

# 西双版纳热带季节雨林凋落叶分解与土壤动物群落： 两种网孔分解袋的分解实验比较

杨效东 邹晓明

(中国科学院西双版纳热带植物园昆明分部, 昆明 650223)

**摘要** 以西双版纳热带湿性季节沟谷雨林混合凋落叶作为分解基质, 在不同位置季节雨林样地, 采用不同网孔(2和0.15 mm)分解袋, 开展大中型土壤动物对雨林凋落叶分解影响的实验, 测定了不同网孔分解袋土壤动物多样性、凋落叶分解速率和主要养分元素释放状况。结果显示: 2 mm网孔分解袋土壤动物类群相对密度年均值为 $2.67 \sim 2.83$ 目 $\cdot g^{-1}$ 凋落物干重, 个体相对密度年均值为 $22.3 \sim 21.77$ 个 $\cdot g^{-1}$ 凋落物干重, 显著高于0.15 mm网孔分解袋的类群相对密度 $0.27 \sim 0.28$ 目 $\cdot g^{-1}$ 凋落物干重和个体相对密度 $2.88 \sim 2.77$ 个 $\cdot g^{-1}$ 凋落物干重( $p < 0.01$ ), 并且0.15 mm网孔分解袋中极少量的动物个体主要为小型类群弹尾目和蛴螬目(原生动物、湿生土壤动物线虫不计), 由此我们视2 mm网孔分解袋凋落叶分解由绝大多数土壤动物和其它土壤生物共同作用, 而0.15 mm网孔分解袋基本排除了大中型土壤动物对袋内凋落叶分解的影响。2 mm网孔分解袋凋落叶物质失重率(71%左右)分解率指数( $1.88 \sim 2.44$ )和主要养分元素释放率明显高于0.15 mm分解袋(34%~35%,  $0.48 \sim 0.58$ )。通过比较两种不同网孔分解袋凋落叶失重率和元素释放率的差异, 显示出季节雨林大中型土壤动物群落对凋落叶物质损失的贡献率为年均值46%左右, 并使凋落叶C/N和C/P明显降低, 而对不同元素释放率的影响不同, 其中对N、S和Ca元素释放率的影响较大, 而对K素释放的影响作用最小。相关分析显示, 2 mm网孔分解袋内土壤动物群落类群和个体的相对密度与凋落叶物质残留率有较好的负相关关系, 而群落香农多样性指数与凋落叶分解率指数表现出一定的正相关关系。

**关键词** 季节沟谷雨林 凋落叶分解 土壤动物 网孔 分解袋

## SOIL FAUNA AND LEAF LITTER DECOMPOSITION IN TROPICAL RAIN FOREST IN XISHUANGBANNA, SW CHINA: EFFECTS OF MESH SIZE OF LITTERBAGS

YANG Xiao-Dong and ZOU Xiao-Ming

(Kunming Division, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China)

**Abstract Background and Aims** The influence of soil fauna on litter decomposition is rarely explored in tropical rain forest. This study examined the effect of soil fauna on the decomposition of mixed substrate by litter bag technical at two tropical seasonal rain forest plots in Xishuangbanna, SW China in year of 2000. The following questions were considered in the present study: 1) What roles do soil fauna play in regulating litter mass loss and decomposition rate? 2) How do soil fauna influence litter nutrient release?

**Methods** In order to examine the role of soil macro-mesofauna in mass loss and nutrient release of litter, litter bags with both fine mesh size(0.15 mm) that excludes the soil macro-mesofauna population from litter and coarse mesh size(2 mm) that allows soil fauna access to litter were used in this experiment. Mass loss and C, N, P, S, K, Ca, and Mg concentrations of leaf litter were determined from the litter in two different mesh size litterbags at monthly intervals. The soil fauna were extracted by hand and by heating the samples.

**Key Results** Higher relative density and taxonomic diversity of total soil fauna were found in the bags with 2 mm mesh size( $22.3 \sim 21.77$  individuals and  $2.67 \sim 2.83$  orders per g of dry litter) compared to the bags with 0.15 mm mesh size( $2.88 \sim 2.77$  individuals and  $0.27 \sim 0.28$  orders per g of dry litter). Collembola and Acari were the most abundant group, and Hymenoptera(ant), Coleoptera, Hemiptera, Diptera, Diplopoda, Isopoda, Araneae, Pseudoscorpiones were common groups of soil fauna in litter bags with 2 mm mesh size.

收稿日期: 2005-05-17 接受日期: 2005-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(30000131和40173039)和云南省自然科学基金项目(2001C0063M和2001C0064M)

本研究野外工作得到中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站的大力支持, 凋落叶养分元素分析由中国科学院西双版纳植物园生物地球化学实验室完成, 在此一并致谢

E-mail: yangxd@xtbg.ac.cn

There were very few individuals of Collembola and Acari in the 0.15 mm litter bags. Our results suggested that soil macro-mesofauna contributed more to the decomposition of leaf litter in 2 mm litter bags than that in 0.15 mm litter bags. The higher mass loss rate (around 71%), decomposition rate ( $k = 1.88 - 2.44$ ), and nutrient release in litter bags with 2 mm mesh size than in litter bags with 0.15 mm mesh size (34% - 35%,  $k = 0.48 - 0.58$ ) indicated a significant influence of soil macro-mesofauna on mass loss and nutrient release in tropical seasonal rain forest. The release rates of N, S and Ca that could be attributable to the soil macro-mesofauna were higher than other elements whereas K release rate that could be attributable to the soil macro-mesofauna was the lowest. Soil macro-mesofauna caused greater decreases in C/N and C/P ratios in litter bags with 2 mm mesh size than litter bags with 0.15 mm mesh size. There were negative relationships of the percentage of litter mass remaining with order richness and individuals abundance of soil fauna. However, a positive relationship between Shannon-Wiener index of soil fauna and the decomposition rate was found.

**Conclusions** This study suggests that the presence of soil fauna accelerated plant litter decomposition in the tropical seasonal rain forest. The litter mass loss attributable to the soil macro-mesofauna was about 46%. The effects of soil macro-mesofauna on the nutrient release rates were different among elements. The diversity of soil fauna may have important ecosystem consequences, particularly in tropical rain forest.

**Key words** Leaf litter decomposition, Litter bag, Mesh size, Nutrient, Soil macro-mesofauna

凋落物分解和元素矿化是陆地生态系统初级生产力的重要物质来源 (Coleman & Crossley, 1996; Martin & Scott, 1997; Schlesinger, 1997; 黄建辉等, 1998), 虽然最终的分解 (元素矿化) 是土壤微生物作用的主要结果 (Swift *et al.*, 1979), 但土壤动物通过破碎、搅动、摄食、刺激 (微生物活性) 和接种 (微生物) 等活动, 在凋落物分解过程中也起着极为重要的功能作用 (Seastedt, 1984; Anderson, 1988; Benckiser, 1997), 其大小因气候和森林类型而异, 与土壤动物群落的组成 (分类类群和功能类群) 和数量分布相关。Irmle (2000) 采用不同网孔 (5 和 0.02 mm) 分解袋的研究发现亚热带混交林土壤动物对凋落叶分解的影响率在 10% 左右, 而在纯山毛榉 (*Fagus*) 林没有显著影响。Heneghan 等 (1999) 和 González 等 (2001) 通过比较不同森林土壤动物对凋落物分解的作用, 认为热带雨林土壤动物对凋落物分解的贡献显著高于亚高山森林, 国内的相关研究也呈现出森林类型的差异 (廖崇惠等, 1992, 1995; 钟伟彦等, 1999; 杨明宪等, 2000; 张雪平等, 2001)。西双版纳地处热带北缘, 年均温及降水量均低于赤道典型热带雨林地区和低地雨林, 受复杂地形和季风气候条件影响, 该地区具有类型多样的热带森林和丰富的物种多样性 (Zhu, 1994), 其中热带湿性季节沟谷雨林是当地热带森林的代表类型, 也是自然保护区构成的主体。Zheng 等 (2006) 及任泳红等 (1999) 曾对热带湿性季节沟谷雨林凋落量和凋落物分解进行了研究, 而雨林凋落物分解与土壤动物群落相互关系的研究尚未见报道。我们采用不同网孔分解袋排除土壤动物的方法, 研究了西双版纳热带湿性季节沟

谷雨林土壤动物群落对森林凋落叶分解率及元素释放的影响。

## 1 材料和方法

### 1.1 样地自然生境概况

研究地区位于西双版纳傣族自治州勐腊县勐仑自然保护区, 地理位置为  $21^{\circ}41' N$ ,  $101^{\circ}25' E$ , 属西南热带季风气候, 海拔 600 ~ 800 m 左右, 年均温度  $21.4 \sim 22.6^{\circ} C$ , 年降雨量 1 556 mm, 且多集中于雨季, 形成明显的干雨季之分, 雨季降雨量约占全年的 87%, 干季仅占 13%, 如考虑温度的变化, 全年可分为干热季 (3 ~ 4 月)、雨季 (5 ~ 10 月) 和雾凉季 (11 月 ~ 翌年 2 月)。地带性植被为热带季节雨林和季雨林。研究林地选取当地热带湿性季节沟谷雨林的表类型: 番龙眼 (*Pometia tomentosa*)、千果榄仁 (*Terminalia myricocarpa*) 群落林, 其高度在 40 m 左右, 盖度约为 95%。群落结构复杂, 物种丰富。上层乔木主要树种为番龙眼、千果榄仁、毗黎勒 (*Terminalia bellirica*)、毛麻楝 (*Chukrasia tabularis* var. *velutina*)、云南玉蕊 (*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树 (*Cironniera aubaequalis*)、云树 (*Garcinia cowa*)、假广子 (*Knema erratica*)、细罗伞 (*Ardisia tenera*)、蚁花 (*Mezzettiopsis creaghii*) 等; 灌木层除上层乔木的幼树外, 常见种有染木 (*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟 (*Morinda angustifolia*)、玉叶金花 (*Mussaenda* sp.) 等; 草本层种类较少, 主要为海芋 (*Alocasia macrorrhiza*)、盈江南星 (*Arisaema inkiangense*) 等。藤本及附生植物丰富, 板根及茎花现象显著。该群落林主要分布于湿润沟谷, 呈片断化分布, 生境异质性高, 为研究

结果更具代表性,在勐仑自然保护区附近选取了不同地理位置及海拔高度的两块雨林片段作为研究样地,样地的自然生境和土壤特征(砖红壤)见表 1。

1.2 实验设计和数据分析

分解实验于 2000 年 4 月至 2001 年 5 月进行。根据 Swift 等( 1979 )对土壤动物体长大小的分类标准,选用 2 mm( 允许中小型和大部分大型土壤动物进入 )和 0.15 mm( 排除大中型和部分小型土壤动物 )孔径尼龙网袋作为分解袋开展实验,同时为更好地反映自然条件下该雨林凋落叶分解与养分元素释放状况,采用雨林混合凋落叶作为分解基质。在落叶高峰期 3 月( 任泳红等,1999 )分别收集各林地新鲜凋落叶混合样( 主要成分为番龙眼、干果榄仁叶片,其中番龙眼凋落叶占分解凋落叶的 80% 左右 ),样品带回室内风干后称取 30 g 分别装入两种网孔分解袋( 20 cm × 15 cm )中,另随机取相同重量( 30 g )风干叶 10 袋在 105 ℃ 下快速烘烤至恒重,由其推算出放置网袋内样品的初始干重。2000 年 4 月起,按样线法在每块固定样地( 50 m × 60 m )设置 5 条样带( 即 5 个重复,每样带间隔 10 m ),每条样带 12 个样点( 12 个取样月,样点间隔 5 m ),在每个样点放置两种网孔分解袋各一个于落叶层下,使其与土壤表面接触,全年 1 次布置,以后每月分别从 5 条样带的一个样点上取回两种规格分解袋各 5 袋,全年共计 12

个取样月。分解袋取回后先将袋外泥土用毛刷轻轻去除,然后将袋内分解材料全部取出放置解剖盘中,手拣其中大型土壤动物,之后材料放置于 Tullgren 式干漏斗分离提取中小型土壤动物。将已提取了土壤动物的凋落叶在纯水中清洗,清除凋落叶上的泥土,并置于 60 ~ 70 ℃ 下烘干至恒重,在获取干重数据后进行理化分析。

凋落叶年分解率指数采用 Olson 's 公式计算( Olson , 1963 ):  $x_t = x_0 \cdot e^{-kt}$ , 其中  $x_t$  为  $t$  时间的物质残留量,  $x_0$  为物质初始量,  $k$  为凋落叶年分解率,而凋落叶达到 95% 分解积累所需的时间由公式:  $3/k(a)$  计算得出。理化分析:将分解实验过程中每间隔 1 个月获取的凋落叶烘干样品( 共 6 次 )经  $H_2SO_4$  和  $H_2O_2$  消煮后,用凯式定氮法测定 N 元素含量,经  $HNO_3 + HClO_4$  消煮后,用等离子体原子发射光谱仪( ICP-AES )测定 P、S、K、Ca、Mg 元素,凋落叶 C 元素含量采用  $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$  氧化法测定( 国家林业局,1999 ),分解过程中凋落叶元素残留率采用以下公式计算:  $t$  时元素残留率 =  $t$  时凋落叶物质残留量 ×  $t$  时元素浓度含量 / 初始凋落叶残留量 × 初始元素浓度含量。

土壤动物标本依据尹文英( 1992 , 1998 )的文献分至大类群单位( 目 ),每克凋落物干重中土壤动物类群和个体的数量( 相对密度 )由每个网袋分解材料

表 1 2 块热带季节沟谷雨林样地的主要生境条件和土壤特征  
Table 1 Habitat and soil characteristics of two tropical seasonal rain forest plots in Xishuangbanna

样地 Plots	位置 Sites	海拔 Altitude ( m )	盖度 Cover ( % )	样地环境 Environment of plot	有机质 Organic matter ( % )	全氮 Total N ( % )	pH	C/N
SRF1	位于勐昆公路 55 km,属勐仑自然保护区,是 CERN 在西双版纳热带雨林定位研究样地 The SRF1 is located in a distance of 15 km to Tropical Botanical Garden, where belong to Xishuangbanna Nature Reserves. It is also field site for CERN study	750	90 ~ 95	林地面积较大,周围主要是常绿阔叶林,样地包括坡度较大的坡地和平缓的冲积地,人为干扰较小 Forest area is large. Evergreen broad-leaved forest is surrounding vegetation. Landform of plot include riparian and upland. Human disturbance in the plot is light	2.713	0.140	5.53	11.33
SRF2	位于曼掌寨附近,属于勐仑自然保护区 The SRF2 is located in a distance of 12 km to Tropical Botanical Garden, where belongs to Xishuangbanna Nature Reserves	650	90 ~ 95	林地面积较大,周围三面为雨林,一面是农田,样地由坡地构成,周围的雨林下有当地居民种植的砂仁,样地中人为干扰小 Forest area is large, Surrounding vegetation is evergreen broad-leaved forest ( three sides ) and farmland( one side ). Landform of plot is only upland. Although Amomum plants were planted in plot surrounding forest by located people, there is not many human disturbance in the plot	2.295	0.115	4.43	11.58

获取的土壤动物类群数和个体数/相同网袋分解材料干重得出。土壤动物群落多样性指数由 Shannon-Wiener 多样性指数表达： $H' = - \sum P_i \ln P_i$ ，式中  $H'$  为群落目水平上的多样性指数， $P_i = N_i / N$ ； $N_i$  为第  $i$  类群的个体数， $N$  为群落总的个体数 (Magurran, 1988)。土壤动物对凋落叶物质损失和主要养分元素释放率的贡献率计算为： $L_{fauna} / L_{total}$ ，其中  $L_{fauna}$  是由土壤动物作用 (直接和间接) 的凋落叶物质损失和养分元素释放率，由 2 和 0.15 mm 分解袋凋落叶物质和元素损失率之差所获得； $L_{total}$  是 2 mm 分解袋凋落叶物质和元素损失率，认为是由非生物、微生物和大多数土壤动物共同作用 (Seastedt, 1984; Iimmler, 2000)。

统计分析采用 SPSS11.5 软件，对不同样地和网孔分解袋凋落叶残留率和分解率 ( $k$ )、土壤动物类群和个体数的相对密度做单因素方差分析，并对两样地 2 mm 网孔分解袋凋落叶分解率年均数与其中的土壤动物群落多样性指数、类群和个体相对密度的年均数 (每块样地 5 个重复、2 块样地共 10 个重复的 12 个月平均数) 进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 凋落叶物质损失量变化

对 360 d 分解过程中凋落叶物质残留率进行计算表明 (图 1)。

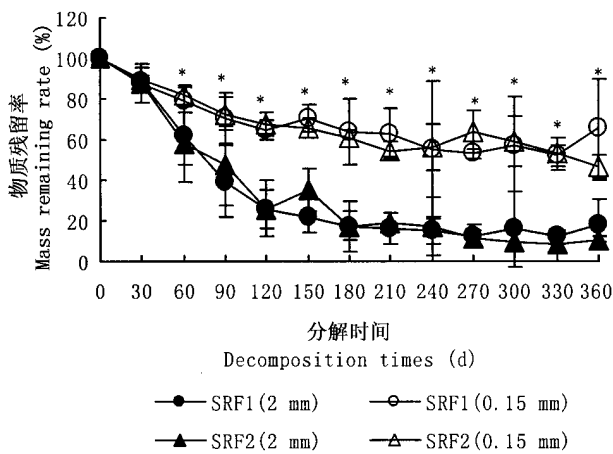


图 1 热带季节雨林凋落叶在两种不同网孔分解袋中物质残留率比较

Fig. 1 Dry weight remaining as a percentage of initial mass in decomposing leaf litter in the litterbags with two different mesh size in two tropical rain forest plots  
“\*”表示分解过程中，不同网孔分解袋间的差异性显著 Asterisks indicate a significance within mesh size during decomposition day ( $p < 0.05, n = 5$ )

不同位置两块样地，相同网孔分解袋凋落叶残留率变化相似，没有明显差异 ( $p > 0.05$ )。如将整个分解过程分为初期 (0 ~ 120 d)、中期 (120 ~ 240 d) 和后期 (240 ~ 360 d) 3 个时间段，分解初期 2 mm 网孔分解袋凋落叶损失较快，平均月损失率在 20.67%，120 d 后落叶残留率为 30% 左右，损失率达 70% 以上，分解中期，凋落叶损失率减缓，平均月损失率为 3%，分解后期凋落叶已大部分被分解，至 360 d 残留率仅为 15% ~ 20% 左右，损失率在 80% 以上。两样地的 0.15 mm 网孔分解袋凋落叶失重较为缓慢，在分解 30 d 后与 2 mm 网孔分解袋产生显著差异 ( $p < 0.05$ )，分解初期的月均损失率为 7.3%，中期的平均月损失率为 3% ~ 4%，后期至实验结束，残留率仍保持在 50% 左右，损失率约 50%。2 mm 网孔分解袋凋落叶年均分解率指数及年均失重率显著高于 0.15 mm 分解袋 ( $p < 0.01$ )，达到 95% 分解积累所需的时间为  $3/k(a) = 1.2 \sim 1.5$  年，而 0.15 mm 分解袋凋落叶达到 95% 分解积累所需的时间为  $3/k(a) = 5 \sim 6$  年。不同样地间，2 mm 网孔分解袋凋落叶分解率指数以  $SRF2 > SRF1$  ( $p < 0.05$ )，0.15 mm 网孔分解袋凋落叶分解率无样地间的差异 ( $p > 0.05$ ) (表 2)。

2.2 凋落叶养分元素变化

分解过程中，不同网孔分解袋凋落叶 C、N、P、S、K、Mg 元素含量变化趋势总体相似，但存在变化幅度上的差异，且主要表现在分解后期 (表 3)。

两种分解袋凋落叶 C 素含量在分解前期 (0 ~ 60 d) 与初值差异不大，分解至 180 d 2 mm 网孔分解袋凋落叶 C 元素含量大幅度减少，较初值减低 21% ~ 24%，300 d 后则较初值下降了 27% ~ 38%，0.15 mm 网孔分解袋凋落叶 C 元素含量的变动较为平缓，分解至 360 d 仅较初值减少 12% ~ 17%。两种网孔分解袋凋落叶 N 元素含量变化的差异不明显，均表现为增加趋势，在 180 d 达到较高水平 (1.6% ~ 1.7%)，以后略有降低，至 360 d 其含量仍在 1.7% ~ 1.8%，较初值增加了 42% ~ 100%。P 元素在分解过程中呈现出先增后减的趋势，在 180 d 有一明显峰值，不同网孔分解袋间的差异在 SRF1 样地较为明显。S 元素的变化较小，不同网孔分解袋间的差异表现在分解中期。所有分解袋凋落叶 K 元素含量在 60 d 后就明显降低，由初值的 0.3% ~ 0.5% 降至 0.1% ~ 0.2%，分解至 120 d 后，2 mm 网孔分解袋凋落叶 K 素含量高于 0.15 mm 分解袋。凋落叶 Ca 元素含量在两种分解袋中均为增加，但不同网孔和

表 2 两种不同网孔分解袋凋落叶分解特征值比较

Table 2 Comparison of decomposition characteristics of leaf litter in the litterbags with two different mesh size in two tropical rain forest plots					
样地 Plots	网孔 Mesh size ( mm )	分解率指数 $k$ ( Mean $\pm$ SD )	$R^2$	年失重率 Mass loss ( % a <sup>-1</sup> )	3/ $k$ ( a )
SRF1	2	1.884 $\pm$ 0.213 <sup>A</sup>	0.723	71.226 <sup>A</sup>	1.592
	0.15	0.478 $\pm$ 0.346 <sup>B</sup>	0.667	34.797 <sup>B</sup>	6.276
SRF2	2	2.437 $\pm$ 0.364 <sup>C</sup>	0.911	71.020 <sup>A</sup>	1.231
	0.15	0.582 $\pm$ 0.179 <sup>B</sup>	0.834	35.698 <sup>B</sup>	5.155

不同字母表示差异在  $p = 0.05$  水平上显著 (  $n = 5$  ) Different letters indicate significance at  $p = 0.05$  (  $n = 5$  ) 3/ $k$ : 分解速率达到 95% 分解所积累所需的时间 The decomposition rate, namely, the time needed for 95% of litter to decompose

表 3 两种不同网孔分解袋凋落叶主要元素含量变化( 5 个重复的平均值 )

Table 3 Change in nutrient concentrations in decomposing leaf litter in the litterbags with two different mesh size in two tropical rain forest plots( mean of replication , $n = 5$ )											
时间 Day ( d )	样地 Plot	网孔( mm ) Mesh size	C ( % )	N ( % )	P ( mg · g <sup>-1</sup> )	S ( mg · g <sup>-1</sup> )	K ( mg · g <sup>-1</sup> )	Ca ( mg · g <sup>-1</sup> )	Mg ( mg · g <sup>-1</sup> )	C/N	C/P
0	SRF1	2	52.887	1.287	0.777	1.777	4.660	15.907	2.697	41.112	681.442
		0.15	52.887	1.287	0.777	1.777	4.660	15.907	2.697	41.112	681.442
	SRF2	2	50.095	0.990	0.710	1.410	3.230	23.320	3.330	50.872	706.715
		0.15	50.095	0.990	0.710	1.410	3.230	23.320	3.330	50.872	706.715
60	SRF1	2	51.464	1.338	0.684	1.668	1.124	21.620	2.200	38.518	764.278
		0.15	52.074	1.398	0.586	1.656	1.310	22.072	2.520	37.364	890.132
	SRF2	2	49.316	1.484	0.782	1.482	1.016	25.380	2.880	33.600	636.054
		0.15	51.678	1.452	0.700	1.554	1.632	23.706	2.786	35.593	738.546
120	SRF1	2	42.874	1.498	0.858	1.602	1.234	19.376	1.820	28.769	505.641
		0.15	50.404	1.544	0.648	1.794	0.684	22.322	2.242	32.723	794.131
	SRF2	2	42.030	1.426	0.836	1.366	0.990	24.358	2.372	29.832	505.181
		0.15	49.758	1.556	0.792	1.648	0.874	24.684	2.560	31.765	635.371
180	SRF1	2	41.280	1.622	1.022	1.688	1.760	21.330	1.978	25.482	405.523
		0.15	46.342	1.636	0.722	1.852	1.588	22.074	2.640	28.463	648.485
	SRF2	2	38.438	1.718	1.080	1.530	1.184	22.052	2.658	22.688	356.291
		0.15	46.708	1.822	1.052	1.944	0.856	29.404	3.546	26.247	449.102
240	SRF1	2	35.306	1.526	0.836	1.562	1.830	18.520	1.830	23.184	430.773
		0.15	48.160	1.690	0.700	1.905	1.248	24.275	2.795	28.986	712.654
	SRF2	2	38.488	1.644	0.876	1.300	1.032	21.034	2.346	23.511	458.517
		0.15	47.582	1.778	0.926	1.884	0.984	28.514	3.150	28.020	519.262
300	SRF1	2	32.554	1.412	0.768	1.462	2.186	16.444	1.916	22.813	432.406
		0.15	46.444	1.592	0.722	1.844	1.458	23.744	2.414	29.237	648.585
	SRF2	2	36.122	1.788	0.807	1.518	1.478	22.116	2.394	20.460	964.581
		0.15	45.884	1.754	0.922	1.800	1.010	26.852	2.850	26.166	499.937
360	SRF1	2	38.238	1.770	0.914	1.682	2.086	19.216	1.908	21.744	425.401
		0.15	43.292	1.654	0.724	1.868	2.032	22.700	2.614	26.157	599.982
	SRF2	2	37.678	1.846	0.972	1.630	1.324	22.384	2.222	19.867	389.353
		0.15	44.890	1.882	0.962	1.974	1.110	25.830	3.050	24.624	489.471

不同样地间 ,其变化幅度具有较大的差异。Mg 元素含量在分解过程中表现为先减后增 ,其中 2 mm 网孔分解袋的减少幅度为 30% ,0.15 mm 分解袋的减幅为 15% ~ 24% ,分解 180 d 后 ,0.15 mm 网孔分解袋 Mg 元素含量显著高于 2 mm 分解袋。在整个分解过程中 ,凋落叶 C/N 和 C/P 表现为下降 ,并且 2 mm 分解袋明显低于 0.15 mm。根据分解过程中凋

落叶干重及元素含量数据 ,计算出各元素的残留率变化( 图 2 )。

所测凋落叶元素残留率均呈现出持续下降的趋势 ,且 2 mm 网孔分解袋的下降幅度明显高于 0.15 mm。在分解初期 ,2 mm 网孔分解袋凋落叶 C、N、P、S、Ca、Mg 元素残留率由初值的 100% 下降至 20% 左右 ,以后逐步递减 ,经 360d 分解后 ,C、K 元素释放

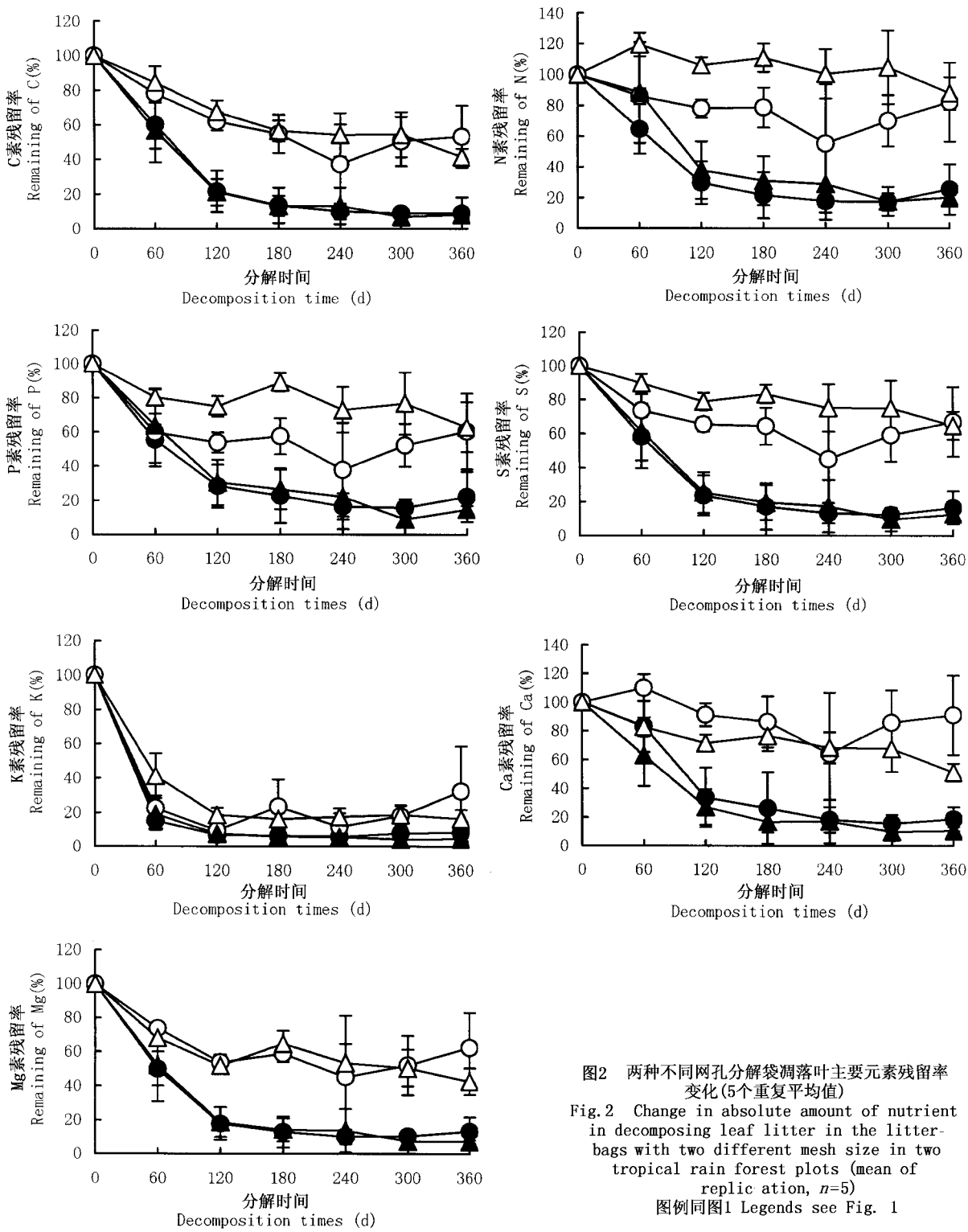


图2 两种不同网孔分解袋凋落叶主要元素残留率变化(5个重复平均值)

Fig.2 Change in absolute amount of nutrient in decomposing leaf litter in the litter-bags with two different mesh size in two tropical rain forest plots (mean of replication,  $n=5$ )

图例同图1 Legends see Fig. 1

率达 90% 以上, N、P、S、Ca、Mg 元素释放率为 80% ~ 90% 并且不同位置两样地没有明显差异 ( $p > 0.05$ ) 元素释放的顺序为 K、C、Mg、Ca、S、P、N。对于 0.15 mm 网孔分解袋, 凋落叶元素残留率的减少较为缓慢, 经过 120 d 的分解, 不同元素残留率变化

不同。C、K、Mg 的残留率下降较快, 由初值的 100% 降至 40% ~ 60%, 而 N、P、S、Ca 残留率保持在 70% 以上, 释放率较低。经 360 d 分解后, 除 K 元素释放率 (70% ~ 80%) 与 2mm 分解袋接近外, 其它元素释放率较低。0.15 mm 分解袋凋落叶元素释放的顺序

在 SRF1 样地为 K、C、P、Mg、S、N、Ca 在 SRF2 样地表现为 K、C、Mg、Ca、P、S、N。

2.3 大中型土壤动物对凋落叶分解的贡献

分解过程中,由两块样地 2 mm 网孔分解袋获取的土壤动物类群相对密度年均值为 2.67 ~ 2.83 目·g<sup>-1</sup>凋落物干重,个体相对密度年均值为 22.3 ~ 21.77 个·g<sup>-1</sup>凋落物干重,显著高于 0.15 mm 网孔分解袋的类群相对密度 0.27 ~ 0.28 目·g<sup>-1</sup>凋落物干重和个体相对密度 2.88 ~ 2.77 个·g<sup>-1</sup>凋落物干重 ( $p < 0.01$ ) (图 2)。

并且 2 mm 网孔分解袋土壤动物群落组成以弹尾目 (Collembola) 和蜱螨目 (Acari) 占绝对数量优势,两个类群的数量相对多度在 30% 以上,为优势类群;膜翅目 蚂蚁 (Hymenoptera (ant))、鞘翅目 (Coleoptera)、半翅目 (Hemiptera)、双翅目 (Diptera)、倍足纲 (Diplopoda) 等足目 (Isopoda)、蜘蛛目 (Araneae)、拟蝎目 (Pseudoscorpiones) 的数量相对多度在 1% ~ 10%,构成群落常见类群;其它类群的数量相对多度少于 1%,为稀有类群。各样地因生境异质性和人为干扰程度不同,生物类群的绝对数量分布 (多度) 和在群落中的数量比例 (相对多度) 呈现一定差异,其中常见、稀有类群相对数量在样地间的差异明显大于优势类群 (杨效东, 2004)。由于 0.15 mm 网孔分解袋土壤动物已降至相对很低水平,仅

获取的极少量个体主要以小型类群弹尾目和蜱螨目为主 (原生动物、湿生土壤动物线虫不计),我们视其基本排除了大中型土壤动物对袋内凋落叶分解的影响,而 2 mm 网孔分解袋凋落叶分解由绝大多数土壤动物和其它土壤生物共同作用,根据计算得出大中型土壤动物对凋落叶物质损失和主要养分元素释放的贡献率 (表 4)。

两样地大中型土壤动物对落叶物质损失率和 C、K 元素释放率的影响相近,而对 N、P、S 元素释放率的影响显示出明显的样地差异,N、P、S 元素表现为 SRF2 > SRF1 ( $p < 0.05$ ),Ca、Mg 元素虽表现为 SRF1 > SRF2,但统计差异不显著。对于不同元素的释放率,大中型土壤动物影响程度不同,其中对 N 和 Ca 元素释放的影响较大,而对 K 元素释放的影响作用最小。

2.4 土壤动物群落特征与凋落叶分解的相关关系

两样地 2 mm 网孔分解袋土壤动物群落多样性年均值与凋落叶物质损失率和分解率指数的相关分析表明:土壤动物群落类群和个体相对密度与凋落叶残留率有明显的负相关关系,而香农多样性指数与凋落物残留率没有很好的相关性,但与凋落物分解率  $k$  值表现出一定的正相关关系 (图 3)。说明土壤动物群落类群丰富度、个体数多度以及香农多样性指数等指标均在一定程度上与凋落叶分解相关。

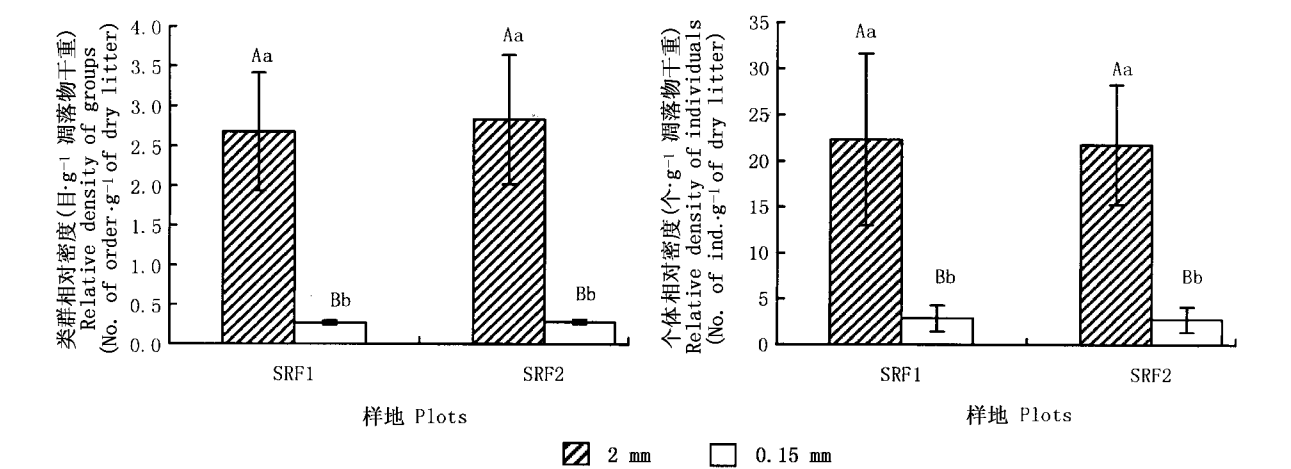


图3 两种不同网孔分解袋中土壤动物类群数和个体数相对密度比较 (年均值 ± 标准差)  
Fig.3 Comparison of relative density of orders and individuals of soil fauna in the litterbags with two different mesh size in two tropical rain forest plots (mean ± SD)  
不同大写字母表示同一林地、不同网孔的差异显著;不同小写字母表示相同网孔、不同林地间差异显著 ( $p = 0.05$ ,  $n = 5$ ) Different capital letters for a same forest type indicate significant difference among the different mesh size, and different small letters within the same mesh size indicate significant difference between the forest type at  $p = 0.05$ ,  $n = 5$

表 4 两样地大中型土壤动物对凋落叶物质损失率及养分元素释放率的贡献率年均值比较  
Table 4 The average of the mass loss and element loss contributed by the soil maro-mesofauna in two tropical rain forest plots

		贡献率 Contribution ( % )		df	F	p
		SRF1	SRF2			
		年均值 ± 标准差 Mean ± SD	年均值 ± 标准差 Mean ± SD			
凋落叶	Leaf litter	46.088 ± 6.715 <sup>A</sup>	45.604 ± 5.435 <sup>A</sup>	5	0.016	0.299 > 0.05
	C	44.242 ± 6.592 <sup>A</sup>	49.460 ± 8.176 <sup>B</sup>	5	1.234	0.003 < 0.05
	N	65.091 ± 10.363 <sup>A</sup>	111.673 ± 23.116 <sup>B</sup>	5	16.906	0.000 09 < 0.05
	P	34.133 ± 7.237 <sup>A</sup>	64.639 ± 6.078 <sup>B</sup>	5	52.095	0.002 < 0.05
	S	50.653 ± 8.012 <sup>A</sup>	70.061 ± 5.721 <sup>A</sup>	5	19.433	0.377 > 0.05
	K	12.633 ± 5.237 <sup>A</sup>	15.407 ± 4.082 <sup>A</sup>	5	0.873	0.064 > 0.05
	Ca	117.914 ± 67.275 <sup>A</sup>	52.111 ± 12.647 <sup>A</sup>	5	4.620	0.273 > 0.05
	Mg	49.387 ± 9.456 <sup>A</sup>	10.692 ± 72.879 <sup>A</sup>	5	1.386	0.903 > 0.05

不同字母表示差异在  $p = 0.05$  水平上显著 ( $n = 5$ ) Different letters indicate significance at  $p = 0.05$  ( $n = 5$ )

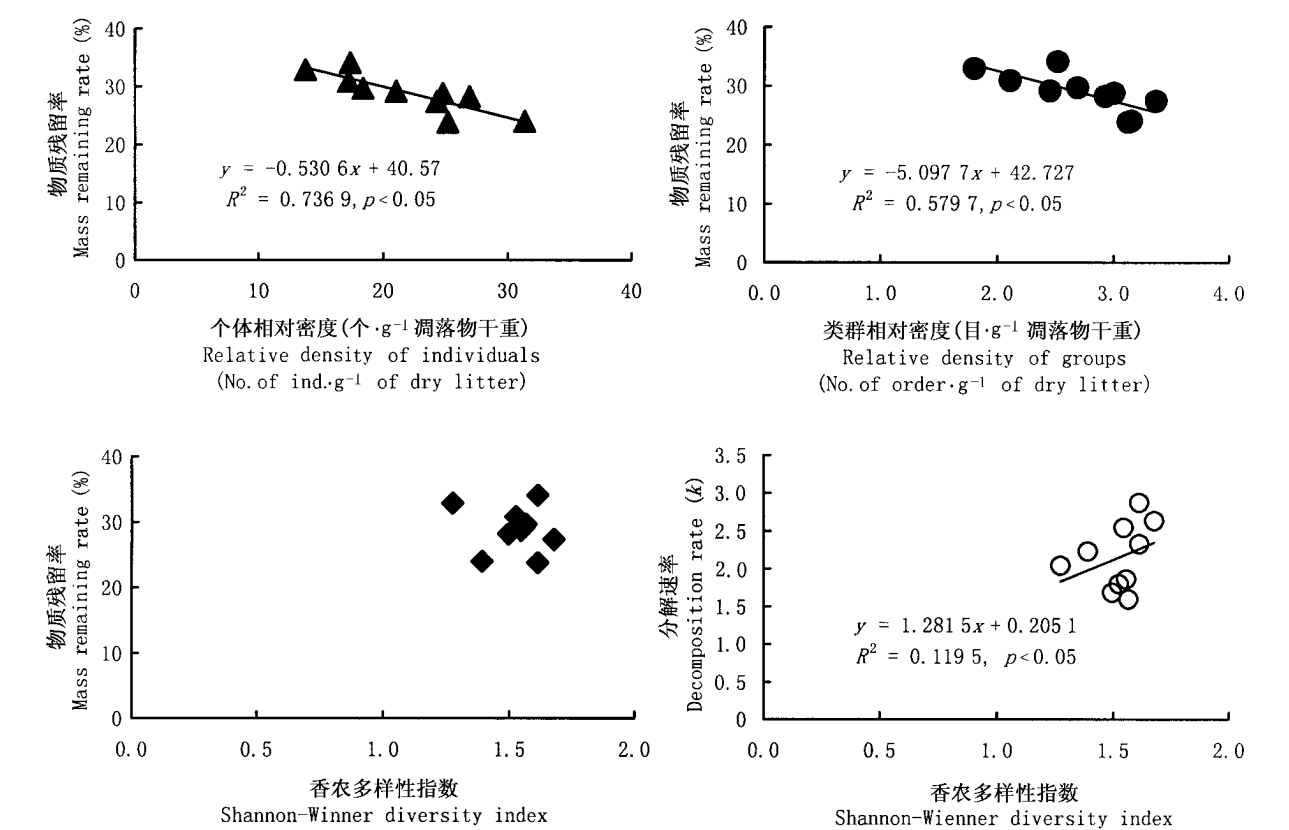


图 4 土壤动物群落多样性与凋落叶分解残留率、分解率指数的相关关系 ( $n = 10$ )  
Fig.4 Correlation of soil fauna diversity versus mass remaining and decomposition rate of leaf litter in tropical rain forest

3 讨 论

季节沟谷雨林是西双版纳热带雨林代表类型之一,森林组成含有一定落叶树种(Zhu,1994),受季风气候的影响,森林凋落量( $11 \sim 12 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )和赤道典型热带雨林相近( $9.2 \pm 2.7$ )  $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,由于该雨林分布在海拔低于  $600 \sim 900 \text{ m}$  的潮湿沟谷中,生境水热系数较高,凋落物分解速率( $k$  为  $1.8$

左右)均高于海南岛半落叶季雨林( $k$  约  $1.6$ )、马来西亚劳越沙低地雨林( $k$  为  $0.7 \sim 0.96$ )和波多黎各湿性雨林( $k$  为  $1.42$ ) (Zheng *et al.*, 2006; Zou *et al.*, 1995)。季节雨林中土壤动物群落组成丰富,中小型类群具有较高的数量多度(杨效东, 2004),它们与土壤微生物、其它非生物因素(降雨、凋落物湿度和温度等)一起对凋落物物质损失和养分释放表现出明显的交互作用(Reddy & Venkataiah, 1989; Reddy,



1992)。研究数据显示,在土壤动物参与下,雨林凋落叶完成 95% 分解积累所需的时间为 1.2~1.5 年,年分解率指数  $k$  为 1.8~2.0,排除大、中型土壤动物后,凋落叶年分解率指数  $k$  仅为 0.4~0.5,完成 95% 分解积累所需的时间需要 5~6 年,它们的差异性达到极显著水平( $p < 0.01$ )。通过推算,大、中型土壤动物对凋落叶物质损失率的影响为年均值 46% 左右,与波多黎各热带雨林相似(Heneghan *et al.*, 1999; González & Seastedt, 2001),且具有分解时间上的变化。植物凋落物的分解受生境的物理和化学条件、植物残体的数量和质量以及生物分解者的活性数量等主要因素控制(Swift *et al.*, 1979)。在波多黎各的研究发现,湿性雨林中土壤动物群落对凋落物分解的作用明显高于干性雨林,且对不同质量凋落物分解的影响没有差异,排除地表土壤节肢动物将减少凋落物 20%~60% 的分解率(Heneghan *et al.*, 1999; González & Seastedt, 2001),单独排除蚯蚓的结果是减少了 20% 的分解率(Liu & Zou, 2002)。西双版纳热带季节沟谷雨林的植被结构、凋落量和生境条件(Walker *et al.*, 1996)以及土壤动物群落结构(杨效东, 2004)与其相比均有所不同,实验用凋落物质量也具有差异,但土壤动物对凋落叶物质损失率所表现出的贡献相近。反映出不同植被类型热带湿性雨林因均具有较高的土壤动物群落多样性和复杂的功能类群(Function group),它们通过不同方式对生境中的凋落物分解产生相近程度的作用,凋落物质量和微生境条件在分解过程的调控作用相对降低。在亚热带和亚高山森林,土壤动物对凋落物分解的影响程度更多取决于少数重要类群数量与凋落物质量的相关性(González & Seastedt, 2001; González *et al.*, 2001)。

在凋落物分解过程中,土壤动物通过直接捕食微生物或者改变土壤环境间接影响微生物群落而对植物凋落物养分元素释放产生作用(Hanlon & Anderson, 1979; Seastedt & Crossley, 1980; Luxton, 1982; González *et al.*, 2001),并具有位置和树种效应。Hunter 等(2003)发现亚热带森林大型土壤动物对凋落物化学元素释放的相对作用,在森林的不同位置(冲积区和高地)以及不同树种和不同元素上具有一定差异。不同森林由于土壤动物群落结构差异,也将对凋落物养分元素的释放量产生不同影响,Immler (2000)的研究表明,在山毛榉林,土壤动物生物量与 N 素的释放有较好的正相关关系,并且某些类群生物量的变化对凋落物养分元素的释放有重要影响,

但混交林无此关系。在低地热带湿性雨林,土壤动物对凋落物 N 素矿化的影响显著高于热带干性森林(González & Seastedt, 2001)。

我们的研究结果显示:季节雨林凋落叶损失量因大、中型土壤动物参与而显著减少,从而导致凋落叶中各养分元素释放量增加。虽然大、中型土壤动物对凋落叶 N 素浓度的影响不显著,但它们显著降低了凋落叶中 C 素的含量,使凋落物 C/N 和 C/P 降低,这有利于土壤微生物进一步转化有机质为无机元素的矿化作用(Swift *et al.*, 1979; Enriquez *et al.*, 1993; Tian *et al.*, 1993; Matthew & Zou, 2002)。

自然条件下,森林凋落物分解过程中不断有新鲜凋落物加入,并且对不同大小土壤动物的参与没有限制,因此土壤动物的变化及其对凋落物分解的影响比分解袋实验条件下所获结果更为复杂。采用分解袋法可固定凋落物初量,测定不同分解时间凋落物生物量的损失状况,同时分析分解袋残留物中养分元素含量和土壤动物群落,因此用不同网孔分解袋排除土壤动物来研究其对分解影响的方法被一些学者所采用(Swift *et al.*, 1979; Seastedt & Crossley, 1980; Tian *et al.*, 1993, 1995; Immler, 2000; Hunter *et al.*, 2003),只是分解袋网孔大小的选取有所不同。Tian 等采用 3 种不同网孔分解袋进行有关实验,发现 0.5 和 2 mm 网孔分解袋凋落物分解速率具有较大差异,但 2 和 7 mm 的差异不显著(Tian *et al.*, 1995),说明 2 mm 网孔分解袋可允许大多数森林土壤动物进入并参与对凋落物的分解,而 0.15 mm 分解袋能显著降低大、中型土壤动物类群数和个体数(图 2),选用这两种网孔分解袋能在一定程度上了解大、中型土壤动物对凋落物分解的影响。需要说明的是,分解实验过程中,由于凋落物碎屑因分解袋网孔大小不同存在渗漏量上的差异,两种不同网孔分解袋凋落叶物质损失之差,应被认为是土壤动物作用和渗漏之和,而由此得出的大、中型土壤动物对凋落叶物质损失和养分释放的贡献率将被过高估计,但从宏观角度考虑,凋落物分解包括了破碎这一重要过程,并主要由土壤动物完成(Anderson, 1988),因此在物理意义上,也将本实验中不同网孔碎屑渗漏的差值视为是土壤动物对凋落物分解破碎化的影响,而在微观程度上尚需深入探讨土壤动物对凋落物分解的作用。相关分析表明 2 mm 网孔分解袋获取的土壤动物群落类群丰度、个体数多度和香农多样性指数分别与凋落叶物质残留率和分解率指数  $k$  具有相关关系,表明土壤动物群落对凋落叶

分解的影响与群落中类群的丰富度(类群数)、多度(个体数)及土壤动物群落的组成状况有关(González & Seastedt, 2001)。

### 参 考 文 献

- Anderson JM (1988). Invertebrate-mediated transport process in soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 24, 5 – 19.
- Benckiser G (1997). *Fauna in Soil Ecosystems: Recycling, Nutrient Fluxes, and Agricultural Production*. Basel and Hong Kong Press, New York.
- Coleman DC, Crossley DA Jr (1996). *Fundamentals of Soil Ecology*. Academic Press, New York.
- Enriquez S, Duarte CM, Sand-Jensen K (1993). Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C:N:P content. *Oecologia*, 94, 457 – 471.
- González G, Seastedt TR (2001). Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests. *Ecology*, 82, 955 – 964.
- González G, Ley RE, Schmidt SK, Zou X, Seastedt TR (2001). Soil ecological interactions: comparisons between tropical and subalpine forests. *Oecologia*, 128, 549 – 556.
- Hanlon RDG, Anderson JM (1979). The effects of Collembola grazing on microbial activity in decomposing leaf litter. *Oecologia*, 38, 93 – 99.
- Heneghan L, Coleman DC, Zou X, Crossley DA Jr, Haines BL (1999). Soil microarthropod contributions to decomposition dynamics: tropical-temperate comparisons of a single substrate. *Ecology*, 80, 1873 – 1882.
- Huang JH (黄建辉), Chen LZ (陈灵芝), Han XG (韩兴国) (1998). Advance in litter decomposition in forest ecosystems. In: Li CS (李承森) ed. *Advances in Plant Sciences (植物科学进展)*. Higher Education Press, Beijing, 218 – 236. (in Chinese)
- Hunter MD, Sina A, Catherine MP, Coleman DC (2003). Relative effects of macroinvertebrates and habitat on the chemistry of litter during decomposition. *Pedobiologia*, 47, 101 – 115.
- Irmiler U (2000). Changes in the fauna and its contribution to mass loss and N release during leaf litter decomposition in two deciduous forests. *Pedobiologia*, 44, 105 – 118.
- Liao CH (廖崇惠), Chen MQ (陈茂乾), Chen JH (陈锦华) (1992). Population ecology of two species of terrestrial isopods and their role in litter decomposition. *Acta Zoologica Sinica (动物学报)*, 38, 23 – 30. (in Chinese with English abstract)
- Liao CH (廖崇惠), Lin SM (林少明), Li JX (李健雄), Chen JH (陈锦华), Huang HT (黄海涛) (1995). A comparative study of soil animals on litter decomposition in varied types of artificial forests. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 15(Suppl.), 198 – 203. (in Chinese with English abstract)
- Liu ZG, Zou XM (2002). Exotic earthworms accelerate plant litter decomposition in a Puerto Rican pasture and a wet forest. *Ecological Applications* 12, 1406 – 1417.
- Luxton M (1982). General ecological influence of the soil fauna on decomposition and nutrient circulation. *Oikos*, 39, 355 – 357.
- Martin KD, Scott W (1997). Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie. *Ecology*, 78, 732 – 739.
- Magurran AE (1988). *Ecological Diversity and Its Measurement*. Princeton University Press, Princeton.
- Matthew WW, Zou X (2002). Soil macrofauna and litter nutrients in three tropical tree plantation on a disturbed site in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 170, 161 – 171.
- State Forestry Administration of China(国家林业局) (1999). *Forest Soil Analysis Methods, P. R. China—Forest Vocation Standard LY/T 1210-1275-1999* (中华人民共和国林业行业标准——森林土壤分析方法). China Standard Publisher, Beijing, (in Chinese)
- Olson JS (1963). Energy storage and the balance of producer and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44, 322 – 331.
- Reddy MV, Venkataiah B (1989). Influence of microarthropod abundance and climatic factors on weight loss and mineral nutrients of *Eucalyptus* leaf litter during decomposition. *Biology Fertilizer Soils*, 8, 319 – 324.
- Reddy MV (1992). Effect of microarthropod abundance and abiotic variables on mass loss and concentration of nutrients during decomposition of *Azadirachta indica* leaf litter. *Tropical Ecology*, 33, 89 – 96.
- Ren YH (任泳红), Cao M (曹敏), Tang JW (唐建维), Tang Y (唐勇), Zhang JH (张建侯) (1999). A comparative study on litter-fall dynamics in a seasonal rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, SW, China. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 23, 418 – 425. (in Chinese with English abstract)
- Schlesinger WH (1997). *Biogeochemistry: an Analysis of Global Change* 2nd edn. Academic Press, California.
- Seastedt TR (1984). The role of microarthropods in decomposition and mineralisation process. *Annual Review of Entomology*, 29, 25 – 46.
- Seastedt TR, Crossley DA Jr (1980). Effects of microarthropods on the seasonal dynamics of nutrients in forest litter. *Soil Biology and Biochemistry*, 12, 337 – 342.
- Swift MJ, Heal OW, Anderson JM (1979). *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, London.
- Tian G, Brussaard L, Kang BT (1993). Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical condition: effects on soil fauna. *Soil Biology and Biochemistry*, 25, 731 – 737.
- Tian G, Brussaard L, Kang BT (1995). Plant residues decomposition in the humid tropics—influence of chemical composition and soil fauna. In: Reddy MV ed. *Soil Organisms and Litter Decomposition in the Tropics*. Oxford and IBH Publishing, New Delhi, 204 – 224.
- Walker LR, Zimmerman JK, Lodge DJ, Guzman-Grajales S (1996). An altitudinal comparison of growth and species compo-

sition in hurricane-damaged forests in Puerto Rico. *Journal of Ecology*, 84, 877 – 889.

Yang MX (杨明宪), Ma SC (马树才), Zhang RZ (张容祖) (2000). Mathematical model and community series of effects of soil animals on litter decomposition. In: Yin WY (尹文英) ed. *Soil Animals of China* (中国土壤动物). Science Press, Beijing, 108 – 115. (in Chinese)

Yang XD (杨效东) (2004). Dynamics and community structure of soil meso-microarthropods during leaf litter decomposition in tropical seasonal rain forests of Xishuangbanna, Yunnan. *Biodiversity Science* (生物多样性), 12, 252 – 261. (in Chinese with English abstract)

Yin WY (尹文英) (1992). *Subtropical Soil Animals of China* (中国亚热带土壤动物). Science Press, Beijing. (in Chinese)

Yin WY (尹文英) (1998). *Pictorial Keys to Soil Animals of China* (中国土壤动物检索图鉴). Science Press, Beijing. (in Chinese)

Zhang XP (张雪萍), Li CY (李春艳), Zhang SC (张思冲) (2001). Study of the function of millipedes in substance decomposition. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 21, 75 – 79. (in Chinese with English abstract)

Zheng Z, Shanmughavel P, Sha LQ, Cao M, Warren M (2006). Litter decomposition and nutrient release in a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. *Biotropica*, 38, 342 – 347.

Zhong WY (钟伟彦), Yin XQ (殷秀琴), Chen P (陈鹏) (1999). Relationship of litter decomposition and consumption with soil animals in Maoer Mountain forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 10, 511 – 512. (in Chinese with English abstract)

Zhu H (1994). The floristic characteristics of the tropical rain forest in Xishuangbanna. *Chinese Geographical Science*, 4, 174 – 185.

Zou XM, Zucca CP, Waide RB, McDowell WH (1995). Long-term influence of decomposition on tree species composition and litter dynamics of a tropical rain forest in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 78, 147 – 157.

责任编辑：黄建辉 责任编辑 张丽赫