

# 我国重要森林群落凋落物层土壤动物群落生态特征

林英华<sup>1</sup>, 孙家宝<sup>2</sup>, 张夫道<sup>3</sup>

(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试验室, 北京, 100091  
2. 黑龙江省森林保护研究所, 黑龙江省哈尔滨 150040; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 2001 年 9 月 ~ 2002 年 9 月, 采用凋落袋分解法对我国不同气候带的 8 种重要森林群落, 即黑龙江帽儿山的红松林 (*Pinus koraiensis*) 与针阔混交林 (落叶松 (*Larix gmelinii*)、白桦 (*Betula Platyphylla*))、北京九龙山辽东栎林 (*Quercus liaotungensis*) 与针阔混交林 (辽东栎、油松 (*Pinus tabulaeformis*)), 江西大岗山杉木林 (*Cunninghamia lanceolata*) 与针阔混交林 (杉木、鹅掌楸 (*Liriodendron chinense*)) 林以及广东鼎湖山常绿阔叶林 (荷木 (*Schima superba*))-厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*) 与针阔混交林 (马尾松 (*Pinus massoniana*)、荷木) 凋落物层土壤动物群落进行研究。全年 74 次共采集森林凋落层土壤动物个体 29123 只, 其中大型土壤动物 4492 只、中小型土壤动物 24631 只, 隶属 4 门 14 纲 30 目, 蝉螨类、弹尾类为凋落层的优势群落。非参数 Kruskal-Wallis 方差分析表明, 8 种森林群落凋落层土壤动物群落组成差异性显著 ( $\chi^2_{(7)} = 18.867, P < 0.01$ ), 且帽儿山、九龙山与鼎湖山之间以及大岗山与鼎湖山阔叶林之间凋落层土壤动物群落组成存在显著性差异 ( $P < 0.001$ )。研究时段内, 大型土壤动物月均数量和类群数量随着纬度升高而呈现明显的递减趋势; 中小型土壤动物月均数量随纬度升高而基本呈升高的趋势。凋落层土壤动物月均数量、多样性、均匀性均差别显著 ( $X^2_{(66)} = 37.95, X^2_{(66)} = 26.38, X^2_{(66)} = 328.97, P < 0.001$ )。多样性分析显示, 鼎湖山凋落层土壤动物分布最丰富、分布最均匀; 大岗山与鼎湖山典型森林群落凋落层土壤动物群落相似性最高, 帽儿山与鼎湖山典型森林群落凋落层土壤动物群落相似性最低。灰色综合关联度分析表明, 年均温度对土壤动物影响最大, 有机质 (表土) 次之, 土壤 pH 次于前两者, 年均相对湿度影响最小, 环境因子对主要土壤动物群落产生不同的影响。

**关键词:** 生态分布; 多样性; 灰色综合关联度; 环境因子

文章编号: 1000-0933(2009)06-2938-07 中图分类号: Q143, Q948, Q958 文献标识码: A

## Characteristics of soil fauna community in forest floor at different climate zone, China

LIN Ying-Hua<sup>1</sup>, SUN Jia-Bao<sup>2</sup>, ZHANG Fu-Dao<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Forest Protection, State of Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Forest Protection Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China

3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2938 ~ 2944.

**Abstract:** Forest litter and soil fauna are important in forest ecosystem processes where they help to regulate nutrient dynamics and soil quality, and are useful bioindicators of ecosystem condition and change. To study the characteristics of soil fauna community in forest floor, we collected soil fauna from Sept. 2001 to Sept. 2002 using litterbags in 8 forests in different climate zone, including Korean Pine forest (*Pinus koraiensis*) and mixed forest (Larch (*Larix gmelinii*) and Birch (*Betula Platyphylla*)) of Maoershan in Heilongjiang Province, Robur Forest (*Quercus liaotungensis*) and mixed forest (Robur (*Quercus liaotungensis*) and Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*)) in Beijing, Fir forest (*Cunninghamia lanceolata*) and

基金项目: 国家科技部社会公益研究专项资金项目部分资助(2000-177)

收稿日期: 2008-02-29; 修订日期: 2008-06-30

致谢: 萧刚柔教授、杨秀元先生、高文呈研究员、廖崇惠研究员、张雪萍教授鉴定本研究的部分标本; 野外工作得到了黑龙江省帽儿山生态定位站、中国林科院华北林业实验中心、中国林科院大岗山生态定位站、中国科学院鼎湖山生态定位站的协助, 在此一并致谢。

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: linyinghua@263.net

mixed forest ( Fir and Chinese Tulip Tree (*Liriodendron chinense*)) of Dagangshan in Jiangxi Province and Monsoon evergreen broad-leaved forest ( Superba schima forest (*Schima superba*) and Chinese Cryptocarya (*Cryptocarya chinensis*)) and pine and broad - leaf mixed forest( Masson pine(*Pinus massoniana*) and Superba schima ) of Dinghushan in Guangdong Province. We sampled 74 times and totally collected 29123 individuals of soil animal, belonging to 4 Phylums, 14 Classes, 30 Orders. Among them, 4492 individuals were macrofauna , 24631 were meso and microfauna. Mite and springtails were the most dominant species in the collection. The composition of soil fauna in forest floor were significantly impacted by the forest litter ( $\chi^2_{(7)} = 18.867$ ,  $P < 0.01$ ). Significant difference in the composition of soil fauna were detected between forests in Maoershan and Dinghushan, between Jiulongshan and Dinghushan, between Dagangshan and Dinghushan ( $P < 0.001$ ). Our data showed that both the monthly individual and group of soil macrofauna in average were significantly decreased as the latitude increased, while the average of monthly individual of soil meso and microfauna were usually increased as the latitude increased. The mean individual of soil fauna was significantly difference between months ( $X^2_{(66)} = 37.95$ ,  $P < 0.001$ ), the difference between in diversity index and evenness index was significant monthly ( $X^2_{(66)} = 26.38$ ,  $X^2_{(66)} = 328.97$ ,  $P < 0.001$ ). The highest community diversity and evenness of soil fauna was recorded in Dinghushan. The soil fauna in forest floor were most similarity between forests in Dagangshan and Dinghushan by similarity coefficients analysis, while the lowest similarity was found between forests in Maoershan and Dinghushan. Our data revealed that the mean annual temperature produced the most effect on soil fauna in forest floor, the second effect factor was the soil organic matter ( surface soil ), soil pH was the third, and annual relative moisture played minimum role in the soil fauna. The environment factors had different effect on the key soil fauna community.

**Key Words:** distribution; diversity; grey synthesis correlation; environment factor

陆地生态系统中,植物凋落物分解物构成了地上和地下间高度复杂而相互关联、且极其多样化土壤有机体群落能量和物质的主要资源<sup>[1]</sup>。树木残体在为土壤生物提供食物和庇护所的过程中,影响着森林生态系统中土壤生物空间的异质性<sup>[2]</sup>。土壤动物通过消化和粉碎落叶并刺激微生物来调控分解过程提高土壤养分的利用率<sup>[3]</sup>,因而在凋落物分解过程中扮演着主要角色<sup>[4]</sup>,其在凋落物分解中的生物主导地位日益得到重视。一些学者针对土壤动物在凋落物分解中的作用进行了相关研究<sup>[5]</sup>,但多研究仍集中土壤动物群落与凋落物分解关系方面<sup>[6]</sup>。受研究方法及研究区域等方面限制,未能反映出我国森林凋落层土壤动物群落特征。

本文以我国不同气候带重要森林群落为例,通过凋落物分解过程中土壤动物群落特征进行研究,目的在于了解不同气候带森林凋落层土壤动物群落特征与分布规律,探讨森林凋落层土壤动物与环境因子间的相互关系。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

研究区位于 N23°09'21" ~ 45°20', E112°30'39" ~ 127°30'之间的中低山区,温带、暖温带、亚热带和南亚热带样地分别设在黑龙江帽儿山、北京九龙山、江西大岗山和广东鼎湖山。各区域分别选择 2 种主要森林类型,即黑龙江帽儿山红松林(A)与混交林(B)、北京九龙山辽东栎林(C)与混交林(D)、江西大岗山杉木林(E)与混交林(F)以及广东鼎湖山常绿阔叶林(G)与针阔混交林(H)进行研究,自然概况如表 1。

### 1.2 研究方法

凋落袋方法研究自然状态下森林凋落层土壤动物群落。2001 年 9 ~ 10 月间分别采集各地纯林、混交林的自然凋落叶,称取 15g( 鲜重,在计算时换算为干重 ) 分别放入 2 种网孔 (5mm、1mm) 尼龙袋中 (15cm × 20cm),将网袋按照间距 1m 并排埋入落叶层下,与翌年 1 月至 12 月间,每月各采集 3 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。除倍足纲和线虫纲外,其他均鉴定到目<sup>[7]</sup>。土壤动物体型大小依据其体宽,即在食物分解过程中作用<sup>[8]</sup>进行分类。

表 1 研究区域自然概况

Table 1 The environment factor of field experiment

类别 Sort	黑龙江帽儿山 Maoershan at Heilongjiang Province	北京九龙山 Jiulongshan at Beijing	江西大岗山 Dagangshan at Jiangxi Province	广东鼎湖山 Dinghushan at Guangdong Province
地理位置 Location	N45°20' ~ 45°25' E127°30' ~ 127°34'	N39°54' ~ 39°59' E 115°59' ~ 116°07'	N27°30' ~ 27°50' E 114°30' ~ 114°45'	N23°09'21" ~ 23°11'30" E112°30'39" ~ 112°33'41"
土壤 Soil pH(1:1H <sub>2</sub> O)	6.38 ~ 6.55	6.25 ~ 6.92	4.39 ~ 4.50	4.12 ~ 4.28
地形 Terrain 坡向及坡度 Slope	东南 7° Southeast 7°	东北 25° Northeast 25°	东北 Northeast	南 20 ~ 30° Southern 20 ~ 30°
海拔 Elevation (m)	353 ~ 465	550 ~ 599	400 ~ 600	200 ~ 300
植被 Vegetation 优势种(凋落袋成分及比例)	A 红松林 <i>Pinus koraiensis</i> , B 落叶松 <i>Larix gmelinii</i> , 白桦 <i>Betula Platypylla</i> = 2:1	C 辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i> , D 辽东栎:油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> = 2:1	E 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> , F 杉木:鹅掌楸 <i>Liriodendron chinense</i> = 2:1	G 荷木 <i>Schima superba</i> :厚壳桂 <i>Cryptocarya chinensis</i> = 2:1, H 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> :荷木 = 2:1
盖度 Cover (%)	70.0	65.0	75.0	80 ~ 90.0
凋落物平均厚度 Litter thickness(cm)	3.5	2.0	3.0	3.5
气候特点 Climate 年均温度 Mean annual temperature(℃)	2.8	11.7	15.8	20.9
年均日照 Mean annual sunshine(h)	2471.3	2470	1 656.9	1433
年均降水量 Mean annual precipitation(mm)	723.8	650.4	1 590.9	1956
年蒸发量 Annual evaporation capacity(mm)	1093.9	1890.7	1504	1115
全年无霜期 Frostless Season(d)	120 ~ 140	216	265	310 ~ 345
年均相对湿度 Annual relative moisture(%)	78.0	50.0	80.0	81.5
凋落袋放置时间 Time	2001 年 10 月 2001 Oct.	2001 年 10 月 Oct. 2001	2001 年 10 月 Oct. 2001	2001 年 9 月 Sept. 2001
实验周期 Experiment cycle	翌年 5 月至 10 月间 May to Oct. 2002	翌年 4 月至 10 月间 Apr. to Oct. 2002	翌年 1 月至 12 月间 Jan. to Dec. 2002	当年 10 月至翌年 9 月间 Oct. 2001 to Sept. 2002

### 1.3 数据处理

群落多样性指数采用 Shannon-Weaner index 和 Pielou 指数, 即  $H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ ,  $J_s = H'/\ln S$ 。群落相似性采 Jaccard( $q$ )指数,  $q = c/(a + b - c)$ 。

非参数 Kruskal-Wallis 方差及其多重比较分析典型森林群落凋落层土壤动物群落组成、个体数量、类群丰富度、类群多样性以及类群均匀性显著差异性。

灰色综合关联度分析方法对环境因子的影响进行综合评价。灰色综合关联度  $\rho_{0i} = \theta \varepsilon_{0i} + (1 - \theta) r_{0i}$ , 其中  $\varepsilon_{0i}$ 、 $r_{0i}$  分别为灰色绝对关联度和相对关联度,  $\theta \in [0, 1]$ , 一般为 0.5<sup>[10]</sup>。所有运算通过 SPSS11.0 软件和 Microsoft Excel 2003 进行。

## 2 结果

### 2.1 土壤动物群落组成

全年 74 次共采集重要森林群落凋落层大型土壤动物 4492 只、中小型土壤动物 24631 只, 隶属 4 门 14 纲

30目,其中帽儿山9纲20目11343只、九龙山10纲21目3564只、大岗山12纲27目3788只、鼎湖山13纲28目10428只。蜱螨类、弹尾类在凋落层土壤动物群落个体数中均占凋落层土壤动物总数的10%以上;其次颤蚓目、后孔寡毛目、柄眼目、蜘蛛目、盲蛛目、倍足纲、啮虫目、缨翅目、鞘翅目、双翅目、膜翅目分别各凋落层土壤动物总数的1%以上(表2)。

表2 重要森林群落凋落层土壤动物群落的组成

Table 2 Structure of soil fauna community in forest floor

类群 Taxa	体型 Size	A	B	Per. *	C	D	Per. *	E	F	Per. *	G	H	Per. *
线虫纲 Nematoda	Meso/micro	4	2	0.05				2	18	0.53			
颤蚓目 Tubificida	Macro	31	26	0.5	15		0.42	17	46	1.66	1	0.01	
后孔寡毛目 Opisthopora	Macro	2		0.02		2	0.06	30	59	2.35	21	13	0.33
瓢蛭目 Ganthobellida	Macro										1		0.01
柄眼目 Stylommatophora	Macro	3	10	0.11	18	46	1.8	6	4	0.26	7	41	0.46
蜘蛛目 Araneae	Macro	29	23	0.46	4	16	0.56	21	12	0.87	57	80	1.31
伪蝎目 Pseudoscorpiones	Macro				1	1	0.06	9	9	0.48	34	4	0.36
盲蛛目 Opiliones	Macro		2	0.02	26	17	1.21	6	3	0.24	27	3	0.29
蜱螨目 Acariformes	Meso/micro	2006	1216	28.41	473	1832	64.67	915	843	46.41	2313	2774	48.78
猛水蚤目 Harpacticoida	Macro						2			0.05			
等足目 Isopoda	Macro				12	12	0.67	7	9	0.42	14	2	0.15
倍足纲 Diplopoda	Macro	11	11	0.19	44		1.23	20	57	2.03	107	15	1.17
地蜈蚣目 Geophilomorpha	Macro	3		0.03									
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	Macro	22	12	0.3				1	2	0.08	5	1	0.06
蜈蚣目 Scolopendromorpha	Macro							1		0.03	7		0.07
综合目 Symphyla	Meso/micro				15	10	0.7	7	6	0.34	13	30	0.41
蠋蛾目 Tetramerocerata	Macro										17	22	0.37
原尾目 Protura	Meso/micro	9		0.08		4	0.11				33	16	0.47
弹尾目 Collembola	Meso/micro	4644	2954	66.98	285	179	13.02	536	596	29.88	1393	1429	27.06
双尾目 Diplura	Meso/micro				1	1	0.06	2	8	0.26	2	60	0.59
蜚蠊目 Blattoptera	Macro						0	3	1	0.11	35	4	0.37
等翅目 Isoptera	Macro				8		0.22	9		0.24	6	77	0.8
直翅目 Orthoptera	Macro						0				4		0.04
革翅目 Deramptera	Macro	1	1	0.02			0		3	0.08			
半翅目 Hemiptera	Macro		1	0.01		1	0.03	1		0.03	17	7	0.23
同翅目 Homoptera	Macro	4	8	0.11	2	4	0.17	20	14	0.9	5	92	0.93
啮虫目 Psocoptera	Macro	3		0.03	64	73	3.84	7	6	0.34	49	5	0.52
缨翅目 Thysanoptera	Macro				6	4	0.28	1	3	0.11	146	16	1.55
鞘翅目 Coleoptera	Macro	119	71	1.68	26	46	2.02	26	101	3.35	216	90	2.93
鳞翅目 Lepidoptera larva	Macro		5	0.04	4	10	0.39	6	2	0.21	28	18	0.44
双翅目 Diptera larva	Macro	54	46	0.88	160	29	5.3	102	141	6.41	426	46	4.53
膜翅目 Hymenoptera	Macro	1	9	0.09	75	38	3.17	48	40	2.32	266	333	5.74
总计 Total 个体数 Individuals	Macro	283	225		465	299		343	512		1495	870	
	Meso/micro	6663	4172		774	2026		1462	1471		3754	4309	
类群数 Group	Macro	13	13		15	14		21	18		22	20	
	Meso/micro	4	3		4	5		5	5		5	5	

\* Per. :Percent 百分比; Meso and microfaun (Meso/micro) :中小型; Macrofauna (Macro) :大型

非参数 Kruskal-Wallis 方差分析表明,不同森林群落凋落层土壤动物群落组成差异性显著( $\chi^2_{(7)} = 18.867$ ,  $p < 0.01$ )。多重比较结果显示,帽儿山、九龙山与鼎湖山之间以及大岗山与鼎湖山荷木林之间土壤动物群落组成存在显著性差异( $p < 0.001$ )。

## 2.2 土壤动物群落生态分布

研究时段内,4个区域采集土壤动物类群分别为20、21、27类和28类,个体数分别为11343、3564、3788只和10428只。月均个体数分别为945.3、254.6、157.8只和434.5只。大型土壤动物月均数量分别为42.3、54.6、35.6只和98.5只,中小型土壤动物月均数量分别902.9、200.0、122.2只和336.0只;大型土壤动物类群总数分别为16、17、22类和23类,中小型土壤动物类群总数分别为4、5、5类和5类,显示土壤动物类群随纬度增加而递减趋势,月均个体数和总数基本随纬度增加呈减少趋势,大型土壤动物月均数量和类群随纬度升高呈递减趋势,中小型土壤动物月均个体数则基本呈升高趋势(表2)。

同一地区不同森林群落凋落层土壤动物数量与类群数量不一致。其中仅帽儿山两种森林凋落层中的大型土壤动物类群数量相同,纯林凋落层中的中小型土壤动物个体数大于混交林;大岗山混交林凋落层中的大型土壤动物个体数高于纯林(表2)。

## 2.3 土壤动物群落多样性变化

由于中小型土壤动物类群基本相同,将不同体型土壤动物类群合并计算群落多样性。

整体而言,凋落层土壤动物多样性指数由小到大依次为 $H'$ <sub>帽儿山</sub>(0.8610) <  $H'$ <sub>九龙山</sub>(1.4000) <  $H'$ <sub>大岗山</sub>(1.6400) <  $H'$ <sub>鼎湖山</sub>(1.6572);均匀性指数为 $J_s$ <sub>帽儿山</sub>(0.2874) <  $J_s$ <sub>九龙山</sub>(0.4600) <  $J_s$ <sub>大岗山</sub>(0.4964) <  $J_s$ <sub>鼎湖山</sub>(0.4973),表明鼎湖山地区凋落层土壤动物分布最丰富、分布最均匀;Jaccard( $q$ )指数大小顺序依次为 $q_{大-鼎}$ (0.8727) >  $q_{九-大}$ (0.8333) >  $q_{九-鼎}$ (0.7636) >  $q_{帽-大}$ (0.7500) >  $q_{帽-九}$ (0.7317) >  $q_{帽-鼎}$ (0.6182),表明大岗山与鼎湖山森林群落凋落层土壤动物群落相似性最高,而帽儿山与鼎湖山间相似性最低,不同区域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。

但不同群落间土壤动物月均数量、类群数、多样性与均匀性与整体变化不一致(表3),其中土壤动物月均类群数、多样性与均匀性基本随着纬度的降低而增加,土壤动物月均数量、多样性、均匀性均差别显著。

表3 重要森林类型土壤动物群落月均个体数量、类群丰度、类群多样性与均匀性比较

Table 3 Means of soil animal individuals, group richness, diversity and evenness

林型 Type	个体数量 Individuals	类群数 Group richness	多样性指数( $H'$ ) Diversity index	均匀性指数( $J_s$ ) Evenness index	差异性检验 Significantly
A	1157.5 ± 536.3cdefgh	9.8 ± 1.7egh	0.8027 ± 0.1948	0.3565 ± 0.0880 cefgh	个体 individual
B	733.2 ± 470.0cdef	10.2 ± 2.4cefgh	0.8611 ± 0.1799	0.3799 ± 0.0888 cefgh	$X^2_{(66)} = 37.95 p < 0.001$
C	177.0 ± 158.5gf	9.9 ± 3.3d	1.3716 ± 0.3563	0.6182 ± 0.1679d	类群 group
D	332.3 ± 246.1f	9.6 ± 3.6fg	0.9506 ± 0.6091h	0.4206 ± 0.2313h	$X^2_{(66)} = 7.55 p > 0.05$
E	152.3 ± 60.5fg	11.8 ± 3.6	1.3523 ± 0.1879	0.5523 ± 0.0797 f	多样性 diversity
F	169.5 ± 138.2fg	11.6 ± 3.5	1.5470 ± 0.2838	0.6538 ± 0.0747gh	$X^2_{(66)} = 26.38 p < 0.001$
G	437.4 ± 431.6	12.9 ± 3.9	1.3967 ± 0.4145	0.5497 ± 0.1222	均匀性 evenness
H	431.6 ± 229.3	12.2 ± 3.4	1.3284 ± 0.2905	0.5387 ± 0.0978	$X^2_{(66)} = 328.97 p < 0.001$

## 2.4 环境因子对主要土壤动物群落的影响

选择土壤动物个体数量占总个体数量1%以上的类群土壤动物总数、稀有数量、类群以及群落多样性指数为母数列( $y$ ),并依次定义蜱螨目( $y_1$ )、弹尾目( $y_2$ )、鞘翅目( $y_3$ )、双翅目( $y_4$ )、膜翅目( $y_5$ )、土壤动物总数( $y_6$ )、稀有数量( $y_7$ )、类群( $y_8$ )、群落多样性指数( $y_9$ )为母数列( $y$ );选择环境因子为子数列( $x$ ),依次定义土壤pH( $x_1$ )、有机质(表土)( $x_2$ )、海拔( $x_3$ )、盖度( $x_4$ )、凋落物厚度( $x_5$ )、年均温度( $x_6$ )、年均日照时数( $x_7$ )、年均降水量( $x_8$ )、年蒸发量( $x_9$ )、全年无霜期( $x_{10}$ )、年均相对湿度( $x_{11}$ )。原始数据无量纲化初值后,计算灰色绝对关联度( $\varepsilon$ )、灰色相对关联度( $r$ )以及综合关联度( $\rho$ )其关联序大小次序依次为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{6j}(0.7256) &> \varepsilon_{2j}(0.6261) > \varepsilon_{5j}(0.6008) > \varepsilon_{7j}(0.5537) > \varepsilon_{1j}(0.5179) > \varepsilon_{8j}(0.4971) > \varepsilon_{4j}(0.4252) > \\ \varepsilon_{10j}(0.4212) &> \varepsilon_{3j}(0.4155) > \varepsilon_{11j}(0.3825) > \varepsilon_{9j}(0.3737) \\ r_{2j}(0.7258) &> r_{10j}(0.6923) > r_{6j}(0.6817) > r_{8j}(0.6745) > r_{3j}(0.6598) > r_{1j}(0.6585) > r_{9j}(0.6465) > r_{4j} \end{aligned}$$

$$(0.6031) > r_{\gamma_j}(0.6013) > r_{11j}(0.5910) > r_{5j}(0.5012) \\ \rho_{6j}(0.7037) > \rho_{2j}(0.6759) > \rho_{1j}(0.5882) > \rho_{8j}(0.5858) > \rho_{\gamma_j}(0.5775) > \rho_{10j}(0.5567) > \rho_{5j}(0.5510) > \rho_{3j}(0.5377) > \rho_{4j}(0.5141) > \rho_{9j}(0.5101) > \rho_{11j}(0.4609)$$

由此表明,绝对关联度( $\varepsilon$ )中 $x_6$ 为最优因素, $x_2$ 次之, $x_5$ 又次之, $x_9$ 最劣,即年均温度对土壤动物影响最大,有机质(表土)影响次之,凋落物厚度的影响次于前两者,年蒸发量的影响最小;相对关联度( $r$ )中 $x_2$ 为最优因素, $x_{10}$ 次之, $x_6$ 又次之, $x_5$ 最劣,即土壤有机质对土壤动物影响最大,全年无霜期的影响次之,年均温度的影响次于前两者,凋落物厚度的影响最小;而综合关联度( $\rho$ )中 $x_6$ 为最优因素, $x_2$ 次之, $x_1$ 又次之, $x_{11}$ 最劣,即年均温度对土壤动物影响最大,有机质(表土)影响次之,土壤pH影响次于前两者,年均相对湿度影响最小。综合关联度最高为0.7037,最低为0.4609,相差为0.2428,反映出环境因子对主要土壤动物群落具有不同的影响。

### 3 讨论

#### 3.1 凋落层土壤动物群落

受气候、植被和土壤性质的影响,不同纬度的土壤动物群落分布格局不同。研究发现,低纬度地区大型土壤动物分布较多;中小型土壤动物的数量均占所捕获土壤动物总数量均高于75.0%,这与大型土壤动物低纬度凋落物分解中的作用以及中小型土壤动物在凋落物分解中的重要性有关<sup>[9,10]</sup>。大型土壤动物月均数量和类群数量随着纬度升高而呈现明显的递减趋势,中小型土壤动物月均数量随纬度升高而基本呈升高的趋势,这与Begon等人的研究基本一致<sup>[11]</sup>。

74次采样的数据分析显示,月均个体数、类群数以及多样性在两种不同群落中表现趋势不一致(表2),帽儿山由于土壤动物个体数在7月、9月和10月份3个月份纯林凋落层中的数量偏高,如双翅目幼虫、多足以及弹尾类,使得混交林凋落层土壤动物个体数量整体低于纯林凋落层中的土壤动物个体数,鼎湖山常绿阔叶林凋落物是两种阔叶的凋落物,其1、8月和12月份中小型土壤动物个体数,尤其蜱螨类与弹尾类数量偏高,常绿阔叶林月均个体数高于混交林,与Gartner等所研究的土壤动物个体数及多样性与均匀性变化呈高纬度至低纬度递减的趋势<sup>[12]</sup>不一致,虽有研究显示,现场凋落物种类才是决定凋落物中无脊椎动物丰度的关键性因素,而混合凋落物只仅对一些特殊的变量和一些采样时段产生影响<sup>[13]</sup>,是否为本研究结果提供支持,有待于今后研究确认。

凋落物的分解过程也是土壤动物的群落结构随落叶质量的损失、组成、化学成分和微生物的变化而发生的演替过程。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<sup>[14]</sup>。在这个过程中,早期集聚者数量随落叶残存量逐渐减少而逐渐减少,而前、中、后期集聚者数量则变化较小。研究区凋落物分解过程中,优势类群蜱螨类在4个区域凋落层集聚的时间分别为9.69月、9.91月、8.07月、6.08月,优势类群弹尾类则分别为10.18月、9.36月、7.66月、6.70月<sup>[15~17]</sup>,两者均出随海拔降低而积聚在凋落物中的时间逐渐减少,蜱螨类与弹尾类比值(A/C)符合随着热量条件变化而变化规律,但与青木淳—<sup>[18]</sup>研究结果不一致,其中温带A/C为0.42,低于温带地区的1.0水平;暖温带A/C为4.97,则远高于温带1.0水平而接近热带大于1.0水平;亚热带和南亚热带A/C分别为1.55和1.80,与廖崇惠等<sup>[19]</sup>研究A/C=1.4相近。

受改良干漏斗法和手拣法局限性及湿生土壤动物对土壤质量与环境含水量的敏感性的影响,研究虽获得一定数量的湿生土壤动物,如线虫、颤蚓类、弹尾类、蜱螨类以及昆虫类的一些幼虫,但与实际湿生土壤动物状况尚存在一定差异,是否影响本研究结果,待今后进一步研究。

#### 3.2 环境因子对森林群落凋落层土壤动物群落的影响

基于灰色综合关联度较全面地表征序列之间联系是否紧密的一个数量指标的观点<sup>[20]</sup>,将主要土壤动物群落、环境因子分别定义为母数列与子数列并对彼此间关系进行分析。由于灰色绝对关联度、灰色相对关联度以及综合关联度3种关联序分析出发点不同,使得分析结果不一致,其中绝对关联序从绝对量的关系进行考虑, $\varepsilon_{0i}$ 表征折线 $x_0$ 与 $x_i$ 的相似程度,折线 $x_0$ 与 $x_i$ 越相似, $\varepsilon_{0i}$ 越大,反之越小;相对关联序从各时刻观测数据相对于始点的变化, $r_{0i}$ 表征序列 $x_0$ 与 $x_i$ 相对于始点的变化速率之间的关系, $x_0$ 与 $x_i$ 的变化速率越接近, $r_{0i}$ 越

大,反之就越小;而综合关联序则综合了绝对变量的关系和变化, $\rho_{0i}$ 既体现折线 $x_0$ 与 $x_i$ 的相似程度,又反映出 $x_0$ 与 $x_i$ 相对于始点的变化速率的接近程度,是较全面地表征序列之间是否紧密的一个数量指标,由此得出环境因子对土壤动物影响大小依次为:年均温度>有机质(表土)>pH>年均降水量>年均日照时数>全年无霜期>凋落物厚度>海拔>盖度>年蒸发量>年均相对湿度,本研究认为年均温度对土壤动物的影响最大,机质(表土)的影响次之,pH的影响次于前两者,年均相对湿度的影响最小,显示环境因素对凋落物分解过程影响与对参与凋落物分解的土壤生物的影响存在一致性<sup>[21]</sup>。

由于研究采集土壤动物仅是参与凋落叶第1年分解过程土壤动物群落,第1年凋落物的分解量一般在50%左右,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、第3年甚至更长时间内凋落物分解过程进行研究。

#### References:

- [1] Hättenschwiler S, Tiunov A V, Schen A. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystem. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, 36: 191–218.
- [2] Ruan H, Li Y, Zou X. Soil communities and plant litter decomposition as influenced by forest debris: Variation across tropical riparian and upland sites. *Pedobiologia*, 2005, 49: 529–538.
- [3] Maraun M, Scheu S. Changes in microbial biomass, respiration and nutrient status of beech (*Fagus sylvatica*) leaf litter processed by millipedes (*Glomeris marginata*). *Oecologia*, 1996, 107, 131–140.
- [4] Hättenschwiler S, Gasser P. Soil animals alter plant litter diversity effects on decomposition. *Ecology*, 2005, 102: 1519–1524.
- [5] Ilieva-Makulec K, Olejniczak I, Szans M. Response of soil micro-and mesofauna to diversity and quality of plant litter. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: 244–249.
- [6] Gregor S. Decomposition rates and termite assemblage composition in semiarid Africa. *Ecology*, 2005, 86: 1236–1249.
- [7] Yin W Y. *Pictorial keys to soil animal of China*. Beijing: Science Press, 1998.
- [8] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1979.
- [9] Cai X M ed. *Ecosystem Ecology*. Beijing: Science Press, 2000. 223–234.
- [10] Ke X, Winter K, Filser J. Effects of soil mesofauna and farming management on decomposition of clover litter: a microcosm experiment. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 731–738.
- [11] Begon M, Harper J L, Townsend C R. *Ecology: individuals, populations, and communities*. Sinauer Associates, Inc.: Sunderland, Massachusetts, 1986, 386–415.
- [12] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed species leaf litter. *Oikos*, 2004, 104: 230–246.
- [13] Wardle D A, Yeates G W, Barker G M, Bonner K I. The influence of plant litter diversity on decomposer abundance and diversity. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 1052–1062.
- [14] Ulrich Irmler. Changes in the fauna and its contribution to mass loss and N release during leaf litter decomposition in two deciduous forests. *Pedobiologia*, 2000, 44: 105–118.
- [15] Lin Y H, Zhang F D, Sun J B, et al. Dynamic of soil fauna on leaf litter decomposition of forest and its effect in Maoershan. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, (6): 33–36.
- [16] Lin Y H, Yang D F, Zhang F D, et al. Structure Of Soil Animal Community of Oakery Litter And Fluctuation During Leaf Litter Decomposition. *Forest Research*, 2006, 19(3): 331–336.
- [17] Lin Y H, Liu H L, Zhang F D, et al. Fluctuation of soil fauna Community and diversity of litter layer of Fir forest in Dagangshan Mountain. *Forest Research*, 2007, 20: 609–614.
- [18] Aoki Jun-ichi. *Soil Animal of Forestry*. Genetics, 1978, 32(11): 2–7.
- [19] Liao C H, Chen M Q. Study on the soil zoology of Dinghu shan(I). The composition of the soil fauna. *Tropical and subtropical forest ecosystem*, 1989(V): 83–95.
- [20] Liu S F, Dang Y G, Fang Z G, et al. *The theory of grey system and its application(Third edition)*. Beijing: Science Press, 2004.
- [21] Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 2006, 94: 713–724.

#### 参考文献:

- [7] 尹文英. 中国土壤动物检索图集. 北京:科学出版社,1998.
- [9] 蔡晓明编著. 生态系统生态学. 北京:科学出版社, 2000; 223~234.
- [15] 林英华, 张夫道, 孙家宝, 等. 帽儿山土壤动物在凋落叶分解过程中的动态和作用. *东北林业大学学报*, 2005, (6): 33~36.
- [16] 林英华, 杨德付, 张夫道, 等. 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. *林业科学研究*, 2006, 19(3): 331~336.
- [17] 林英华, 刘海良, 张夫道, 等. 江西大岗山杉木凋落层土壤动物群落动态及多样性. *林业科学研究*, 2007, 20(5): 609~614.
- [18] 青木淳一. 森林の土壤动物. 遗伝. 1978, 32(11): 2~7.
- [19] 廖崇惠, 陈茂乾. 鼎湖山森林土壤动物研究(I)区系组成及其特征. 热带和亚热带森林生态系统研究(V), 1989, 83~95.
- [20] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用(第三版). 北京:科学出版社, 2004.