

栎林凋落层土壤动物群落结构及其在凋落物分解中的变化*

林英华¹, 杨德付², 张夫道^{3**}, 王建修⁴, 白秀兰¹, 王兵¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林保护学重点实验室, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300; 3. 中国农业科学院土壤肥料研究所, 北京 100081; 4. 重庆市开县林业局, 重庆 开县 405400)

摘要: 2002年4月~2002年10月, 采用凋落袋法(5、1、1/300 mm)对北京九龙山栎树(*Quercus liaotungensis*)纯林和混交林(辽东栎:油松(*Pinus tabulaeformis*) = 2:1)凋落层土壤动物群落特征及在凋落叶分解过程中动态变化进行研究。在两种林型98只分解袋中, 共采集到土壤动物3564只, 隶属3门10纲19目, 其中膜翅目(Hymenoptera)、啮虫目(Psocoptera)、双翅目(Diptera)、弹尾目(Collembola)和蜚蠊目(Acariformes)为优势类群。土壤动物以杂食性为主。混交林中小型土壤动物个体数量和类群数均大于栎树纯林, 而大型土壤动物个体数量类群数均低于栎树纯林, 两种林型土壤动物类群数和个体数在 $\alpha = 0.05$ 差异不显著。3种凋落物袋中, 栎树纯林土壤动物总类群数和个体总数均为1 mm > 5 mm > 1/300 mm; 混交林土壤动物个体数1 mm > 5 mm > 1/300 mm, 类群数则5 mm > 1 mm > 1/300 mm, 并在8或9月达最大值。土壤动物多样性指数随时间推移呈增长趋势, 土壤动物群落异质性较高。土壤动物优势类群与凋落物分解残存量之间的相关性不显著($r_s < 0.786$, $p > 0.05$)。蜚蠊目在栎树纯林凋落物中集聚的时间最长, 啮虫目集聚的时间最短, 分别为10.33和8.53个月; 膜翅目在栎树混交林凋落物中集聚的时间最长, 双翅目集聚的时间最短, 分别为9.95和8.13个月。

关键词: 土壤动物群落; 栎林; 集聚; 凋落物分解; 北京九龙山

中图分类号: S792.18 文献标识码: A

Structure of Soil Animal Community of Oakery Litter and Fluctuation during Leaf Litter Decomposition

LIN Ying-hua¹, YANG De-fu², ZHANG Fu-dao³, WANG Jian-xiu⁴, BAI Xiu-lan¹, WANG Bing¹

(1. Research Institute of Forest Ecology Environment and Protection, CAF, Key Laboratory of Forest Protection, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. Forestry Experimental Center of North China, CAF, Beijing 102300, China; 3. The Institute of Soil and Fertilizer, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China; 4. Forestry Bureau of Kaixian of Chongqing City, Chongqing 405400, China)

Abstract The soil animal community and its fluctuation during leaf litter decomposition was investigated with litter bag (5 mm, 1 mm and 1/300 mm) method (from April to Oct, 2002) in oakery (*Quercus liaotungensis*) forest and in mixed forest (oakery: pine (*Pinus tabulaeformis*) = 2:1) at Jiubingshan, Beijing. 3564 individuals were collected from 98 litterbags belonging to 3 Phyla, 10 Classes, 19 Orders. Most of the dominant taxa were Hymenoptera, Psocoptera, Diptera, Collembola and Acariformes. Most were omnivores in the forest litter. The number of individual and group of meso- and microfauna in mixed forest were more than that in the oakery, while the macrofauna were less than that in the oakery, the number

收稿日期: 2004-09-27

基金项目: 山东科技部社会公益研究专项资金资助项目(编号 2000-177)

作者简介: 林英华(1966—), 女, 黑龙江绥化人, 博士, 主要从事动物生态学和土壤生态环境研究。

* 致谢: 本研究得到了中国林业科学研究院华北林业试验站的大力支持, 在此一并致谢。

** 通讯作者。

of individual and group were not significant at $\alpha = 0.05$ to two type forests. In the three kind of litterbags, the amount of the soil animal individual and group were in the order of $5\text{ mm} > 1\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$ in pure oakery forest, while the amount of soil animal individual was $1\text{ mm} > 5\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$, and the group was $5\text{ mm} > 1\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$ in mixed forest, and the amount of group reached the peak at Aug or Sept. The diversity of the soil animal group was trending to increase. Soil animal community was more heterogeneous in different forest. The dominant taxa showed that they were not significant in correlated to the mass loss of the litter ($r_s < 0.786$, $p > 0.05$). The colonized duration of Acariformes and Psocoptera were 10.33 and 8.53 months at oakery, respectively, while that of Hymenoptera and Diptera were 9.48 and 7.91 months respectively in mixed forest.

Key words soil animal community; oakery; colonizing leaf litter decomposition; Jiulongshan, Beijing

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。土壤动物是土壤生态系统中的重要组成部分,在生态系统中的生物循环过程中,土壤动物通过消化和粉碎落叶并刺激微生物参与落叶的分解^[1],并且其群落结构随着落叶在分解过程中落叶的质量、化学成分以及微生物等的改变而变化^[2]。

凋落物分解过程中,土壤动物组成的有序变化不仅反映出落叶结构、化学和生物特性,而且一些土壤物种的出现或消失以及取食方式的改变,也会对食物网结构产生一定的影响。因此,研究凋落物层土壤动物群落结构及其与凋落物分解作用之间的相互关系,对于正确理解不同土壤动物群在凋落物分解过程中的地位和作用具有重要的意义。

1 自然概况与研究方法

1.1 自然概况

九龙山地处北京门头沟区东南部, $115^{\circ}59' \sim 116^{\circ}07' \text{ E}$, $39^{\circ}54' \sim 39^{\circ}59' \text{ N}$,属北京西部山系,海拔 $100 \sim 1\,000\text{ m}$,相对高差较大,地形陡峭。气候春干旱多风、夏炎热多雨、秋凉爽湿润、冬寒冷干燥。年均降水量 600 mm ,主要集中在 7、8、9 月份,年均气温 13°C 。土壤以山地棕壤为主。

九龙山植物区系与北京植物区系基本相同,但由于长期人为干扰已使九龙山天然林植被发生了根本变化,现存自然植被是天然次生林和以灌木为主的次生林。

1.2 实验方法

为获得更接近自然状态下森林凋落层土壤动物群落,于 2001 年 10 月中旬分别采集辽东栎 (*Quercus liaotungensis* Koidz.) 纯林、栎树混交林中优势树种 (辽东栎 + 油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) = 2:1) 的

自然凋落叶,称取 15 g (鲜质量,在计算时换算为干质量) 分别放入 3 种不同网孔 (5 mm 、 $1/300\text{ mm}$) 尼龙袋中 ($15\text{ cm} \times 20\text{ cm}$),将网袋按照间距 1 m 并排埋入落叶层下,共计 98 袋,于次年 4 月至 10 月间,每月采集一次样品,其中 5 mm 各 3 袋, $1/300\text{ mm}$ (对照) 1 袋。利用改良干漏斗 (Modified Tullgren) 和手捡法进行分离土壤动物并进行鉴定;烘干尼龙袋内残留落叶并称质量。

由于分类的限制,以所鉴定到的类群进行分类^[3];土壤动物体型大小依据在食物分解过程中作用^[4]进行分类。

1.3 数据分析

群落多样性指数采用香农-威纳多样性指数 (Shannon-Weaver index)、Pielou 指数和辛普森优势

度指数 (Simpson index), 即 $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$, $J_s = H' / \ln S$, $C = \sum \left[\frac{n_i}{N} \right]^2$, 群落相似性采用 Jaccard

(q) 指数, 即 $q = c / (a + b - c)$, 式中 a 、 b 分别为群落 A、群落 B 的类群数, c 为两类群的共有类群数。

土壤动物在落叶分解过程中的集聚时间采用演

替指数表示, $T_i = \sum_{i=1}^S n_i \cdot m_i / N$, $Sdv =$

$\sqrt{\sum_{i=1}^S n_i \cdot (m_i - T_i)^2 / N}$, 式中 T_i 为演替指数, n_i 为第 i 次采集时的个体数, m_i 为开始到第 i 次采集时的月数, Sdv 为标准差, N 为总个体数。

采用 Spearman 等级相关指数分析土壤动物优势类群与凋落物分解之间的关系。

各类群数量等级划分: 个体数量占全部捕获量 10% 以上为优势类群, 介于 1% ~ 10% 之间的为常见类群, 介于 0.1% ~ 1% 为稀有类群, 0.1% 以下的为极稀有类群。

2 结果与分析

2.1 土壤动物群落组成

在二种林型 98 只分解袋中, 共采集到土壤动物 3 564 只, 隶属 3 门 10 纲 19 目, 其中大型土壤动物 17 类; 优势类群 3 类, 即膜翅目、啮虫目、双翅目, 分别占大型土壤动物的 14.79%、17.93% 和 24.74%; 常见类群 10 类, 即等翅目、缨翅目、鳞翅目、前孔寡毛目、蜘蛛目、等足目、盲蛛目、倍足纲、柄眼目、鞘翅目, 分别占大型土壤动物的 1.05%、1.31%、1.83%、1.96%、2.62%、3.14%、5.63%、5.76%、8.38%、9.42%; 中小型土壤动物 5 类, 优势类群 2 类, 即弹尾目和蜚蠊目, 分别占中小型土壤动物的 16.574% 和 82.32%; 常见类群无; 其他均在 0.10% 以下, 为

稀有或极稀有类群。

森林凋落物层动物营养功能群范围较广, 杂食性土壤动物所占的比例最大 (39.13%); 其次为腐食性和植食性 (均占 21.74%), 菌食性所占的比例最少 (占 4.35%)。

所采集到的 15 类优势类群和常见类群中, 有 15 类分布于两种林型中, 因此, 这 15 类优势类群和常见类群为九龙山森林凋落层的主要土壤动物类群, 在森林生态系统中发挥着重要作用, 稀有和极稀有类群则是对森林环境变化中的敏感类群, 仅在某一时期及土壤条件适宜时, 其数量才会逐渐增加, 并成为某一时期的常见类群。凋落物层土壤动物以小型土壤动物为主。

表 1 九龙山森林凋落物层土壤动物群落结构

No	名称	体型大小	纯林	混交林	频度	多度	功能群	
1	环节动物门 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	后孔寡毛目 O1 Opisthoptera	大	2	0.26	S	
2			前孔寡毛目 O1 Plesioptera	大	15	1.96	**	
3	软体动物门 Mollusca	腹足纲 Gastropoda	柄眼目 Stylmatophora	大	18	46	8.38	**
4	节肢动物门 Arthropoda	蜘蛛纲 Arachnida	蜘蛛目 Araneae	大	4	16	2.62	**
5			伪蝎目 Pseudoscorpiones	大	1	1	0.26	Pr
6			盲蛛目 Opiliones	大	26	17	5.63	**
7			蜚蠊目 Blattellidae	中小	473	1832	82.32	***
8		软甲纲 Malacostraca	等足目 Isopoda	大	12	12	3.14	**
9		倍足纲 Diplopoda		大	44		5.76	**
10		综合纲 Symphyla		中小	15	10	0.89	S
11		原尾纲 Protura		中小	4		0.14	F
12		弹尾纲	弹尾目 Collembola	中小	285	179	16.57	***
13		双尾纲	双尾目 Diplura	中小	1	1	0.07	O
14		昆虫纲 Insecta	等翅目 Isoptera	大	8		1.05	**
15			半翅目 Hemiptera	大		1	0.13	Ph
16			啮虫目 Psocoptera	大	64	73	17.93	***
17			缨翅目 Thysanoptera	大	6	4	1.31	**
18			鞘翅目 Coleoptera	大	26	46	9.42	**
19			鳞翅目 Lepidoptera	大	4	10	1.83	**
20			双翅目 Diptera	大	160	29	24.74	***
21			同翅目 Homoptera	大	2	4	0.79	O
22			膜翅目 Hymenoptera	大	75	38	14.79	***
	大型				465	299		
小计	中小型				774	2026		
	类群数				19	19		
总计					1239	2325		

注: 表中 Ph Phytophaga 植食性, F Fungivorous form 菌食性, Pr Predators 捕食性, S Saprozoic 腐食性, O Omnivores 杂食性。*** 优势类群, ** 常见类群。

2 2 土壤动物群落变化规律

2 2 1 土壤动物数量和类群变化 在两种林型中, 混交林中小型土壤动物个体数量和类群数均大于栎树纯林; 大型土壤动物个体数量和类群数均低于栎树纯林, 但两种林型土壤动物类群总数相等; 土壤动物数量和类群逐月变化如图 1 所示。土壤动物数量随着时间的推移, 其类群和数量变化在 4—10 月份趋势较明显, 土壤动物个体数在 4 或 5 月份趋势较明显, 土壤动物个体数在 4 或 5 月份最低, 纯林在 5—8 月份以及混交林在 4—8 月份土壤动物数量逐渐增加; 4 或 5 月份土壤动物类群数最低, 纯林和混交林均以 8 月份类群数最高, 两种林型土壤动物类群数和个体数在 $\alpha = 0.05$ 差别不显著。

不同类型网袋土壤动物类群和个体数量明显不同, 其变化趋势如表 2 所示, 在 3 种类型凋落袋中, 栎树纯林土壤动物总类群数和个体总数均为 $1\text{ mm} > 5\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$, 混交林土壤动物个体数则为 1 mm

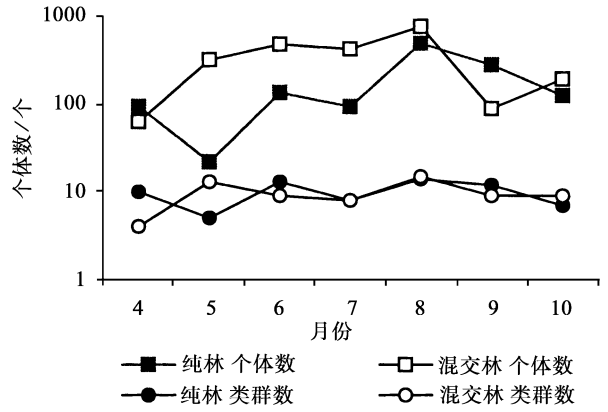


图 1 九龙山森林凋落物层土壤动物数量与类群变化

$> 5\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$, 类群数则为 $5\text{ mm} > 1\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$, 但两种林型土壤动物类群和个体数量出现的最大值均出现在 8—9 月份, 最小值则主要集中在 4—5 月份。

表 2 九龙山不同类型凋落袋土壤动物变化

项目	个体数量								类群						
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	
纯林	5mm	64	2	64	43	119	187	10	9	2	11	6	11	11	4
	1mm	29	18	20	34	371	36	112	6	5	7	6	10	8	7
	1/300mm	1	2	51	1	0	57	1	1	2	6	1	0	4	3
混交林	5mm	40	267	149	73	245	30	42	4	9	8	6	15	8	4
	1mm	17	34	239	323	317	59	123	2	8	6	4	9	6	8
	1/300mm	6	18	90	27	198	0	29	1	3	5	4	6	0	2

2 2 2 土壤动物多样性变化 土壤动物多样性指数、均匀性指数以及优势度随月份和林型不同而明显不同, 如表 3 所示, 土壤动物多样性指数随时间推移呈增长趋势, 其中纯林大型土壤动物多样性指数 5—9 月份呈递增的趋势明显, 4—5 月份以及 9—10 月份呈递减趋势, 中小型土壤动物在 4—5 月份以及 6—8 月份呈递增趋势; 混交林 4—7 月份、8—9 月份基本呈递减趋势, 中小型土壤动物在 4—5 月份以及 7—9 月份呈递增趋势, 5—7 月份呈递减趋势。均匀性指数与优势度在两种林型中变化趋势不一致, 其中纯林大型土壤动物均匀性指数基本呈递增趋势, 中小型土壤动物变化较大, 混交林则大型土壤动物均匀性指数变化较大, 中小型土壤动物则基本呈递减趋势; 纯林大型土壤动物优势度 5—8 月份呈递减

趋势, 8—10 月份呈递增趋势, 中小型土壤动物则 6—9 月份呈递增趋势, 混交林大型土壤动物与中小型土壤动物优势度变化较大。多样性指数仅反映中小型土壤动物群落结构变化且与类群数 ($H = 0.8203$, $H = 0.6981$, $p < 0.05$) 及均匀性 ($H = 0.9102$, $p < 0.05$, $H = 0.4369$, $p < 0.10$) 的变化相一致。

Jaccard(q) 指数为 0.7273 表明在两种林型中, 森林凋落物土壤动物群落的组成具有很高的异质性, 反映出不同植被覆盖物对土壤生态系统内部环境, 进而对土壤动物群落的影响。

Spearmen 等级相关指数分析表明, 土壤动物优势类群与凋落物分解残存量之间的相关性不显著 ($r_s < 0.786$, $p > 0.05$)。

表 3 九龙山森林凋落物层土壤动物多样性

项目	中小型土壤动物								大型土壤动物						
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	
纯林	H	1.237	2.071	0.1385	1.537	1.557	9.1728	6.1289	5.1362	1.531	1.221	8.1242	3.1339	3.0663	7.0631
	J	1.126	1.000	0.1260	8.1399	1.418	0.1246	9.1860	4.700	2.104	5.0509	5.0693	4.0539	0.302	1.0392
	D	0.246	9.0277	8.0272	7.0166	3.0098	2.0231	4.0342	0.146	6.0187	5.0097	9.0133	1.0288	5.0459	8.0160
混交林	H	1.668	2.1383	6.1488	8.0793	1.2061	8.1348	4.1407	5.0459	8.0678	9.0468	7.0254	0.790	1.1480	7.0532
	J	2.406	7.0998	1.2147	8.1144	2.1487	3.1945	3.1000	0.663	4.0309	0.240	9.0141	8.0329	5.0760	9.0273
	D	0.194	1.0343	4.0308	9.0642	3.0135	3.0187	8.0279	5.0308	6.0070	2.0150	7.0085	9.0066	2.0153	8.0090

2.2.3 土壤动物优势群落在落叶分解中的变化与集聚时间 从表 4 看出土壤动物优势群落在两种林型森林落叶分析变化。土壤动物优势类群主要在 7—8 月份大量集聚,但由于林型不同,不同月份土

壤动物集聚量略有差异。在栎树纯林,除蜚蠊目随月份增加,其个体数基本呈增长的趋势外,其他变化不明显;在栎树混交林,蜚蠊目和啮虫目数量随月份变化趋势基本相同,其他变化幅度无明显规律性。

表 4 九龙山森林凋落物层土壤动物优势类群月变化

类群	纯林							混交林						
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
蜚蠊目	44	6	71	58	143	47	104	52	245	425	403	490	45	172
弹尾目	10	0	17	1	89	167	1	2	25	6	1	141	4	0
啮虫目	6	8	17	23	4	1	5	8	10	19	7	28	7	3
双翅目	5	0	1	2	148	2	2	0	12	4	3	2	0	2
膜翅目	0	0	1	0	74	0	0	0	1	0	0	36	1	0

在两种林型凋落物分解过程中,5 类土壤动物优势类群,即蜚蠊目、弹尾目、啮虫目、双翅目和膜翅目集聚的时间及其变化范围如表 5 蜚蠊目在栎树纯林凋落物中集聚的时间最长,啮虫目集聚的时间最短,分别为 10.33 和 8.53 个月;膜翅目在栎树混交林凋落物中集聚的时间最长,双翅目集聚的时间最短,分别为 9.95 和 8.13 个月。

表 5 主要土壤动物集聚时间 月

类群	混交林		纯林	
	演替指数	标准差	演替指数	标准差
蜚蠊目	9.49	0.94	10.33	1.14
弹尾目	9.01	3.60	9.71	2.12
啮虫目	8.85	1.14	8.53	0.98
双翅目	8.13	0.44	9.89	0.73
膜翅目	9.95	0.19	9.97	0.12

3 讨论

在陆地凋落物分解过程中,土壤动物群落的改变与落叶中养分浓度损失有关^[5]。在栎林和栎与油松混交林的凋落物分解过程中,土壤动物数量和类群数变化趋势可划分为两个阶段,即 4—8 月份,土壤动物个体数随时间基本呈增长趋势,8—10 月份

则出现下降的趋势,土壤动物类群数变化幅度较平缓,这与两种凋落袋内凋落物分解速度有关,由于阔叶所含的 C/N 低于针叶而容易分解,但当针阔混合以后,其分解速率比单一种类的分解速率加快,而利于土壤动物繁衍,这与 Tracy B. Gartner 等人的研究^[5],即节肢动物在 3 种混合物凋落物内数量大于单种混合物的研究相一致。

凋落物的分解过程是生物因子和非生物因子共同作用的结果,其分解率和分解时间取决于落叶生物特性、土壤、气候以及土壤生物的影响。研究表明^[6],凋落物分解速率与土壤水分、地表温度和土壤 pH 值呈指数正相关,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 值、地表温度、相对湿度。九龙山地处暖温带大陆东岸,半湿润季风气候区,山地由于地形起伏较大,气候条件随海拔、坡向等地形因子的不同而改变,使水热条件在山地的不同部位有较大的差异,本研究两块试验地均位于阴坡,林内湿度和温度较高而利于落叶分解。根据 O lsen^[7]建立凋落物分解方程,栎树第 1 年分解率在 60.0% 左右,本文仅是第 1 年凋落叶分解过程的土壤动物的数量和类群,因此无法确定是

否反映全部参与凋落物分解过程的土壤动物群落,有待于对第 2 年和第 3 年凋落物进行研究,以进一步确定土壤动物群落结构有无差别。

土壤动物类群在落叶上集聚时间长短是对落叶分解过程中食物源变化的反映。从蜱螨目、弹尾目、啮虫目、双翅目、膜翅目 5 类土壤动物优势类群集聚的时间看,栎树纯林凋落物集聚的时间长于混交林,这是由于混交林比栎树纯林的土壤微生物活跃,有机物质分解转化快^[8],而落叶的分解是在土壤动物形成的食物网中进行的,分解过程中一些物种的出现或消失,是由于取食行为发生变化的结果,这样引起参与分解过程的食物网中的土壤动物群落结构发生改变,从而引起土壤动物类群在不同凋落物上的集聚时间产生变化^[8],实质上就是食物源的改变引起了土壤动物结构变化。

本文共选取 3 种类型的尼龙网袋对九龙山森林凋落层的土壤动物群落以及动态变化状况进行研究,在 3 种类型凋落袋中,栎树纯林土壤动物总类群数和个体总数均为 $1\text{ mm} > 5\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$,混交林土壤动物个体数为 $1\text{ mm} > 5\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$,类群数则为 $5\text{ mm} > 1\text{ mm} > 1/300\text{ mm}$,表明土壤动物数量和类群的变化与网袋网孔的大小有关,孔径增大,利于大型土壤动物进出网袋而促进凋落物分解^[9],导致大孔凋落袋养分迅速分解,使其土壤动物个体数量和类群数降低;孔径过小,限制了土壤动物的进出,其凋落物的分解是同凋落物本身易溶物质自然淋失、微生物的活动以及环境因子相互作用的结果,混交林由于其 5 mm 凋落袋中大型土壤动物种类增多而使其类群总数高于 1 mm ,但随时间推移

和分解速度等改变,类群数量可能会发生变化。

由于受条件所限,本文仅采用改良干漏斗法和手拣法对森林凋落层的土壤动物种类和数量进行了研究,虽在分离凋落物土壤动物时采集到少量的土壤线虫个体,但未进行统计,一些湿性中小动物尚未进行分析,这对本文的分析结果是否产生影响,还有待于今后研究加以确认。

参考文献:

- [1] Marauán M, Scheu S. Changes in microbial biomass, respiration and nutrient status of beech (*Fagus sylvatica*) leaf litter processed by millipedes (*Gibberium arginatum*) [J]. *Oecologia*, 1996, 107: 131~140
- [2] Takeda H A. 5 year study of pine needle litter decomposition in relation to mass loss and faunal abundances [J]. *Pedobiologia*, 1988, 32: 304~317
- [3] 尹文英. 中国土壤动物检索图检 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [4] Swift M J, Heal OW, Anderson JM. Decomposition in Terrestrial Ecosystems [M]. Univ Calif Press, Berkeley, 1979
- [5] Tracy B, Gartner, Zoe G, Cardon. Decomposition dynamics in mixed species leaf litter [J]. *Oikos*, 2004, 104: 230~246
- [6] 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原枯落叶分解的研究 [J]. *生态学报*, 1993, 13 (3): 214~219
- [7] Oksen J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological system [J]. *Ecology*, 1963, 44 (2): 322~331
- [8] Ulrich Imler. Changes in the fauna and its contribution to mass loss and N release during leaf litter decomposition in two deciduous forests [J]. *Pedobiologia*, 2000, 44: 105~118
- [9] Bradford M A, Tardoff G M, Eggers T, et al. Microbiota, fauna, and mesh size interactions in litter decomposition [J]. *Oikos*, 2002, 99: 317~323