

4 种亚热带树木凋落叶的分解研究

窦荣鹏¹, 江 洪^{1,2}, 余树全¹, 马元丹¹, 宋新章¹, 郭培培¹, 张小川³

(1. 浙江林学院 国际空间生态与生态系统研究中心, 浙江 临安 311300; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093; 3. 阿尔伯塔大学 可更新资源系, 阿尔伯塔 埃德蒙顿 T6G2R3)

摘要: 选择中国亚热带分布较广的树种马尾松 *Pinus massoniana*, 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*, 香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 和山核桃 *Carya cathayensis*, 采用分解袋法对其凋落叶分解进行研究。结果表明: 马尾松凋落叶分解最慢, 年分解系数为 0.49, 香榧分解最快, 年分解系数为 1.70, 分解速率从大到小依次为香榧、山核桃、青冈和马尾松。4 种凋落叶的分解速率与初始全氮质量分数呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与初始全磷质量分数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 凋落叶的初始氮、磷质量分数可以作为预测这 4 个树种在亚热带分解快慢的良好指标。分解过程中马尾松、青冈和山核桃凋落叶的氮和磷均有不同程度的富集现象。青冈和香榧的钾质量分数在前 2 个月就分别从 6.22 和 11.16 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 1.96 和 2.05 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 之后趋于稳定, 马尾松则表现为先下降后升高。图 1 表 6 参 23

关键词: 森林生态学; 亚热带; 凋落叶; 分解袋法; 养分循环; 碳循环

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-5692(2010)02-0163-07

Leaf litter decomposition of four tree species in subtropical China

DOU Rong-peng¹, JIANG Hong^{1,2}, YU Shu-quan¹, MA Yuan-dan¹, SONG Xin-zhang¹,
GUO Pei-pei¹, ZHANG Xiao-chuan³

(1. International Ecological Research Center, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

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

3. Renewable Resources, University of Alberta, Edmonton T6G2R3, Alberta, Canada)

Abstract: In order to know its material cycling in the forest ecosystem for better sustainable management, leaf litter of four tree species (*Pinus massoniana*, *Cyclobalanopsis glauca*, *Torreya grandis*, and *Carya cathayensis*) from subtropical China was studied in a decomposition experiment with nylon bag using a correlation analysis. Leaf litter were collected in Chun'an County of Zhejiang Province, in March of 2006, drying at 80 °C to constant weight, packed with 144 nylon bags, then replaced to evergreen broad-leaf forest's ground surface. Twelve bags were withdrawn once a month. Then determine weight loss rate, and N, P, K, C and lignin contents variation. Results showed that the decomposition rate of *T. grandis* was fastest, annual decomposition coefficient (k) is 1.70, whereas the slowest was *P. massoniana*, $k = 0.49$. The correlation analysis was significant for litter decomposition rate and both initial N concentration ($r = 0.99$, $P < 0.01$) and initial P concentration ($r = 0.97$, $P < 0.05$). During litter decomposition, N and P concentrations in leaf litter of *Carya cathayensis*, *P. massoniana*, and *Cyclobalanopsis glauca* increased. Also, rapid decreases were found in the first two months with K concentrations of *Cyclobalanopsis glauca*

收稿日期: 2009-02-24; 修回日期: 2009-06-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2005CB422207, 2005CB422208); 国家自然科学基金资助项目(40671132, 30970485); 科学技术部数据共享平台建设项目(2006DKA32300-08); 国际科技合作计划项目(200073819); 科学技术部科技基础性工作专项(2007FY110300-08); 浙江省科学技术重大项目(2006C12060); 浙江省森林培育重中之重学科开放基金资助项目(200608)

作者简介: 窦荣鹏, 硕士, 从事恢复生态学研究。E-mail: dourpj@163.com。通信作者: 江洪, 教授, 博士, 从事生态系统生态学、全球生态学和森林生态学等研究。E-mail: hongjiang.china@gmail.com

($6.22 - 1.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and *T. grandis* ($11.16 - 2.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); then they decrease slowly. However, *P. massoniana* decreased ($0.88 - 0.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the beginning then increased ($0.54 - 1.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Thus, initial N and P leaf litter concentrations were sensitive indicators for decomposition rates in subtropical China. [Ch, 1 fig. 6 tab. 23 ref.]

Key words: forest ecology; subtropical; leaf litter; decomposition; nutrient cycle; carbon cycle

凋落物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,也是陆地生态系统初级生产力的重要物质来源^[1]。分解过程中的养分释放,对维持土壤肥力,保持植物再生长养分的可利用性,促进生态系统正常的物质循环和养分平衡发挥着重要作用^[2-3]。因此,凋落物分解动态和影响因素的研究一直是现代生态学的中心科学问题之一。马尾松 *Pinus massoniana* 是中国南方分布面积最大的树种之一,是典型的演替先锋树种,具有重要价值;青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 为常绿乔木,是常绿阔叶林的主要组成树种^[4],在中国长江以南各省普遍分布。经济树种香榧 *Torreya grandis* 'Merrillii' 和山核桃 *Carya cathayensis* 为中国特有的珍贵经济树种,著名的干果,至今已有上千年的人工栽培历史。在亚热带,这4个树种凋落叶的分解在区域碳循环和营养循环中起着重要作用^[5]。目前,关于青冈和马尾松凋落物分解的研究报道已经很多,但是,香榧和山核桃凋落物分解方面的研究还未见报道。因此,作者选取这4个树种的凋落叶进行实验,目的是了解这4个树种凋落叶在相同条件下的分解过程,探求氮、磷、钾等营养元素在分解过程中的释放规律和种间的差异,以便为这些树种的经营管理提供指导,获取更大的经济效益,同时为揭示这4个树种在区域碳循环和营养循环中的贡献提供重要基础信息。

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

凋落叶分解样地位于浙江省千岛湖姥山林场常绿阔叶林内,地理坐标为 $29^{\circ}31' \text{ N}$, $118^{\circ}58' \text{ E}$,海拔为 172 m,年均气温 17.0° C ,年均降水量 1 430 mm,土壤类型为山地红黄壤。

1.2 凋落叶采集及样地布置

2006年3-4月中旬分别采集香榧、山核桃、青冈和马尾松等4个树种凋落的新鲜叶片,凋落叶采集后自然风干。风干样留取一部分于 80° C 烘至恒量,测定含水率,同时进行化学分析测定凋落叶的木质素、碳、氮、磷、钾元素的初始质量分数。

将凋落叶称量后放入孔径为 $1.0 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$,网袋大小为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 的分解袋中,每袋约 10 g,然后于 2006年5月将4个树种的凋落叶分解网袋分别放入千岛湖姥山林场常绿阔叶林内,放置时使凋落袋贴近地表,并设3个重复,共计 144 袋。

1.3 样品的处理

各月取回1次凋落袋,共 12 袋·次⁻¹。凋落叶分解袋取回后,用清水快速漂洗,洗净凋落袋表面附着的泥沙,剔除长入分解袋内的根系,于 80° C 烘箱中烘干至恒量并称量,粉碎后进行化学组分的分析。

全氮采用碱解扩散法,全磷采用钼锑抗比色法,全钾采用火焰分光光度法。具体步骤为:称取 0.50 g 样品,加 5 mL 浓硫酸,煮至澄清,冷却后过滤。测氮时取 5 mL 滤液于扩散皿中,加 3 mL 硼酸和 2 mL $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠,放置 24.0 h 测定;测磷时取 10 mL 滤液到 50 mL 容量瓶中,加 2 滴显色剂和 20 mL 蒸馏水,酸碱中和,后加 5 mL 钼锑抗,定容放置 0.5 h 后测定;测钾时取 10 mL 滤液至 50 mL 容量瓶中,定容后用火焰分光光度计测定。全碳的测定方法是:称取 0.01 g 样品,加入浓硫酸和重铬酸钾各 5 mL,在 $175 \sim 180^{\circ} \text{ C}$ 煮沸 5 min,冷却后用硫酸亚铁滴定。木质素的测定方法是:称取 1.00 g 样品,用 2:1 苯醇混合液抽提 6.0 h,后取出风干,再把样品转移到 1 000 mL 锥形瓶中,加 15 mL 体积分数为 72% 的浓硫酸, 20° C 保温 2.0 h,加 545 mL 水煮沸 4.0 h,冷却过滤后在 70° C 烘干至恒量,称量,测定各个样品的灰分质量分数,所有结果都是无灰分的。

1.4 数据处理

用常用的 Olson 指数模型^[6]计算凋落叶的分解速率： $X_t / X_0 = e^{-kt}$ 。其中： X_t 表示时间 t 时的干质量(g)， X_0 表示凋落叶的初始干质量(g)， k 表示凋落叶的年分解系数($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)。

采用单因素方差分析比较不同树种凋落叶初始化学元素质量分数的差异，及其凋落叶初始化学元素质量分数组成与分解速率之间的相关性。在数据分析前，对所有数据进行正态性与齐性检验。数据处理分析利用 SPSS 13.0 软件进行。

2 结果分析

2.1 凋落叶的分解过程

由图 1 可知，用材树种马尾松和青冈凋落叶的干质量剩余率下降缓慢，分解 1 a 后分别剩 64.41% 和 58.67%；而经济树种香榧和山核桃凋落叶分解可分为 3 个阶段。香榧凋落叶的第 1 阶段为前 4 个月，干质量快速下降，月平均分解率达到 13.37%，第 2 阶段为第 5 ~ 9 个月，此阶段分解缓慢，月平均分解率仅为 1.65%，第 3 阶段为第 10 ~ 12 个月，月平均分解率为 8.24%。山核桃凋落叶第 1 阶段为前 2 个月，第 2 阶段为第 3 ~ 4 个月，第 3 阶段为第 5 ~ 12 个月，除第 2 阶段分解较快，月平均分解率达 18.26%，其余 2 个阶段分解均较缓慢，到 1 a 结束之时还剩 35.51%。

由表 1 可知，4 个树种凋落叶分解速率大小依次为香榧、山核桃、青冈和马尾松，凋落叶 95% 分解所需的时间为 2 ~ 6 a，其中分解最快的是香榧，年分解系数 k 为 1.70，95% 分解所需的时间仅为 1.76 a；分解最慢的是马尾松， k 为 0.49，95% 分解所需的时间为 6.11 a。

表 1 凋落叶分解速率、相关系数、半分解和 95% 分解时间

Table 1 Leaf litter decomposition rate of four species, correlation coefficient, time of half and 95% decomposition

树种	分解系数	相关系数	$t_{0.50}$	$t_{0.95}$
马尾松	0.49	0.93	1.41	6.11
青冈	0.56	0.88	1.24	5.35
香榧	1.70	0.85	0.41	1.76
山核桃	1.25	0.93	0.55	2.40

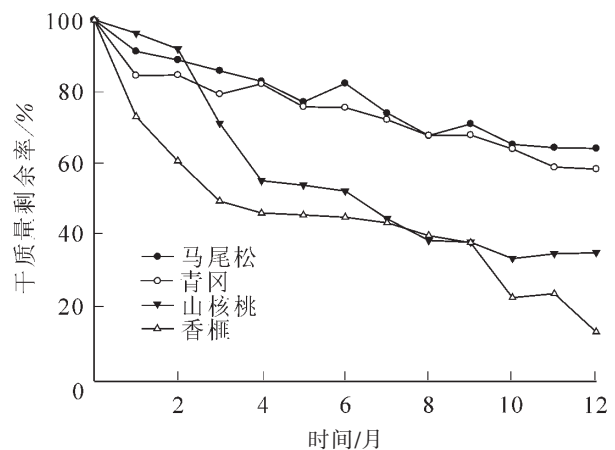


图 1 4 种凋落叶在 1 a 分解过程中干质量剩余率的变化

Figure 1 Dynamics of dry mass remaining rate in process of leaf litter decomposition of four species during the first year

2.2 养分动态变化

由表 2 可看出，青冈和山核桃凋落叶的氮质量分数都是分解初期降低，尤其是山核桃凋落叶在分

表 2 凋落叶氮元素质量分数的年变化

Table 2 Variation of nitrogen concentration of leaf litter in the first year

树种	凋落叶内氮质量分数的年变化/($g \cdot kg^{-1}$)						
	第 0 月	第 2 月	第 4 月	第 6 月	第 8 月	第 10 月	第 12 月
马尾松	8.12 ± 0.032	12.47 ± 0.415	9.60 ± 0.092	7.48 ± 0.022	8.90 ± 0.103	8.13 ± 0.102	3.24 ± 0.214
青冈	10.97 ± 0.033	10.09 ± 0.029	10.61 ± 0.077	8.34 ± 0.016	11.74 ± 0.102	11.10 ± 0.092	11.34 ± 0.182
香榧	20.05 ± 0.148	18.70 ± 0.279	18.28 ± 0.308	12.29 ± 0.148	15.45 ± 0.119	13.73 ± 0.282	15.52 ± 0.565
山核桃	16.34 ± 0.055	8.02 ± 0.165	11.93 ± 0.251	14.19 ± 0.349	10.61 ± 0.269	8.68 ± 0.058	16.54 ± 0.048

说明：表内数据为平均值±标准差。

解前 2 个月氮质量分数就从 16.34 g·kg⁻¹ 下降到 8.02 g·kg⁻¹, 损失率达到 50.92%, 一段时间后开始发生富集, 质量分数上升。香榧变化的总体趋势是逐渐下降, 到 1 a 结束之时凋落叶内氮质量分数为 15.52 g·kg⁻¹, 而马尾松凋落叶在前 2 个月先发生富集之后开始下降, 第 6 个月之后又开始富集, 1 a 之后马尾松氮质量分数比初始值增加了 54.26%。

由表 3 可见, 马尾松、青冈和香榧等凋落叶磷质量分数在前 2 个月下降较快, 之后香榧变化趋于平缓, 马尾松和青冈则开始出现积累, 而且马尾松 1 a 后仍呈富集趋势, 这可能是由于磷元素富集缓慢或初始质量分数较低需要富集的量很大所导致^[7]。山核桃凋落叶磷元素则前期下降, 第 10 个月之后开始出现积累。

表 3 凋落叶磷元素质量分数的年变化

Table 3 Variation of phosphorus concentration of leaf litter in the first year

树种	凋落叶内磷质量分数的年变化/(g·kg ⁻¹)						
	第 0 月	第 2 月	第 4 月	第 6 月	第 8 月	第 10 月	第 12 月
马尾松	0.21 ± 0.000	0.15 ± 0.001	0.24 ± 0.001	0.21 ± 0.001	0.22 ± 0.000	0.23 ± 0.001	0.32 ± 0.002
青冈	0.47 ± 0.001	0.38 ± 0.000	0.49 ± 0.003	0.43 ± 0.000	0.51 ± 0.002	0.45 ± 0.003	0.44 ± 0.001
香榧	1.88 ± 0.002	0.93 ± 0.008	0.80 ± 0.001	0.81 ± 0.000	0.85 ± 0.004	0.88 ± 0.002	0.85 ± 0.002
山核桃	1.06 ± 0.006	1.06 ± 0.001	0.99 ± 0.006	0.66 ± 0.001	0.87 ± 0.001	0.63 ± 0.003	1.23 ± 0.004

说明: 表内数据为平均值±标准差。

由表 4 可见, 青冈和香榧凋落叶的钾质量分数在最初 2 个月便快速下降, 青冈凋落叶经 2 个月的分解后, 从 6.22 g·kg⁻¹ 下降到 1.96 g·kg⁻¹, 损失率达到 65.10%, 而香榧凋落叶经 2 个月的分解后损失率达 81.60%, 之后便稳定在一定范围内。马尾松凋落叶表现为初期短暂下降后便呈上升趋势, 而山核桃凋落叶则表现出升高与下降交替发生的现象, 规律不明显。

表 4 凋落叶钾元素质量分数的年变化

Table 4 Variation of potassium concentration of leaf litter in the first year

树种	凋落叶内钾质量分数的年变化/(g·kg ⁻¹)						
	第 0 月	第 2 月	第 4 月	第 6 月	第 8 月	第 10 月	第 12 月
马尾松	0.88 ± 0.007	0.69 ± 0.003	0.54 ± 0.003	1.07 ± 0.020	1.04 ± 0.003	2.76 ± 0.002	1.90 ± 0.003
青冈	6.22 ± 0.007	1.96 ± 0.002	1.80 ± 0.004	2.08 ± 0.004	1.80 ± 0.006	1.77 ± 0.006	2.17 ± 0.006
香榧	11.16 ± 0.005	2.05 ± 0.025	1.99 ± 0.012	2.74 ± 0.004	1.86 ± 0.011	2.60 ± 0.013	2.22 ± 0.010
山核桃	1.53 ± 0.002	3.36 ± 0.020	2.08 ± 0.023	3.28 ± 0.012	2.11 ± 0.019	4.05 ± 0.052	1.81 ± 0.054

说明: 表内数据为平均值±标准差。

4 种凋落叶的初始化学组成见表 5。可见, 香榧凋落叶碳和木质素质量分数、碳氮比、木质素/氮

表 5 凋落叶的初始化学组成

Table 5 Initial chemical composition of leaf litter

树种	凋落叶的初始化学组成/(g·kg ⁻¹)					碳氮比	木质素/氮
	氮	磷	钾	碳	木质素		
马尾松	8.1(0.03) a	0.2(0.00) a	0.9(0.01) a	511.8(2.99) a	414.4(1.59) a	63.01(3.68) a	51.01(1.96) a
青冈	11.0(0.03) b	0.5(0.00) b	6.2(0.01) b	467.0(3.81) ab	334.7(6.86) b	42.57(3.47) b	30.43(6.98) b
香榧	20.1(0.15) c	1.9(0.00) c	11.2(0.00) c	383.9(6.79) ab	183.0(1.51) b	19.15(4.73) c	9.10(0.16) c
山核桃	16.3(0.06) d	1.1(0.00) d	1.5(0.00) d	450.8(3.17) b	326.6(2.97) c	27.58(1.19) d	19.98(1.82) d

说明: 括号内为 3 次重复的标准差; 同列相同字母表示没有显著差异(P<0.05)。

最低，氮、磷、钾质量分数最高；马尾松氮、磷、钾质量分数最低，碳、木质素、碳氮比和木质素/氮最高，青冈和山核桃的各元素质量分数则介于两者之间。

由表 6 可知，凋落叶的分解速率与初始全氮质量分数呈极显著正相关($P<0.01$)，与初始全磷质量分数呈显著相关($P<0.05$)，与木质素、碳质量分数、碳氮比和木质素/氮等呈负相关，但不显著，这表明凋落叶中的初始全氮和磷质量分数是影响这 4 种凋落叶在亚热带分解快慢的最主要因素。

表 6 凋落叶分解速率与初始化学成分相关性分析

Table 6 Correlation analysis between decomposition rate of leaf litter and initial chemical composition

项目	相关系数	显著性	项目	相关系数	显著性	项目	相关系数	显著性
氮	0.993**	0.007	碳	- 0.917	0.083	碳氮比	- 0.872	0.128
磷	0.973*	0.027	木质素	- 0.948	0.052	木质素/氮	- 0.932	0.068
钾	0.567	0.433						

说明：**在 0.01 水平差异显著，*在 0.05 水平差异显著； $n=12$ 。

3 结论与讨论

4 个树种凋落叶的分解速率大小依次为香榧、山核桃、青冈和马尾松。用材树种马尾松和青冈凋落叶的干质量剩余率下降缓慢，经过 1 a 后分解率还不到 50%，而经济树种香榧和山核桃的干质量剩余率在前 4 个月下降较快，之后趋缓。到 1 a 结束时，香榧的干质量剩余率仅为 13.57%，而分解最慢的马尾松 1 a 后干质量剩余率为 64.41%。本研究用 Olson 指数衰减模型对质量损失率试验结果进行拟合，效果较好。根据该模型可知 4 种凋落叶分解 95%所需的时间为 2 ~ 6 a，该结果介于中国暖温带常见树种和南亚热带鼎湖山植被凋落物分解 95%所需时间(分别为 8 ~ 17 a 和 2 ~ 8 a)之间^[7]。这主要是由于亚热带季风区高温高湿，较适合土壤微生物的生长，对凋落叶的分解极为有利，因此，凋落叶的分解较快。

在凋落叶分解过程中马尾松、青冈和山核桃凋落叶的氮和磷元素均出现了不同程度的富集现象。氮和磷元素的富集在凋落叶分解过程中普遍存在，因为在凋落叶分解过程中，异养生物活动对氮元素有明显的需要，当凋落叶中初始氮质量分数较低时，微生物会从外界环境中吸收氮元素来满足自身活动的需要，这样便引起了氮、磷等元素质量分数上升。在已有很多研究中都发现了氮元素富集的现象^[8-11]。杨玉盛等^[12]在对亚热带针叶林的凋落物分解实验中也发现了磷元素的增加趋势。本研究结果再次证明了在凋落物分解过程中氮、磷元素会发生富集这一结论的正确性。同时，我们发现青冈和香榧凋落叶钾质量分数在前 2 个月快速下降之后变化趋缓，而马尾松则表现为先降低后升高，山核桃的变化没有规律。赵谷风等^[13]在青冈常绿阔叶林凋落物分解实验中也得出了类似的结果。我们认为，这可能是由于这 2 种凋落物中钾元素的初始质量分数低造成的。有相似的研究表明，初始质量分数较低的元素易发生富集，且分解过程中常常出现波动，其变化过程没有固定模式^[14]。

在本研究中，凋落叶的分解速率与初始全氮质量分数呈极显著正相关($P<0.01$)，与初始全磷质量分数呈显著正相关($P<0.05$)，但是与碳和木质素、木质素/氮等相关关系不显著。这表明，在相同的外界条件下，凋落叶中的初始氮、磷质量分数是影响凋落叶分解快慢的主要因素。大量研究表明，凋落物中的氮、磷、碳、木质素质量分数和碳氮比、木质素/氮是常见的反映凋落物分解快慢的指标^[15-18]。凋落叶中碳及碳氮比越低，分解质量损失及元素释放速率就越高，随着凋落叶的分解，其中的难分解物质(如木质素等)相对增加，使分解速率变缓^[19-20]。Joseph 等^[21]对北美长叶松 *Pinus palustris* 林等 7 种凋落物的分解研究表明，凋落物碳氮比、酸性难溶物/氮和磷质量分数可以显著预测凋落物的分解速率。黄耀等^[22]在研究木质素和氮元素对植物残体分解的影响实验中也得出了植物残体的分解速率与初始全氮质量分数呈正相关，与初始木质素或木质素/氮呈负相关的相同结论。我们在千岛湖中亚热带森林群落不同演替阶段优势种凋落物分解实验中也发现，分解速率同凋落物的初始磷、氮和木质素质量分数及木质素/氮呈极显著相关，同碳氮比有显著相关关系^[23]。本研究结果同其他研究

结果之间比较,虽然树种不同和研究区域存在着一定差异,但其基本结论相似。我们初步认为,在中国亚热带地区,凋落叶的初始全氮和磷质量分数可以作为预测马尾松、青冈、山核桃和香榧这4种凋落叶分解快慢的良好指标。

参考文献:

- [1] MARTIN K D, SCOTT W. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie [J]. *Ecology*, 1997, **78**: 732 – 739.
- [2] 郭艳娜, 霍泌建, 袁玲. 森林土壤肥力概述[J]. 中国农学通报, 2004, **20** (3): 143 – 148.
GUO Yanna, HUO Mijian, YUAN Ling. Summarization of forest soil fertility [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2004, **20** (3): 143 – 148.
- [3] 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[J]. 应用与环境生态学报, 2003, **9** (4): 346 – 351.
LIN Bo, LIU Qing, WU Yan, *et al.* Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in subalpine coniferous forests of western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2003, **9** (4): 346 – 351.
- [4] 余树全. 浙江淳安天然次生林演替的定量研究[J]. 林业科学, 2003, **39** (1): 17 – 22.
YU Shuquan. The quantitative study on the secondary forest succession in Chun'an County, Zhejiang Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2003, **39** (1): 17 – 22.
- [5] 宋新章, 江洪, 马元丹, 等. 中国东部气候带的凋落物分解梯度实验: 研究气候和基质质量的综合影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (10): 5219 – 5226.
SONG Xinzhang, JIANG Hong, MA Yuandan, *et al.* Litter decomposition across climate zone in eastern China: the integrated influence of climate and litter quality [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **29** (10): 5219 – 5226.
- [6] OLSON J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological system [J]. *Ecology*, 1963, **44**: 322 – 331.
- [7] 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.
ZHANG Deqiang, YE Wanhui, YU Qingfa, *et al.* The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20** (6): 938 – 944.
- [8] BLAIR J M, PARMELEE R W, BEARE M H. Decay rates, nitrogen fluxes, and decomposer communities of single and mixed-species foliar [J]. *Ecology*, 1990, **71**: 976 – 985.
- [9] MELILLO J M, ABER J D, STEUDLER P A. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics [J]. *Ecology*, 1982, **63**: 621 – 626.
- [10] BERGB, STAAPH. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter [J]. *Ecol Bull*, 1981, **33**: 163 – 178.
- [11] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (2): 245 – 251.
LI Xuefeng, HAN Shijie, HU Yanling, *et al.* Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (2): 245 – 251.
- [12] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈银秀, 等. 福建柏和杉木人工林凋落物分解及养分动态的比较[J]. 林业科学, 2004, **40** (3): 19 – 25.
YANG Yusheng, GUO Jianfen, CHEN Yinxiu, *et al.* Comparatively study on litter decomposition and nutrient dynamics between plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40** (3): 19 – 25.
- [13] 赵谷风, 蔡延, 罗媛媛, 等. 青冈常绿阔叶林凋落物分解过程中营养元素动态[J]. 生态学报, 2006, **26** (10): 3292 – 3293.
ZHAO Gufeng, CAI Yan, LUO Yuanyuan, *et al.* Nutrient dynamics in litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in East China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (10): 3292 – 3293.
- [14] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较 [J]. 植物生态学报, 2001, **25** (3): 375 – 380.
WANG Jin, HUANG Jianhui. Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate

- zone of China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2001, **25** (3): 375 – 380.
- [15] MOORE T R, TROFYMOW J A, TAYLOR B, *et al.* Litter decomposition rates in Canadian forests [J]. *Global Change Biol*, 1999, **5**: 75 – 82.
- [16] HOBIE S E, REICH P B, OLEKSYN J, *et al.* Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden [J]. *Ecology*, 2006, **87**: 2288 – 2297.
- [17] TROFYMOW J A, MOORE T R, TITUS B, *et al.* Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: influence of litter quality and climate[J]. *Canadian J For Res*, 2002, **32**: 789 – 803.
- [18] BERG B, MCCLAUGHERTY C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [19] 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.
- FAN Houbao, LIU Wenfei, YANG Yuelin, *et al.* Decomposition of leaf litter of Chinese fir in response to increased nitrogen deposition [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30** (2): 8 – 13.
- [20] RUTIGLIANO F A, SANTO A V, De BERG B, *et al.* Lignin decomposition in decaying leaves of *Fagus sylvatica* L. and needles of *Abies abla* Mill [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, **28** (1): 101 – 106.
- [21] JOSEPH J H, WILSON C A, BORING L R. Foliar litter position and decomposition in a fire-maintained longleaf pine-wiregrass ecosystem[J]. *Canadian J For Res*, 2002, **32**: 928 – 941.
- [22] 黄耀, 沈雨, 周密, 等. 木质素和氮含量对植物残体分解的影响[J]. 植物生态学报, 2003, **27** (2): 183 – 188.
- HUANG Yao, SHEN Yu, ZHOU Mi, *et al.* Decomposition of plant residue as influenced by its lignin and nitrogen[J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, **27** (2): 183 – 188.
- [23] 宋新章, 江洪, 余树全, 等. 中亚热带森林群落不同演替阶段优势种凋落物分解实验[J]. 应用生态学报, 2009, **30** (3): 537 – 542.
- SONG Xinzhang, JIANG Hong, YU Shuquan, *et al.* Litter decomposition of dominant plant species in successional stages in mid-subtropical zone [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2009, **30** (3): 537 – 542.