

模拟酸雨对毛竹凋落物分解的影响*

马元丹¹, 江洪^{1,2}, 余树全¹, 周国模¹, 窦荣鹏¹, 郭培培¹, 王彬¹, 宋新章¹

(1. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 浙江杭州 311300;
2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏南京 210093)

摘要: 2006年9月开始, 采用分解袋法, 在酸雨危害较为严重的浙江省临安市, 模拟研究了酸雨对毛竹叶凋落物分解的影响。实验设置中度(pH 4.0)和重度(pH 2.5)酸雨胁迫处理和对照实验(pH 5.6), 每种处理3次重复。结果表明, 在酸雨胁迫条件下, 凋落物分解速率受到不同程度的制约, 毛竹的分解速率随酸雨胁迫强度的增强而减小。毛竹凋落物在对照组中分解速率最高(0.69), 其次是在中度酸雨胁迫下的分解速率(0.57), 而重度酸雨胁迫下分解速率最低(0.33)。在重度和中度酸雨胁迫下以及对照处理中, 凋落物分解95%的时间分别为9.08 a, 5.26 a和4.34 a。随着酸雨胁迫强度的增强, 毛竹凋落物分解速率对酸雨胁迫的响应表现越敏感。

关键词: 酸雨; 毛竹; 凋落物分解

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)02-0095-05

Effects of Simulated Acid Rain on the Decomposition of *Phyllostachys pubescens*

MA Yuandan¹, JIANG Hong^{1,2}, YU Shuquan¹, ZHOU Guomo¹,
DOU Rongpeng¹, GUO Peipei¹, WANG Bin¹, SONG Xinzhang¹

(1. International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology,
Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China;

2. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The effects of simulated acid rain on leaf litter decomposition of *Phyllostachys pubescens* were studied by litterbag methods in Lin'an City of Zhejiang Province since September 2006, which is in severe acid rain stress regions. Three simulated acid rain treatments were applied to the litter decomposition: severe acid rain (pH 2.5), moderate acid rain (pH 4.0) and control (pH 5.6). There were three repeats in each treatment. The results showed that the litter decomposition rate of *P. pubescens* leaf has been slowed down with the increase of the stress grade of acid rain. The litter decomposition rate of *P. pubescens* leaf was the fastest in the control treatment (decomposition rate is 0.69), was medium in the moderate acid rain stress (0.57), and was the lowest in the severe acid rain stress (0.33). Time for 95% of *P. pubescens* litter has been decomposed under the severe acid rain stress, moderate acid rain stress and control treatment are 9.08a, 5.26a and 4.34 a, respectively. The sensitivity of the litter decomposition rate of *P. pubescens* leaf to acid rain has become strong with the increase of the acid stress.

Key words: acid rain; *Phyllostachys pubescens*; litter decomposition

酸雨或酸沉降是指 pH 值小于 5.6 的雨、雪、雾、雹等形式的酸性降水, 包括湿沉降(如酸雨、

* 收稿日期: 2009-03-03

基金项目: 科技部“973”资助项目(2005CB422207); 国家自然科学基金资助项目(40671132); 科技部数据共享平台建设基金资助项目(2005DKA32306, 2006DKA32308); 科技部国际合作项目资助项目(20073819); 科技部重大科技基础资助项目(2007FY110300); 浙江省重大科技专项资助项目(2008C13G2100010); 浙江林学院科学发展基金和浙江省森林培育重中之重学科开放基金资助(200608)

作者简介: 马元丹(1978年生), 女, 博士, 讲师; 通讯作者: 江洪; E-mail: hongjiang.china@gmail.com

酸雪、酸雾、酸霰) 和干沉降 (如 SO_2 、 NO_x 、 HCl 等气体酸性物)^[1]。我国酸雨主要分布在长江以南的广大地区, 浙江省处于华东沿海酸雨区 (江、浙、沪、皖、赣等省、市部分或大部分地区) 的东南部。在我国经济建设、工业化和城市化迅速发展, 能源消耗量不断增加, 导致酸雨问题的解决变得越来越迫切。从“六五”到“八五”期间浙江省降水 pH 值年平均从 5.0 以上降至 4.7 以下, 酸雨率从 35% 升至 63.3%, 全省酸雨覆盖率达 95%, 且酸雨污染开始从城市向农村蔓延^[2-3]。

酸雨对生态系统造成巨大影响, 严重干扰了生态系统的物质循环与能量流动, 这方面已有大量的报道^[4-8]。凋落物分解是生态系统物质循环的重要环节, 它连接着生物有机体的合成与分解, 其分解过程直接影响到碳在森林生态系统的积累和营养物质及其他化学组分向土壤的归还和土壤养分的有效性, 进而影响到森林生态系统的物质循环^[9-15]。然而从 20 世纪 70 年代以来国内外大量开展的酸雨对森林生态系统影响研究主要集中在酸雨对植物形态结构和生理生化性质的影响以及酸雨对土壤理化性质的影响方面^[16-19], 而在酸雨对凋落物分解过程影响方面关注还不多。酸雨对凋落物分解的影响与养分还原, 生态系统碳循环和碳平衡、退化生态系统的恢复、生态系统对酸雨的临界负荷等方面具有密切联系^[20-22]。特别是敏感区凋落物对酸雨胁迫的反应模式, 可以为分析酸雨危害下生态系统的缓冲能力和可修复性等问题提供重要依据。

毛竹 *Phyllostachys pubescens* 是中国南方重要的森林资源, 具有生长速度快、可以隔年连续采伐及永续利用等特点, 经济用途非常广泛, 是当地农民经济收入的重要来源^[23]。中国亚热带区域广泛分布的毛竹林是我国碳平衡和碳收支非常重要的汇和库^[24, 25]。毛竹的凋落物数量较大, 其凋落分解的工作已有一些报道^[26-27]。但是, 酸雨胁迫下, 毛竹凋落物分解的规律未见报道。在经济发展和全球变化的巨大压力下, 研究酸雨对中国毛竹生态系统物质循环的影响, 摸清其机理, 找出防治措施, 具有十分重要的理论和实用价值。本文通过研究酸雨对毛竹林凋落物分解过程的影响, 揭示有关的机制, 可为深入理解毛竹林生态系统功能, 以及指导毛竹林地力恢复的实践提供重要的信息。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毛竹实验样品采自浙江省临安市天目山国家自

然保护区内 ($30^{\circ}18'30'' \sim 30^{\circ}24'55'' \text{ N}$, $119^{\circ}23'47'' \sim 119^{\circ}28'27'' \text{ E}$), 海拔 600 ~ 800 m。该区属亚热带气候, 年均温度为 8.8 ~ 14.8 $^{\circ}\text{C}$, 年均降水为 1 390 ~ 1 870 mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 5 100 ~ 2 500 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 76% ~ 81%。土壤为红壤、黄壤、黄红壤或棕黄壤, 呈酸性, pH 值 (水浸) 4.7 ~ 6.0。

1.2 样品收集及处理

2006 年 4 月收集毛竹凋落叶。采用常规的分解袋方法, 凋落物分解袋为 15 cm \times 15 cm, 由尼龙网制成, 孔径为 0.5 mm \times 1 mm。分解袋内装有 10 g 左右的风干凋落物。凋落物采集后风干, 充分混匀并取出子样品于 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量, 用于测定风干质量与烘干质量的转换系数。取混合样品测定其化学成分含量用于描述凋落物基质养分状况。

模拟酸雨胁迫实验大棚位于浙江省临安市浙江林学院的实验地内。根据浙江省酸性降水中的平均离子组成及通常模拟酸雨实验中所采用的配比, 按 H_2SO_4 : HNO_3 体积比 8:1 的比例配制母液, 用水稀释成 pH 值分别为 2.5 和 4.0 的酸雨溶液。根据浙江临安地区多年月均降水量, 每周每袋凋落物喷淋约 400 mL (与当地总的降水量持平)。同时设置对照 (pH 5.6)。

实验设置中度 (pH 4.0) 和重度 (pH 2.5) 酸雨胁迫处理和对照实验, 每种处理 3 次重复。于 2006 年 9 月将分解袋布置在模拟酸雨大棚中, 每隔 1 个月同一时间取样, 每种凋落物每个处理取 3 袋。至 2008 年 3 月末, 共计 9 次取样数据。取样后将分解袋上的杂物剔除, 于 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量, 称量。

凋落物基质化学成分的测定包括全碳 (TC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、灰分和木质素含量的测定。TC 用重铬酸钾氧化 - 外加热法 (GB7857 - 87), TN 用半微量凯氏定氮法 (GB7848 - 87), TP 用钼锑抗比色法 (GB7852 - 87), TK 用火焰分光光度计法 (GB7874 - 87), 灰分含量采用高温炉燃烧法 (GB7885 - 87), 木质素含量采用体积分数 72% 硫酸法 (GB2677.8 - 94) 测定。

1.3 数据分析

采用拟合效果较好的指数衰减模型估算了解速率:

$$X_t / X_0 = 100 e^{-kt} \quad (1)$$

式中, X_t 为凋落物在 t 时间的质量; X_0 为初始质量; k 是分解速率 (a^{-1}), t 是分解时间 (a)。

凋落物剩余率 = (某一时间凋落物干质量 / 初始时间干质量) $\times 100\%$

2 结果与分析

2.1 毛竹凋落物的基质化学成分组成

酸雨对凋落物基质质量的影响包括对凋落物表面性质、硬度和形态等的物理属性和构成凋落物组织的易分解成分 (N、P 等) 和难分解有机成分 (木质素、纤维素和多酚类物质等) 的含量等化学属性的改变。凋落物的基质质量是影响凋落物分解的内在因素, 对凋落物分解速率和养分释放均有一定影响。毛竹凋落物的全碳含量为 $(43.07 \pm 0.87)\%$ (平均值 \pm 标准差), 木质素含量为 $(13.84 \pm 0.11)\%$, C/N 和木质素/N 比值分别为 20.91 和 6.72。毛竹凋落物的全氮、全磷和全钾含量为 $(2.06 \pm 0.05)\%$, $(0.08 \pm 0.001)\%$ 和 $(0.32 \pm 0.02)\%$ 。高志勤曾对浙江省富阳市 6 种不同类型的毛竹林凋落物的冬季和夏季的养分状况的进行调查, 其结果中毛竹凋落物全氮、全磷和全钾的含量变化范围为 0.039% ~ 1.989%, 0.027% ~ 0.087% 和 0.119% ~ 0.33%^[23]。本文结果与其养分测定的数值一致。

2.2 毛竹凋落物分解速率

利用指数衰减模型, 对不同酸雨处理的凋落物剩余干重率与时间进行拟合, 毛竹凋落物的分解速率 k 值在 0.33 ~ 0.69 之间 (表 1)。毛竹的分解速率 k 值随着酸雨胁迫强度的增强而减小。酸雨胁迫环境对毛竹的影响很大, 中度和重度酸雨胁迫下, 其分解速率分别小于对照组 0.12 和 0.36。李正才在对浙江富阳市毛竹凋落物分解过程进行负指数方程拟合时得到粗放经营的毛竹林凋落物分解速率为 0.85, 而集约经营的毛竹林凋落物分解速率为 0.65^[28]。本研究的对照组凋落物分解速率与其集约经营的毛竹林凋落物分解速率相近, 可能是与本研究中收取凋落物的样地毛竹密度较高有关。

表 1 酸雨胁迫下毛竹叶凋落物分解 18 个月剩余干重率数据的指数衰减模型拟合结果

Table 1 Results of fitting a single-exponential decay model for *P. pubescens* leaf litter under acid rain stress using the mass remaining data over 18 months

处理	k	r^2	$t_{0.5}$	$t_{0.95}$
pH 2.5	0.33	0.46	2.10	9.08
pH 4.0	0.57	0.92	1.22	5.26
对照	0.69	0.84	1.00	4.34

注: k 为指数衰减模型中自变量的系数, 即分解速率; $t_{0.5}$ 为凋落物分解 50% 所需的时间 (a), $t_{0.95}$ 为凋落物分解 95% 所需的时间 (a)

对照组中凋落物分解 50% 所需的时间为 1.00 a, 95% 被分解所需的时间为 4.34 a, 酸雨胁迫影响下凋落物分解 50% 所需的时间为 1.22 ~ 2.10 a, 分解 95% 所需的时间为 5.26 ~ 9.08 a。可见酸雨胁迫导致了凋落物分解时间的延长。其中, 重度酸雨胁迫下毛竹凋落物分解 95% 的时间比中度胁迫下约长 3.82 a。

2.3 毛竹凋落物在不同酸雨胁迫强度下分解动态

由图 1 可见, 中度和重度酸雨胁迫均对凋落物分解有不同程度的抑制作用, 且酸雨胁迫越严重凋落物分解速率越慢。经过 18 个月的分解, 酸雨处理和对照组的毛竹的残留率为 42.81% ~ 64.71%。毛竹凋落物在 18 个月中, 失重率皆为在对照 > 中度胁迫 > 重度胁迫。分解开始的前 2 个月, 中度和重度酸雨胁迫下的失重率与对照的差值在 18 个月中几乎为最小值, 分别为 3.65% 和 14.44%。在分解的前 10 个月, 毛竹凋落物在中度酸雨胁迫下的失质量率与对照的差值在 3.65% ~ 16.14% 之间, 与重度酸雨胁迫下失重率的差值在 3.02% ~ 10.78% 之间, 二者的差值范围比较接近。而 12 ~ 18 个月间, 毛竹凋落物在中度酸雨胁迫下的失重率

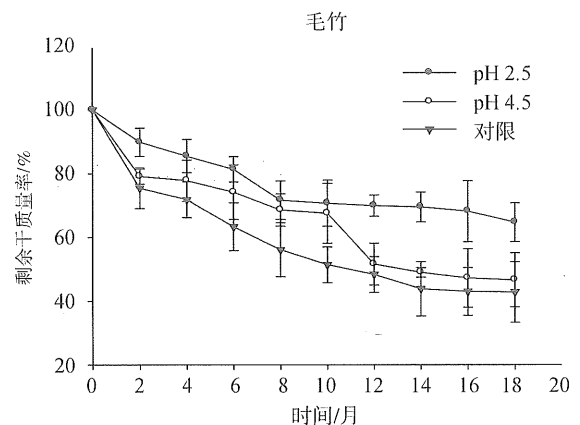


图 1 毛竹叶凋落物在不同酸雨胁迫强度下分解动态

Fig. 1 Dynamics of litter decomposition of *P. pubescens* leaf under different acid rain stress

小于对照组 3.22% ~ 5.13%, 但是中度和重度酸雨胁迫处理之间失重率的差值在 18.08% ~ 20.95% 之间。可见, 到了分解后期, 酸雨强度对毛竹凋落物分解的影响更加明显。

3 讨论

本文的研究结果发现酸雨会延缓毛竹凋落分解的速率。受控试验表明毛竹叶凋落物在中度和重度酸雨胁迫下, 与对照组相比, 其分解速率分别小 0.12 和 0.36, 95% 分解时间分别延长了 0.92 a 和

4.74 a, 即酸雨胁迫导致了毛竹叶凋落物分解速率的减慢, 并且随着胁迫的增强, 分解速率愈加减慢。这与 Neuvone 等^[29]、Wolters^[30] 和 Scheu^[31] 等模拟酸雨对凋落物分解影响的野外实验结果一致。Neuvone 等在芬兰进行为期 3 a 的野外实验结果表明, 模拟酸雨显著减缓了白桦叶凋落物的分解速率。Wolters 和 Scheu 等在德国观测了 1 a 内模拟酸雨对山毛榉凋落物分解的影响, 结果表明酸雨胁迫减缓了凋落物分解速率。

凋落物的分解过程十分复杂, 通常由可溶成分的淋溶过程、难溶成分 (如纤维素和木质素) 的微生物降解过程以及生物与非生物作用的碎化过程 3 个子过程组成^[32]。毛竹凋落物分解的初期阶段, 酸雨胁迫对凋落物失重率的影响与分解后期相比较小, 这主要是由于凋落物分解的淋溶过程一般经历时间较短, 表现为可溶成分的快速损失。这一阶段酸雨对凋落物分解的抑制作用尚未得到体现。

土壤的生物群落是决定特定森林生态系统中凋落物分解的关键生物因子, 是决定凋落物分解速率的主要驱动力^[33-36]。在我们的酸雨胁迫实验处理中, 土壤温度、土壤湿度和通气状况是基本一致的。各种微生物都有最适宜的 pH 范围, pH 过低会对微生物活性产生抑制作用^[32]。Garden 等的研究表明 pH 5.4 的降水条件下, 微生物对凋落物的分解活性高于 pH 3.0 和 pH 4.0 的模拟酸雨胁迫下的活性^[37]。周崇莲等的研究表明, 酸雨减弱土壤微生物的氨化作用和硝化作用强度, 而对固氮作用影响不明显^[38]。由此可见, 酸雨对土壤生物群落分解活性的抑制作用是导致分解速率减慢的主要原因。

由于土壤是酸雨的最大承受者, 酸雨对生态系统的危害往往通过土壤间接体现, 因此酸雨对土壤系统的影响备受关注。大量酸性物质输入土壤, 土壤生态系统接受了更多的 H^+ 荷载, 不可避免地引起土壤酸化。土壤酸化是指土壤中可交换盐基离子减少或交换性酸增加。凋落物层对于土壤酸化有一定的缓冲作用^[39]。汪思龙等^[40] 和陈堆全^[41] 的模拟酸雨淋溶实验结果表明, 木荷凋落物可通过提高下渗液盐基含量和 pH 值以及土壤本身的盐基饱和度和有机质含量, 降低土壤酸度和 Al/Ca 比值等途径来缓解土壤的酸化作用。此外凋落物层还可吸收降雨, 通过保持水土来缓冲酸雨的对土壤系统的影响, 从而减缓了森林土壤酸化的进程。

毛竹是我国南方重要的森林资源, 并且近年来种植面积有不断增大的趋势^[23]。然而毛竹的种植

很大一部分分布在酸雨比较严重的区域, 发挥凋落物层在酸雨对土壤生态系统的作用过程中的缓冲作用尤为重要。因毛竹轮伐期短, 集约经营程度高, 尤其是毛竹林连年垦翻的经营措施对凋落物层的缓冲作用产生深刻影响。虽然对毛竹林地进行垦翻可以改善土壤的水热通气状况, 利于微生物对凋落物的分解^[23]。但是由于多数土壤表层的凋落物被翻入土壤内, 制约了凋落物通过拦截、淋溶等方式缓冲酸雨对土壤系统胁迫的作用, 导致森林土壤遭受更严重的酸雨影响, 最终对森林生态系统产生较大的危害。因此, 在酸雨危害严重的区域经营时尽量减少翻耕频率, 对于增加毛竹林生态系统对酸雨危害的抵御能力十分重要。

致谢: 感谢刘昊、黄志伟硕士野外采样、谈晔助理室内分析实验的帮助。

参考文献:

- [1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策 [J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 5-11.
- [2] 牟永铭, 朱光良. 基于 GIS 技术的浙江省酸雨区分布研究 [J]. 科技通报, 2005, 21(3): 356-359.
- [3] 林丰妹, 焦荔, 盛侃, 等. 杭州市酸雨污染现状及成因分析 [J]. 环境监测管理与技术, 2004, 16(3): 17-20.
- [4] WANG Y H, SOLBERG S, YU P T, et al. Assessments of tree crown condition of two Masson pine forests in the acid rain region in south China [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 242(2/3): 530-540.
- [5] SZYMKIEWICZ A, MODELSKA M, JEDRYSEK M O, et al. The effect of acid rain and altitude on concentration, delta S-14, and delta O-18 of sulfate in the water from Sudety Mountains, Poland [J]. Chemical Geology, 2008, 249(1/2): 36-51.
- [6] SONG X D, JIANG H, YU S Q, et al. Detection of acid rain stress effect on plant using hyperspectral data in Three Gorges region, China [J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(3): 249-254.
- [7] VAN BREEMEN N, WRIGHT R F. History and prospect of catchment biogeochemistry: A European perspective based on acid rain [J]. Ecology, 2004, 85(9): 2363-2368.
- [8] SHEVTSOVA A, NEUVONEN S. Responses of ground vegetation to prolonged simulated acid rain in sub-arctic pine-birch forest [J]. New Phytologist, 1997, 136(4): 613-625.
- [9] SANTIAGO L S. Extending the leaf economics spectrum to decomposition: Evidence from a tropical forest [J]. Ecology, 2007, 88(5): 1126-1131.

- [10] MOORHEAD D, CURRIE W, RASTETTER E, et al. Climate and Litter Quality Controls on Decomposition: An Analysis of Modeling Approaches [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(2): 575 - 589.
- [11] NGAO J, EPRON D, BRECHET C, et al. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1768 - 1776.
- [12] 邓小文, 张岩, 韩士杰, 等. 外源氮输入对长白山红松凋落物早期分解的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6): 16 - 22.
- [13] 樊后保, 刘文飞, 杨跃霖, 等. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 8 - 13.
- [14] 孙志高, 刘景双, 于君宝, 等. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响 [J]. *环境科学*, 2008, 29(8): 2081 - 2093.
- [15] 李国雷, 刘勇, 李瑞生, 等. 油松叶凋落物分解速率、养分归还及组分对间伐强度的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(5): 52 - 57.
- [16] SUOMELA J, NEUVONEN S. Effects of long-term simulated acid rain on suitability of mountain birch for *Epirrita autumnata* (Geometridae) [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1997, 27(2): 248 - 256.
- [17] THIRUKKUMARAN C M, MORRISON I K. Impact of simulated acid rain on microbial respiration, biomass, and metabolic quotient in a mature sugar maple (*Acer saccharum*) forest floor [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(8): 1446 - 1453.
- [18] MENON M, HERMLE S, GUNTARDT-GOERG M S, et al. Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem [J]. *Plant And Soil*, 2007, 297(1 - 2): 171 - 183.
- [19] LIKENS G E, DRISCOLL C T, BUSO D C. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem [J]. *Science*, 1996, 272(5259): 244 - 246.
- [20] 陶福祿, 冯宗炜. 生态系统的酸沉降临界负荷及其研究进展 [J]. *中国环境科学*, 1999, 19(2): 123 - 126.
- [21] 段雷, 郝吉明, 周中平, 等. 确定不同保证率下的中国酸沉降临界负荷 [J]. *环境科学*, 2002, 23(5): 25 - 28.
- [22] 郝吉明, 段雷, 谢绍东. 中国土壤对酸沉降的相对敏感性区划 [J]. *环境科学*, 1999, 20(4): 1 - 5.
- [23] 高志勤, 傅懋毅. 毛竹林凋落物养分状况的林型变异特征 [J]. *林业科学*, 2007, 43(S1): 95 - 100.
- [24] 周国模, 吴家森, 姜培坤. 不同管理模式对毛竹林碳贮量的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(6): 51 - 55.
- [25] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布 [J]. *林业科学*, 2004, 40(6): 20 - 24.
- [26] 傅懋毅, 方敏瑜, 谢锦忠, 等. 竹林养分循环 I. 毛竹纯林的叶凋落物及其分解 [J]. *林业科学研究*, 1989, 2(3): 207 - 213.
- [27] 王纪杰, 徐秋芳, 姜培坤. 毛竹凋落物对阔叶林土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. *林业科学*, 2008, 44(9): 146 - 151.
- [28] 李正才, 徐德应, 杨校生, 等. 7种不同林农土地利用类型残体的有机碳储量 [J]. *浙江林学院学报*, 2007, 24(5): 581 - 586.
- [29] NEUVONEN S, SUOMELA J. The effect of simulated acid-rain on pine needle and birch leaf litter decomposition [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1990, 27(3): 857 - 872.
- [30] WOLTERS V. Effects of acid-rain on leaf-litter decomposition in a beech forest on calcareous soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 11(2): 151 - 156.
- [31] SCHEU S, WOLTERS V. Buffering of the effect of acid-rain on decomposition of C-14-labeled beech leaf litter by saprophagous invertebrates [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 11(4): 285 - 289.
- [32] 蔡晓明. 生态系统生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [33] 高志红, 张万里, 张庆费. 森林凋落物生态功能研究概况及展望 [J]. *东北林业大学学报*, 2004, 32(6): 79 - 80, 83.
- [34] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展 [J]. *林业科学*, 2006, 42(4): 93 - 100.
- [35] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 60 - 64.
- [36] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应 [J]. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534 - 1544.
- [37] GARDEN A, DAVIES R W. Decomposition of leaf litter exposed to simulated acid-rain in a buffered lotic system [J]. *Freshwater Biology*, 1989, 22(1): 33 - 44.
- [38] 周崇莲, 齐玉臣. 酸雨对土壤微生物活性的影响 [J]. *生态学杂志*, 1988, 7(2): 21 - 24.
- [39] 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 [J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 938 - 944.
- [40] 汪思龙, 陈楚莹. 森林凋落物对土壤酸化缓冲作用的初步研究 [J]. *环境科学*, 1992, 13(5): 25 - 30.
- [41] 陈堆全. 木荷凋落物分解及对土壤作用规律的研究 [J]. *福建林业科技*, 2001, 28(2): 35 - 38.