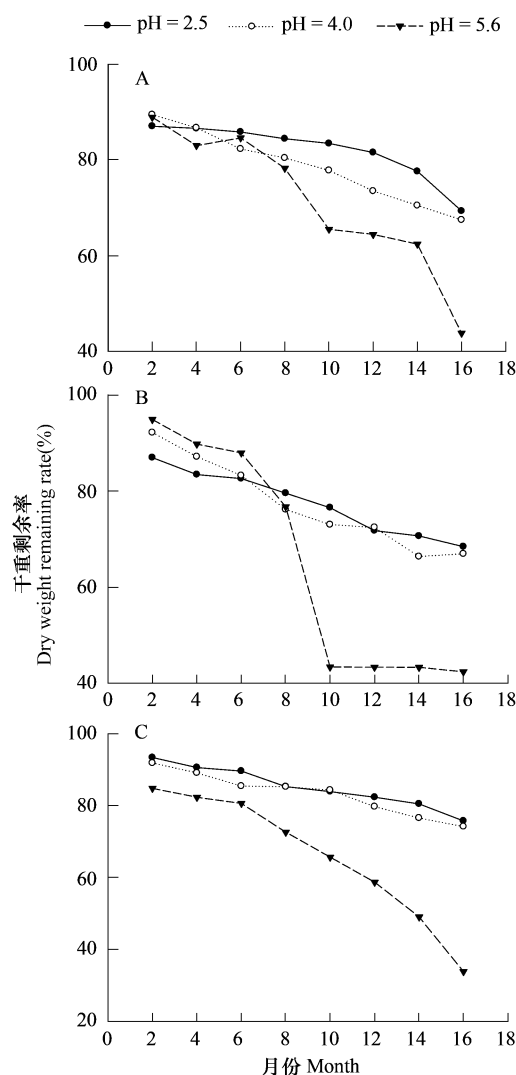


图 1 3 种典型树种叶凋落物分解干重剩余率动态

Fig. 1 The changes in dry weight remaining (%) of leaf litter decomposition of three typical tree species

A. 马尾松 *Pinus massoniana*; B. 木荷 *Schima superba*; C. 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*

于中度酸雨胁迫。表明酸雨处理对木荷叶凋落物的分解有抑制作用。

(3)青冈 酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)和重度酸雨胁迫(pH2.5)3种处理下,叶凋落物干重剩余率(相同次数相比较)的大小为:中度酸雨胁迫和重度酸雨胁迫均大于酸雨对照处理,并且重度酸雨胁迫大于中度酸雨胁迫。与其它两个树种的规律一致,酸雨处理也对青冈叶凋落物的分解有抑制作用。

从上述结果可以看出,酸雨影响马尾松、木荷、青冈叶的凋落物的干重剩余率,对叶凋落物干重剩余率影响的大小为:pH(2.5) > pH(4.0) > pH(5.6)。

2.2 模拟酸雨对典型树种叶分解常数 K 的影响

为了说明酸雨与叶凋落物分解速率常数 K 之间的关系,利用 Olson^[20] 提出的指数衰减模型,对酸雨不同梯度下的 y 干重剩余率与时间(t)进行拟和,得出的 Olson 指数衰减的数学模型的相关系数均达到显著水平(表1),说明拟和效果良好。从表1可以看出,酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)、重度酸雨胁迫(pH2.5)3个处理下,马尾松的分解系数分别为:0.49、0.34、0.25;木荷的分解系数分别为:0.70、0.34、0.32;青冈的分解系数分别为:0.64、0.23、0.21。一般地以95%凋落物被分解所需的时间来表示凋落物的周转期^[21],酸雨对照处理(pH5.6)、中度酸雨胁迫(pH4.0)、重度酸雨胁迫(pH2.5)3个处理下,马尾松的叶凋落物周转期分别为:6.114、8.811、11.983;木荷的叶凋落物周转期分别为:4.280、8.811、9.312a;青冈的叶凋落物周转期分别为:4.681、13.025、14.265a。由于分解速率常数 k 值是表征凋落物分解速率的常用指标, k 值越大,凋落物分解速率越快。从上述可以得出,木荷、青冈的叶凋落物分解速率大于马尾松的叶凋落物分解速率。由此可见,在酸雨胁迫下,不同树种叶凋落物种间存在较大的差异,阔叶树的叶凋落物的分解速率大于针叶树的叶凋落物的分解速率。

表1 叶凋落物干重剩余率(%) 随时间和 pH 的指数回归方程
Table 1 Equation of litter decomposition remains with the development of time and ph

种类 Species	pH 值 pH-value	回归方程 Equation	R^2	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)
马尾松	5.6	$y = 100e^{-0.49x}$	0.884	0.49	1.415	6.114
<i>Pinus</i>	4.0	$y = 100e^{-0.34x}$	0.953	0.34	2.039	8.811
<i>massoniana</i>	2.5	$y = 100e^{-0.25x}$	0.749	0.25	2.773	11.983
木荷	5.6	$y = 100e^{-0.70x}$	0.839	0.70	0.990	4.280
<i>Schima superba</i>	4.0	$y = 100e^{-0.34x}$	0.953	0.34	2.039	8.811
	2.5	$y = 100e^{-0.32x}$	0.847	0.32	2.166	9.362
青冈	5.6	$y = 100e^{-0.64x}$	0.882	0.64	1.083	4.681
<i>Cyclobalanopsis</i>	4.0	$y = 100e^{-0.23x}$	0.910	0.23	3.014	3.025
<i>glauca</i>	2.5	$y = 100e^{-0.21x}$	0.940	0.21	3.301	14.265

y 干重剩余率 Dry weight remaining rate(%), x 分解时间 Decomposition time(a)

在同一树种叶凋落物的不同酸雨处理 pH4.0 和 pH2.5 表现出如下特点:马尾松叶凋落物完成 95% 分解所需时间分别比酸雨 pH5.6 推迟了 2.697、5.869a;木荷叶凋落物推迟了 4.531、5.082a;青冈叶凋落物推迟了 8.344、9.584a。酸雨酸性越强,叶凋落物分解速率就越小,分解常数 K 值也就越小。

3 讨论及结语

3.1 模拟酸雨对典型树种叶凋落物干重剩余率的影响

本次试验研究表明:马尾松、青冈和木荷的叶凋落物分解存在以下特点:相对于对照处理(pH5.6),中度酸雨处理(pH4.0)和重度酸雨处理(pH2.5)对叶凋落物的分解有抑制作用,而且重度酸雨处理(pH2.5)对叶的凋落物的分解抑制程度最大。在酸雨胁迫下,马尾松、木荷、青冈的叶凋落物分解受到了显著的影响,随着酸雨 pH 值的减小,年分解系数就越小,那么凋落物的干重剩余率就越大。而且,酸雨影响下,不同树种叶凋落物的干重剩余率和年分解系数具有较大的差异。这一结果推翻了无效假设,即证明了酸雨对凋落物分解的影

响是显著的,不同树种叶凋落物对于酸雨的胁迫有明显的差异。虽然酸雨对凋落分解的影响缺乏系统的研究,但是有关亚热带地区木荷与马尾松叶凋落物的分解试验结果表明:没有考虑酸雨影响时,由于生物学特性所决定,木荷和马尾松之间在叶凋落物干重损失上也具有明显的差异^[20]。

3.2 模拟酸雨对典型树种叶分解常数 K 的影响

有试验研究表明:在保持一定湿度的条件下,蒸馏水($\text{pH}=6.0$)对于木荷的叶凋落物,在分解过程中能显著地提高其分解速率,在7个月的时间里,蒸馏水($\text{pH}=6.0$)对照比酸雨($\text{pH}=2.5$)处理对叶凋落物的分解影响要明显,在酸雨 pH 值为3.5左右最利于马尾松叶凋落物的分解,酸雨 pH 为4.0和3.0时,会显著减缓其分解,马尾松叶凋落物分解速率对酸雨不同较敏感^[21~25]。在本次试验中,研究结果表明:中度酸雨处理($\text{pH}4.0$)和重度酸雨处理($\text{pH}2.5$)表现出抑制马尾松、木荷、青冈叶凋落物的分解的作用,而且酸雨酸性越强,叶凋落物分解速率就越小,分解常数 K 值也就越小。

树叶分解是一个复杂的生态过程,其分解速率不仅与树叶种类、土壤中的微生物等生物因素有关,而且还受氮沉降、旱涝、UV-B辐射等环境因素的影响^[20,26~29]。酸雨胁迫是一种化学胁迫,对凋落物分解的影响很大,也很直接。并且与氮沉降、旱涝、UV-B等胁迫对凋落物分解的影响相比,其影响可能更显著^[10,12,13]。低 pH 的酸雨对树叶分解有显著的影响,但这种影响既有直接的效果,同时还有间接的影响,因为可能酸性水体抑制了微生物的活动以及降低了底栖无脊椎动物群落的密度和丰富度,从而影响了树叶分解速率^[30~32]。酸雨胁迫对森林生态系统的影响是一个长期的过程,本试验只是对近年的数据进行分析,初步揭示了酸雨胁迫对凋落物叶分解的影响。但是,要确切了解酸雨胁迫对亚热带森林凋落物分解的影响还需更长时间的研究。以及研究酸雨胁迫下凋落分解过程中的营养成分变化,为了深入探讨环境因子的综合效应,除了酸雨的单因素外,还应考虑多因素实验,以便分析其它因子的复合影响。

References:

- [1] Smith W H. Air Pollution and Forests-Interactions Between Air Contaminants and Forest Ecosystems. Springer-Verlag, New York Inc., 1981.
- [2] Wang W X, Ding G A. Space-time Style between acidity of precipitation and ion concentration. Research of Environmental sciences, 1997, 10(2): 1-6.
- [3] Fan H B, Hong W, Ma Z, *et al.* Acidity and Chemistry of Bulk Precipitations, Throughfall and Stemflow in a Chinese fir Plantation in Fujian, China. Forest Ecology and Management, 1999, 122: 243-248.
- [4] Fan Houbao. On worldwide Acid Rain Research. Journal of Fujian College of Forestry, 2002, 22(4): 371-375.
- [5] Chen D Q. Studies on the decomposition of schima superba litter and on the law of it on the soil effect. Journal of Fujian Forestry Sci and Tech, 2001, 28(2): 35-38.
- [6] Hagen-Thorn A, Varnagiryte I, Nihlgard B, *et al.* Autumn nutrient resorption and losses in four deciduous forest tree species. Forest Ecology and Management, 2006, 228: 33-39.
- [7] Li Z A, Cao Y S, Zou B, *et al.* Acid Buffering Capacity of Forest Litter from Some Important Plantation and Natural Forests in South China. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(12): 1398-1407.
- [8] Zimmermann S, Braun S, Conedera M, *et al.* Macronutrient inputs by litterfall as opposed to atmospheric deposition into two contrasting chestnut forest stands in southern Switzerland. Forest Ecology and Management, 2002, 161: 289-302.
- [9] Lin C X, Long X X, Tong X L, *et al.* Guangdong Dabaoshan Mine: ecological degradation, acid drainage and possible measures for their Remediation. Ecology Science, 2003, 22(3): 205-208.
- [10] Wu Y G, Lin C X, Tong X L, *et al.* Environmental impacts of acid mine drainage from the Dabaoshan Mine I. Downstream aquatic ecosystem. Ecology and Environment, 2005, 14(2): 165-168.
- [11] Fan H B, Liu W F, Qiu X Q, *et al.* Responses of litterfall production in Chinese fir to increased nitrogen deposition. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1335-1338.
- [12] Fan H B, Huang Y Z, Qiu X Q, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on litterfall nitrogen concentrations and its annual flux in Chinese fir plantation. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2007, 29(1): 43-47.
- [13] Zhou Q X. Pollution ecological problems of old industrial and mining areas and future research prospects. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16: 1146-1150.

- [14] Niyogi D K, Lewis W M, McKnight D M. Litter breakdown in mountain streams affected by mine drainage: biotic mediation of abiotic controls. *Ecological Applications*, 2001, 11 (2): 506—516.
- [15] Minshall G W. Role of allochthonous detritus in the trophic structure of a woodland spring brook community. *Ecology*, 1967, 48: 139—149.
- [16] Swift M J, Heal O M, Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Berkeley: University of California Press, 1979.
- [17] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, *et al.* The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1980, 37: 130—137.
- [18] Wallace J B, Eggert S L, Meyer J L, *et al.* Multiple trophic levels of a forest stream linked to terrestrial litter inputs. *Science*, 1997, 277: 102—104.
- [19] Allan J D. *Stream Ecology: Structure and function of running waters*. London: Chapman & Hall, 1995. 109—129.
- [20] Weng H, *et al.* The production and nutrient contents of litter in forests of Ding hu shan mountain. *Plant Ecology and Geobotany*, 1993, 17(4): 299—304.
- [21] Petersen R C, Cummins K W, Ward G M. Microbial and animal processing of detritus in a woodland stream. *Ecological Monographs*, 1989, 59: 21—39.
- [22] Webster J R, Benfield E F. Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 1986, 17: 567—594.
- [23] Mackay R J, Kersey K E. A preliminary study of aquatic insect communities and leaf decomposition in acid streams near Dorset. *Ontario. Hydrobiologia*, 1985, 122: 3—11.
- [24] McKnight D M, Feder G L. The ecological effect of acid conditions and precipitation of hydrous metal oxides in a Rocky Mountain stream. *Hydrobiologia*, 1984, 119: 129—138.
- [25] Pascoal C, Cássio F, Gomes P. Leaf breakdown rates: a measure of water quality? *International Review of Hydrobiology*, 2001, 86: 407—416.
- [26] Bray J R, Gorham E. Litter production in forest of the world. *IAEA Technical Reports Series*, 1964, 2: 101—1571.
- [27] Zhao G F, Luo Y Y, Li M H, Yu M J. Nutrient dynamics in litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in East China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 10: 3292—3293.
- [28] Rustad L E. Element dynamics along a decay continuum in a red spruce ecosystem in Maine. *USA*, 1994, 75(4): 867—879.
- [29] Ribeiro C, Madeira M, Araújo M C. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171(122): 31—41.
- [30] Hall R J, Likens G E, Fiance S B, *et al.* Experimental acidification of a stream in the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Ecology*, 1980, 61: 976—989.
- [31] Otto C, Svensson B S. Properties of acid brown water streams in South Sweden. *Arch. Hydrobiol.*, 1983, 99: 15—36.
- [32] Siefert J, Mutz M. Processing of leaf litter in acid waters of the post-mining landscape in Lusatia, Germany. *Ecological Engineering*, 2001, 17: 297—306.

参考文献:

- [2] 王文兴, 丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空格局. *环境科学研究*, 1997, 10(2): 1~6.
- [4] 樊后保. 世界酸雨研究概况. *福建林学院学报*, 2002, 22(4): 371~375.
- [20] 翁轰, 等. 鼎湖山森林凋落物量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.