

退化红壤不同人工林恢复下土壤节肢动物群落特征

刘满强¹, 胡 锋^{1*}, 李辉信¹, 陈小云¹, 何圆球²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 农业资源与生态环境研究所, 南京, 210095; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京, 210008)

摘要:对退化红壤上恢复 10a 的 4 种人工林, 即小叶栎(*Quercus chenii*)、木荷(*Schima superba*)、马尾松(*Pinus massonina*)与木荷-马尾松的混交林土壤节肢动物群落进行了季节动态调查。结果表明, 不同林地节肢动物群落的组成和数量发生了明显分异。节肢动物类群数在各季节一般都是小叶栎最高, 混交林、木荷居中, 马尾松最低。节肢动物的个体数总体上仍以小叶栎最高, 但在夏季, 马尾松林地由于弹尾目数量爆发而使总个体数最高。节肢动物群落存在明显的季节波动, 一般春季节肢动物类群数和个体数量最高, 夏季最低, 夏季高温干旱对节肢动物有强烈的抑制作用, 而冬季低温对节肢动物的影响不及夏季干热的影响严重。各季节林地节肢动物群落组成皆以螨类为主体, 占总个体数的 60.2%~91.7%。弹尾目占总个体数的比例季节变化较大, 但均以马尾松林地为最高。捕食者数量(蜈蚣和蜘蛛)在各季节都是小叶栎显著高于其它林地($P < 0.05$), 混交林与木荷比较接近, 而马尾松最低。在群落多样性指数中, 丰富度指数 d 和密度-类群指数 DG 表达的群落差异明显, 其不同林地的大小顺序与类群数趋势基本一致, 而香农指数 H' 、均匀度指数 J 群落之间基本无差异。聚类分析和鉴别分析将不同林地的节肢动物群落分成 4 组, 小叶栎自成一组, 多样性最高; 混交林和木荷为一组, 多样性居中; 马尾松是多样性最低的一组。总之, 节肢动物群落多样性顺序是小叶栎 > 混交林 ≥ 木荷 > 马尾松, 混交林体现了一定的“混交优势”。凋落物的数量和质量以及土壤水热状况是不同林地节肢动物群落产生分异的主要原因。借助主成分分析和鉴别分析对描述群落特征的指标进行评价, 表明大部分指标相互之间都高度相关($P < 0.01$), 只有 DG 指数是区分不同林地节肢动物群落差异最有潜力的指标。

关键词:退化红壤; 土壤节肢动物群落; 人工林地; 多样性指标; 密度-类群指数(DG)

Soil Arthropod Communities Under Different Artificial Woodland Restored on Degraded Red Soil

LIU Man-Qiang¹, HU Feng¹, LI Hui-Xin¹, Chen Xiao-Yun¹, He Yuan-Qiu² (1. College of Natural Resources and Environmental Science and Institute of Agricultural Resources and Eco-Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 54~61

Abstract: This study was carried out at the Ecological Experiment Station of Red Soil in Yujiang County (28°15'30"N, 116°55'30"E), Jiangxi Province, China. The area is a typical subtropical monsoon region characterized by a warm-wet spring and a hot-dry summer. Annual temperature averages 17.8°C. Total amounts of precipitation and evaporation are about 1700mm and 1359mm, respectively. Approximately half of the annual precipitation occurs from April to June, while precipitation in the period from July to September is only 19% of the total. Soil in the experimental station is recognized as red soil (Ultisol) derived from Quaternary red clay, where the landscape is characterized by low hill with slope gradient from 5° to 8°. Before experiment, the vegetation and soil had heavily degraded because of man-made disturbance and erosion.

Seasonal dynamics of the soil arthropod community was investigated in four kinds of artificially re-

基金项目:国家自然科学基金(49871046)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999011801)和中国科学院红壤生态开放实验站基金资助项目

收稿日期:2001-02-05; **修订日期:**2001-10-06

作者简介:刘满强(1967-), 男, 山东龙口市人, 博士。主要从事土壤生态学研究。

* **通讯作者** E-mail: fenghu@mail.njau.edu.cn

stored woodlands, including deciduous broadleaf woodland (*Quercus chenii*, Qc), evergreen broadleaf woodland (*Schima superba*, Ss), coniferous woodland (*Pinus massonina*, Pm), and coniferous-broadleaf mixed woodland (*Schima superba*-*Pinus massonina*, Sm). Our objectives were: (1) to describe the composition, diversity and seasonal fluctuations of soil arthropod communities under different woodland, (2) to determine if restoring measures were reflected in the differentiation of arthropod communities, and (3) to evaluate the suitability of the indices for describing arthropod community and finally screening out the most promising index that can effectively discriminate the community differences.

Results from this study showed that both composition and numbers of arthropods varied with vegetation types. Total group numbers were in the order of Qc(21)>Sm(18)>Ss (16)>Pm (15). Total individuals were also highest in Qc for all seasons except for summer. The highest individuals under Pm in summer were attributed to the sharp increase of Collembola. An obvious seasonal fluctuation of arthropod communities was observed. The total group numbers and individuals in spring were higher than that in other seasons. The communities were greatly depressed in the hot-dry summer, while the depression of arthropods was not so serious in winter as occurred in summer. We found that the mites dominated over entire season, making up from 60.2 to 91.7 percent of the total individuals. Although strongly fluctuating with seasons, the percentage of Collembola of total individuals was always greatest in Pm for every season, and it arrived at 66.5 percent in summer. The number of predators (centipedes and spiders) was significantly higher in Qc ($P<0.05$) than in other woodlands, lowest in Pm, and intermediate in Ss and Sm. Of the indices describing the community diversity, Margalef abundance index (d) and density-group index (DG) could significantly detect the differences among the woodlands ($P<0.05$). Both d and DG values were in the order of Qc>Sm>Ss>Pm, which was consistent with the tendency of total group numbers. However, there were no significant differences for Shannon-Wiener index (H) and Pielou index (J) among the woodlands. Cluster analysis and canonical discriminant analysis separated the four communities into three groups. The first group included Qc only, which had the greatest diversity. The second group consisted of Ss and Sm, which had intermediate diversity. The Pm occupied the last group, which had the lowest diversity. Overall, the diversity of arthropod communities in different woodland followed the order: Qc>Sm>Ss>Pm, Sm showing “mixed superiority” to some extent. Both quality and quantity of the litter and the soil hydrothermal condition were the main factors affecting arthropod community development. Principal component analysis, performed on standardized variables using the correlation matrix, demonstrated that most of the indices were highly intercorrelated ($P<0.01$), suggesting that the above indices contained much redundant information. To identify the sensitivity of all indices, we used the canonical discriminant analysis and found that DG was the only index offering the greatest potential to assess and discriminate soil arthropod communities under different artificial woodland.

Key words: degraded red soil; soil arthropod community; woodland; diversity index; Density-Group index (DG)

文章编号:1000-0933(2002)01-0054-08 中图分类号:S718.6 文献标识码:A

我国热带、亚热带地区红壤的退化问题十分严重,在南方 2.1 亿 hm^2 红壤中退化面积已达 0.8 亿 hm^2 ,既加剧了红壤地区生态环境的恶化,也限制了该区生产潜力的发挥^[1,2]。近年来,退化红壤生态系统的重建和恢复已引起广泛关注,而重建人工林植被是最重要的恢复措施之一。

对于退化红壤生态系统恢复过程中系统结构、功能演变及生态效应的研究国内虽开展了不少工作,但多集中在植物群落和土壤肥力上^[3~5],对土壤动物却少有涉及。晚近的资料表明,土壤动物关系到红壤有机物分解、养分矿化等许多重要的生态功能^[6],而其中节肢动物在森林生态系统中的作用尤为突出^[7,8]。另外,鉴于节肢动物群落组成与结构对环境变化或干扰的反应极为敏感,有关节肢动物群落对土壤质量指示意义的研究是土壤学热点^[9]。

本文是“退化红壤不同植被恢复方式下土壤动物对红壤质量的指示潜力”研究的部分内容,目的是为了

解不同人工林下土壤节肢动物群落特征及季节动态,确定不同恢复林型是否已通过节肢动物群落的分异体现出来,同时评价了几种常用的多样性指标在节肢动物群落研究的应用潜力,以便为进一步探讨节肢动物对退化红壤质量恢复的指示意义提供基础资料。

1 研究方法

1.1 样地概况

本研究在中国科学院红壤生态开放实验站进行,位于江西省鹰潭市余江县刘家站(28°15'30"N,116°55'30"E),属中亚热带湿润季风气候区,年均温 17.6℃,年均降水量 1700mm,年均蒸发量 1359mm。全年降水分配情况是 1~3 月份占 23%,4~6 月份占 48%,7~9 月份占 19%,10~12 月份占 10%。其中 7~10 月份高温干旱,降水量低于蒸发量,月均降水量仅为 100mm,而月蒸发量达 200mm。

1989 年启动退化红壤人工林恢复实验,实验地原为侵蚀退化的疏草荒地,地形为丘陵缓坡,坡度 5~8°,土壤为第四纪红粘土发育的典型红壤。实验设计的林地包括落叶阔叶林(小叶栎 *Quercus chenii*)、常绿阔叶林(木荷 *Schima superba*)、针叶林(马尾松 *Pinus massonina*)及混交林(木荷-马尾松 *Schima superba*-*Pinus massonina*)等人工林植被。

1.2 采样方法

于 1999 年 5 月、8 月、11 月份和 2000 年 2 月份(分别代表春、夏、秋、冬 4 季)进行土壤动物调查。每次调查在每种林地内各设立 5 个有代表性的样区。采样时,用自制的 50cm×50cm 的塑料框紧压地面,就地分拣易逃匿的大型节肢动物,再将样方内的凋落物层(O₁层)收集到透气的聚乙烯袋中,并用小的平底铲刮取半腐解层(O₂层)(至露出矿质土层)并入到凋落物中;然后挖至 20cm,捡取土壤中的大型节肢动物(主要是幼虫)。最后采集 0~20cm 矿质土层样品约 1kg,供分离中小型节肢动物使用。

1.3 分离鉴定

就地分离的大型节肢动物用酒精固定后带回室内鉴定;地表有机物层(O₁+O₂)以及矿质土层样品中的中小型节肢动物在室内用改良的 Tullgren 漏斗分离 48h。节肢动物的鉴定主要参照《中国亚热带土壤动物》^[10]和《中国土壤动物检索图鉴》^[11]进行。

1.4 数据处理

- 节肢动物类群与个体数均换算成每平方米基数。多样性参数计算采用如下公式:
- (1) Margalef 丰富度^[12] $d = (S - 1)/\ln N$ 式中, S 为总类群数, N 为总个体数;
 - (2) Shannon-Weiner 多样性指数^[12] $H = - \sum P_i \ln P_i$ 其中, $P_i = N_i/N$, N 为总个体数, N_i 为第 i 个类群的个体数;
 - (3) Pielou 均匀度^[12] $J = H/H_{\max}$ 式中, H 为 Shannon-Wiener 指数, H_{\max} 为最大多样性;
 - (4) 密度-类群指数 $DG^{[13]}$ $DG = (g/G) \sum_{i=1}^g (D_i C_i / D_{i\max} C)$ D_i 为第 i 个类群个体数, $D_{i\max}$ 为 C 个类群中第 i 个类群的最大值, C_i 为第 i 个类群在 C 个群落中出现的次数, G 为 C 个群落中出现的类群数, g 为要测度的某群落实有类群数。

数据统计分析包括一元方差分析及多元统计分析,后者包括聚类分析、主成分分析和典型鉴别分析,其中聚类分析采用层次聚类法中的平均(组内)联接法,变量采用 4 个季节的类群和个体数量数据;主成分分析采用描述多样性指标的相关矩阵,以消除变量的不同单位对因子负载的影响,只保留特征值大于 1 的公因子,并经最大方差旋转法加强变量之间的相互关系;典型鉴别分析采用组内斜方差矩阵,借助标准化鉴别系数(表达变量对鉴别函数值的影响程度)和结构系数(表达变量与鉴别函数值的相关系数)确定鉴别力最大的变量。所有统计分析均采用 SPSS 软件。

2 结果与分析

2.1 不同林地土壤节肢动物群落组成及季节动态

4 次调查节肢动物 36037 个,隶属 8 纲 21 类(目)。由表 1 可见,4 种林地出现的节肢动物类群数依次小叶栎(21)>混交林(18)>木荷(16)>马尾松(15),小叶栎林地的类群数在各季节都是最高的。季节

之间比较,类群数一般春季最多,其次是秋季,而寒冷的冬季类群数较少,高温干旱的夏季类群数最低。

除了夏季外,各季节节肢动物的总个体数仍是小叶栎林地最高,但只有冬季不同林地之间节节肢动物的总个体数达到显著差异($P<0.05$) (表 1)。虽然马尾松林地的节节肢动物类群数最低,但夏、秋、冬 3 季的节节肢动物总个体数明显高于木荷与混交林,特别是在夏季甚至超过其它所有林地,主要归因于弹尾目数量较多。从 4 个季节节肢动物数量的平均值来看,小叶栎 ($3219 \text{ 个}/\text{m}^2$) > 马尾松 ($2213 \text{ 个}/\text{m}^2$) > 木荷 ($1702 \text{ 个}/\text{m}^2$) > 混交林 ($1224 \text{ 个}/\text{m}^2$)。总个体数的季节波动较大,总体上仍以春季最高、夏秋冬季较低;除了马尾松外,同一林地春季与其它 3 个季节节肢动物的总个体数存在极显著差异($P<0.01$)。

表 1 资料还显示,所有林地节节肢动物群落均以螨类占绝对优势,占总个体数的比例为 $60.2\% \sim 91.7\%$,其中真螨目为优势类群,小叶栎、木荷、马尾松和混交林中真螨目数量占群落总个体数的季节平均值分别为 $65.1\%、68.1\%、50.9\%$ 和 71.3% 。除了夏季的马尾松外,弹尾目占总个体数的比例 (C/T) 不论在林地间还是季节间变化都非常大。总体而言,不同季节的 C/T 都以马尾松群落内最高;而季节之间比较, C/T 又都在夏季达到最大值,特别是夏季的马尾松群落内 C/T 高达 66.5% (表 1)。显然,由螨类和弹尾目构成的小型节节肢动物是节节肢动物的主体,两类动物合计占节节肢动物总数的 $80.0\% \sim 90.1\%$ 。

双翅目幼虫占节节肢动物总个体数的比例变化较大,如在春季小叶栎群落中达 30.0% ,而在春季马尾松、夏季小叶栎和秋季木荷群落中不足 1% ,但多数情况下属于常见种 ($1\% \sim 10\%$)。其它可以归为常见种的还有膜翅目和鞘翅目幼虫;偶尔成为常见种的有鳞翅目幼虫、鞘翅目、缨翅目和蜚蠊目;至于啮目、蜘蛛目、等翅目、唇足纲、半翅目、综合目、直翅目、同翅目、双尾目、原尾目及倍足纲等属于罕见种 (1% 以下)。

探讨群落组成时,不能忽视捕食者的作用。为此,将典型的大型节节肢动物捕食者唇足纲(蜈蚣)与蜘蛛目(蜘蛛)的个体数相加获得捕食者数量的粗略结果(表 1),表明林地间捕食者数量差异很明显。不论哪个季节,小叶栎都显著高于其它林地 ($P<0.05$),混交林与木荷比较接近,马尾松林地基本上都是最低的。

2.2 不同林地土壤节节肢动物群落多样性的差异及季节动态

表 2 是 4 种多样性指标的计算结果。从节节肢动物群落的丰富度指数 (d) 来看,总体上以小叶栎为最高,而马尾松最低。不同季节样地间 d 值的差异以春季最为明显,其中小叶栎显著高于木荷和马尾松 ($P<0.05$),混交林比小叶栎稍低,但显著高于马尾松,而秋季林地间 d 值基本无差异。不同林地 d 值的季节平均值与类群数的分异趋势一致,以小叶栎 (1.68) 最高,马尾松最低 (1.20),木荷与混交林接近 (分别是 1.48 和 1.59),处于中间。

除了夏季外,各林地节节肢动物群落的香农指数 (H) 差异不明显(表 2)。小叶栎、木荷和混交林 H 的季节平均值也相差甚微 (H 分别是 $1.73、1.70$ 和 1.71),而马尾松较低 ($H=1.56$)。群落的 Pielou 均匀度指数 (J) 与 H 的变化趋势基本一致,林地之间均未达到显著差异 ($P<0.05$)。

相比之下,林地间节节肢动物群落的密度-类群指数 (DG) 差异最为明显(表 2),尤其是在春季各林地间的差异都达到显著水平 ($P<0.05$)。各个季节不同林地 DG 指数也与类群数的变化次序相近,都是小叶栎林显著最高 ($P<0.05$),混交林、木荷的 DG 指数相近,马尾松的 DG 指数在春夏两季都低于混交林与木荷,到了冬季反而高出后两者,但未达到显著性差异 ($P<0.05$)。至于 DG 指数的季节平均值,仍以小叶栎最高 (8.27),马尾松最低 (3.58),而木荷与混交林居中 (分别是 3.87 和 3.98)。

2.3 节节肢动物群落的聚类与排序

分别采用层次聚类分析与典型鉴别分析对样地节节肢动物群落的异同进行综合比较。图 1 是聚类分析的结果,木荷与混交林地的节节肢动物群落最相似,二者与马尾松的距离较远,因而与后者属于一般相似;非常明显的是,小叶栎与其它群落几乎没有相似性,自成一类。

将以上描述节节肢动物群落特征的指标,包括类群数、个体数、捕食者、丰富度指数 d 、香农指数 H 、均匀度指数 J 和密度-类群指数 DG 共 7 个指标,作为变量进行鉴别分析,由鉴别变量值得出散点图(图 2)。在图 2 中,鉴别函数 1 轴代表了 DG 指数的影响,解释方差为 90.8% ,鉴别函数 2 轴代表了 d 的影响,解释方差为 9.2% 。另外,鉴别函数 1、2 的值越大,则林地节节肢动物群落的多样性越高。由此,将节节肢动物群落分为 3 组,与前述聚类分析的结果一致,其反映的多样性顺序是小叶栎 > 混交林 > 木荷 > 马尾松。

表 1 4 种林地土壤节肢动物群落组成

Table 1 The composition of soil arthropod communities in four kinds of artificial woodlands (No./m²)

动物类群 Faunal groups	春 Spring				夏 Summer				秋 Autumn				冬 Winter			
	Qc ^①	Ss ^①	Pm ^①	Sm ^①	Qc	Ss	Pm	Sm	Qc	Ss	Pm	Sm	Qc	Ss	Pm	Sm
1 寄螨目 Parasiformes	594	483	476	302	110	72	47	67	100	86	157	69	122	57	60	25
2 真螨目 Acariformes	2382	3297	1289	1770	962	302	869	852	2438	662	859	495	2603	818	1488	374
3 弹尾目 Collembola	37	19	456	62	192	58	2161	70	175	39	74	38	115	77	137	22
4 双翅目幼虫 ^② Diptera	1471	88	16	231	45	20	112	8	405	44	65	27	110	57	92	10
5 膜翅目 Hymenoptera	55	18	10	44	36	15		19	74	15	49	4	61	40	57	39
6 鳞翅目幼虫 ^③ Lepidopera	68	43	12	24	24	27	21	17	70	18	11	11	17	28	12	14
7 鞘翅目幼虫 ^④ Coleoptera	75	67	27	34	18	46		46		12	4		6	19	24	5
8 鞘翅目 Coleoptera	132	70		42	13	41		40	24	17		8	22	8	14	8
9 缨翅目 Thysanoptera	10		128	8	8		28		38	16	41	4	52	6	16	15
10 唇足纲 Chilopoda	21	12	4	3	10	3	4	5	17	4	4	8	31	14	4	4
11 蛞蝓目 Psocoptera	8	33	4	35					20	9	4	6				4
12 蜚蠊目 Blattoptera	6	5	6	28	20	19		18	7	8		7	10	4	8	4
13 蜘蛛目 Araneae	8	4	6	15	12	7	16	9	7	5	5	6	11	9	2	12
14 半翅目 Hemiptera	5	18	1	8					2	13	4	7	6	4		5
15 等翅目 Isoptera	3								20	24		8	8	8		
16 综合纲 Symphyla	8	4		7							4					
17 直翅目 Orthoptera	6				2		3									
18 双尾目 Diplura	4			3	5	3		4								
19 原尾纲 Protura	2			1				16	5			8				
20 倍足纲 Diplopoda	5	40	4													
21 其他 Others	6	6	5	5	30	16	20	16	13	7	7	6	8	4	8	7
类群数 Group numbers	21	16	15	18	15	13	10	14	16	16	13	16	15	15	13	15
总个体数 Total individuals	4903	4124	2431	2544	1471	621	3251	1155	3373	909	1277	671	3130	1153	1892	525
A/T ^⑤ (%)	60.7	91.7	72.6	81.4	72.9	60.2	28.2	77.4	75.2	82.3	79.6	84.1	87.1	75.9	81.8	76.0
C/T ^⑤ (%)	0.75	0.46	18.8	2.44	13.1	9.30	66.5	5.90	5.19	4.32	5.79	5.66	3.74	6.70	7.24	4.19
捕食者 ^⑤ Predators	30	12	6	14	20	10	7	12	21	4	7	7	30	4	2	12

① Qc 小叶栎 *Quercus chenii*; Ss 木荷 *Schima superba*; Pm 马尾松 *Pinus massoniana*; Sm 混交林 *Schima superba-Pinus massoniana* mixed forest. 以下同 The same as below. ② 幼虫 larva. ③ 螨类占节肢动物总个体数的比例 Mites numbers/ Total individuals. ④ 弹尾目占节肢动物总个体数的比例 Collembela numbers/ Total individuals. ⑤ 唇足纲(蜈蚣)与蜘蛛目数量之和 Summation numbers of *Chilopoda* (centipedes) and *Araneae* (spiders)

表 2 4 种林地节肢动物群落多样性指数

Table 2 Diversity indices of arthropod communities under four kinds of artificial woodlands

	春 Spring				夏 Summer				秋 Autumn				冬 Winter			
	<i>d</i> ^{a)}	<i>H</i> ^{b)}	<i>J</i> ^{c)}	<i>DG</i> ^{d)}	<i>d</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>DG</i>	<i>d</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>DG</i>	<i>d</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>DG</i>
Qc	1.99a ^①	2.01a	0.49a	9.76a	1.61a	1.90ab	0.52ab	6.63a	1.60a	1.77a	0.47a	8.91a	1.50ab	1.25a	0.34a	7.76a
Ss	1.40bc	1.32a	0.36a	4.33d	1.67a	2.52a	0.71a	4.52b	1.54a	1.65a	0.47a	4.04b	1.32ab	1.30a	0.39a	2.52b
Pm	1.37c	1.82a	0.52a	2.99c	0.84b	1.35b	0.46b	3.25b	1.41a	1.79a	0.53a	3.64ab	1.17b	1.27a	0.39a	4.44b
Sm	1.86ab	1.89a	0.48a	6.04b	1.48a	1.72b	0.49b	4.11b	1.37a	1.48a	0.45a	2.45c	1.64a	1.74a	0.50a	3.32b

a) 丰富度指数 Marglef index. b) 香农指数 Shannon-Wiener index. c) 均匀度指数 Pielou index; d) 密度-类群指数 Density-Group index. ① 列中若字母相同,表明差异不显著 ($P<0.05, n=5$, 邓肯法) In a column, means with the same letters are not significantly different at $P<0.05$ by Duncan method, $n=5$

2.4 描述节肢动物群落特征指标的评价及筛选

对描述节肢动物群落特征的 7 个指标进行主成分分析,获得 2 个特征值大于 1 的公因子,共解释总方差的 82.39%。主成分分析采用的是相关矩阵,因此主成分负载图(图 3)上彼此靠近的指标相互间存在较高的正相关关系,如类群数、DG 指数、捕食者数、*d* 相互之间高度正相关 ($P<0.01$),个体数与类群数、

捕食者数、*DG* 指数之间、*J* 和 *H* 之间高度正相关 ($P < 0.01$); 而负载图上彼此远离并对应的指标表现出负相关, 如个体数与 *J*、*H* 高度负相关 ($P < 0.01$)。从图 3 中也可以发现, 在公因子 1 和 2 上, 各指标的负载值都较高。可见, 所选指标彼此间相关性较强, 提供了较多的重复信息。

为此, 借助鉴别分析对 7 个指标进行进一步筛选, 以便得到最能区分林地节肢动物群落的指标, 分析步骤同 2.3。采用逐步鉴别方法得到了 2 个具有统计意义的鉴别函数 y_1 和 y_2 , 由于函数 y_1 对方差的解释 (90.8%) 远高于 y_2 (9.2%), 具有足够的代表性, 因此只保留 y_1 。鉴别函数 $y_1 = -0.517(d) + 1.214(DG)$, 上式中 d 和 DG 的结构系数分别是 0.199、0.909, DG 的标准化鉴别系数和结构系数都远大于 d , 所以 DG 是区分林地节肢动物群落的最有效指标。结合主成分分析的结果, DG 在因子 1 上的正负载很高, 仅略低于类群数 (图 3), 具有较高的代表性, 因此 DG 指数是反映节肢动物群落特征的最好指标。

3 讨论

20 世纪 80 年代后期, 国内对亚热带森林生态系统土壤动物群落进行了较为系统的调查研究, 获得的节肢动物类群数介于 17~23 个 (安徽九华山 21~23 个、浙江天目山 21 个、湖南衡山 17 个、湖南岳麓山 19 个、广东鼎湖山 21 个) [10,13~15]。本研究土壤节肢动物的类群为 10~21 个, 一般低于上述林地生态系统, 节肢动物的总个体数也较少。这可能是由于在退化红壤上人工林恢复只有 10a 时间, 且林种单一。但本调查中螨类和弹尾目仍是节肢动物群落的主体, 与大部分研究结果相一致。

弹尾目数量及其占节肢动物的比例一般以马尾松林地最高, 尤其是在夏季呈爆发性增长, 可能有以下 3 个原因: ①弹尾目的食物来源主要为真菌 [16,17], 而马尾松针叶的分解利于真菌数量的增加 [18]; ②夏季马尾松林地小型捕食者寄螨目 (观察发现寄螨对弹尾虫有强烈的取食作用) 数目为一年最低值, 捕食压力减少也可使弹尾目数量增加; ③几乎每年夏季马尾松林均有松毛虫害发生, 落叶和虫粪为弹尾目这类发育世代短、取食速率高的 *r*-对策者 [8] 的激增提供了便利。与弹尾目相比, 同属小型节肢动物的真螨目取食速率低、世代较长, 对环境有较强的适应能力, 数量较为稳定。

捕食者数量虽少, 但处于营养级的顶部, 在调控群落结构等方面有重要的生态功能 (“下行效应”)。经过 10a 的恢复, 4 种林地的大型节肢动物捕食者数量有较为明显的分异, 说明不同人工林恢复措施对节肢动物群落的影响至少达到了 2 个营养级水平。由于捕食者与猎物的种数比例相当稳定 [19], 捕食者数量的增加意味着群落内部有更多种类与数量的猎物, 在小叶栎林地中大致反映了这种情况。

影响土壤节肢动物群落发展的因素有食物资源的数量、质量及栖息环境, 包括所处的大环境 (如地质年代、气候、地形等) 与小环境 (如植被决定的凋落物层和表层土壤性状)。就本研究而言, 凋落物为林地土壤生态系统有机物质的主要来源, 其数量和性质对节肢动物群落可能有决定影响 [20]。落叶阔叶林小叶栎凋落物数量多, 凋落物 P、K 含量最高, 又因凋落物层较厚, 表层土壤水分状况较好 (数据略), 利于节肢动物的发展, 其多样性最高; 常绿阔叶林木荷, 凋落物叶角质层厚, N、P、K 含量低于小叶栎, 与马尾松和混交

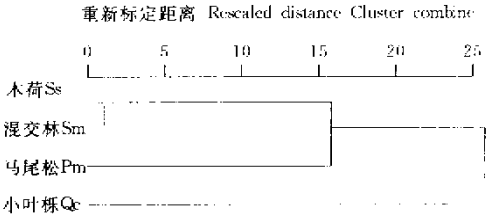


图 1 不同林地节肢动物群落聚类分析树状图
Fig. 1 Dendrogram of cluster analysis for arthropod communities under different woodlands

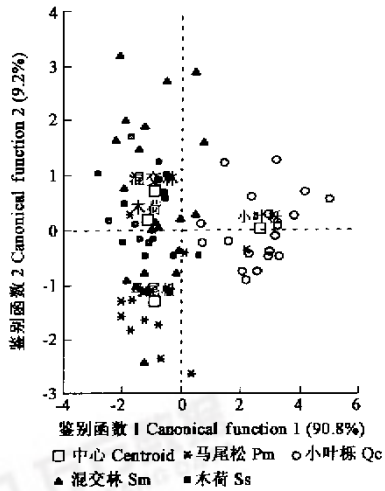


图 2 4 种林地节肢动物群落的鉴别分析分组图
Fig. 2 Plots of canonical variables for arthropod communities under four kinds of artificial woodlands

林相近,尽管凋落物层的遮荫保湿效果好,但凋落物较难分解,也不利于节肢动物的发展;而马尾松凋落物数量少、N、P、K 含量低,加上单宁物质的刺激性大大降低了适口性,节肢动物群落的多样性最低;由木荷和马尾松组成的混交林,尽管凋落物质量也较差(节肢动物群落的个体数季节平均值最低),但由于食物种类较丰富,节肢动物多样性仅低于小叶栎,体现了一定的混交优势。

节肢动物群落季节波动是水热条件与食物等因素综合作用的结果。退化红壤地区严重的水热不均,特别是夏季炎热干旱,既妨碍了人工林的恢复,也限制了节肢动物的发展。本研究中,群落季节波动明显,以温暖湿润的春季在一年中节肢动物群落类群和数量最多(马尾松例外),夏季节肢动物类群与数量总体上都较低,寒冷的冬季对节肢动物的影响不及夏季严重。在历经夏旱后,小叶栎类群数、个体数及 d 、 DG 指数上升,而木荷与混交林仅类群数与 d 升高;马尾松到了秋季类群数、个体数及 d 、 DG 指数全部下降。这是否说明小叶栎节肢动物群落的恢复能力较强尚不能肯定,究其原因可能是小叶栎秋季落叶,较多的凋落物利于动物越冬及春季恢复。

土壤动物多样性研究一直是被忽视的领域^[21],有关多样性的评价指标与方法发展缓慢。类群数与个体数简单而直观,但后者在体现群落差异方面效果较差^[22],二者也未考虑群落结构的变化。非常有价值的是与生态功能相联系的功能群指标,这在土壤线虫群落的研究上有非常成功的经验^[22,23],本研究群落间捕食者数量的显著差异也初步显示了这一点。借助多样性指数可以加深对复杂群落的理解,但遗憾的是,在其它领域应用广泛的 d 、 H 、 J 等在土壤动物多样性研究中并不完全适用。 d 较灵敏,仅考虑类群数与个体数两个因素,提供的群落信息具有一定的综合性,尤其小叶栎和马尾松之间 d 发生较为明显的分异,但它仍未重视群落结构,个体数的剧烈变动左右了结果。 H 和 J 在土壤动物群落多样性评价中也有较大的局限性^[13,24]。 H 至少有 4 个缺点:没有考虑生物量,没有隐含面积参数,没有表达丰富性,且需要分类单元个体数不小于 100^[25];本研究也表明, H 主要受群落内部物种分配的均匀性影响,它与 J 都不能区分群落间的多样性差异(参见表 2)。

值得注意的是 DG 指数,将各类群视为同等独立,可进行多群落间的比较。廖崇惠等^[30]首次运用 DG 指数研究不同人工林发育过程中土壤动物群落的次生演替,后来他们改进了 DG 指数的运算形式,在华南热带和南亚热带的土壤动物群落研究中应用效果良好^[13,15,24],但该指数至今未得到广泛应用。 DG 指数虽然可能存在如下缺点:牺牲了优势种的数量信息,夸大了稀有种地位,也未涉及生物量,实际上也是对类群数的偏重,但是,由于在生态系统恢复过程中节肢动物的稀有种逐渐出现,其数量虽少,但个体大小及生物量比常见的螨类等大得多,因此 DG 指数也隐含了群落的其它信息。本文借助多元统计分析(主成分分析和鉴别分析),首次证明了 DG 指数不但对常用的群落特征指标具有很高的代表性,而且最能区分不同林地节肢动物群落的差异。实际上,图 2 主要是 DG 指数影响的产物,与上述方差分析和聚类分析结果的一致性也说明了该指数的应用潜力。鉴于此,认为 DG 指数值得高度重视。

多元统计分析对归纳含有大量类群、个体的完整数据、了解群落整体间的异同非常有用^[23,26],其作为土壤动物群落研究数据有力工具正为更多的研究者所认同。本研究中,聚类分析和鉴别分析都能够将 4 种人工林节肢动物群落的异同清楚地表现出来,有助于群落整体特征的深入刻画。

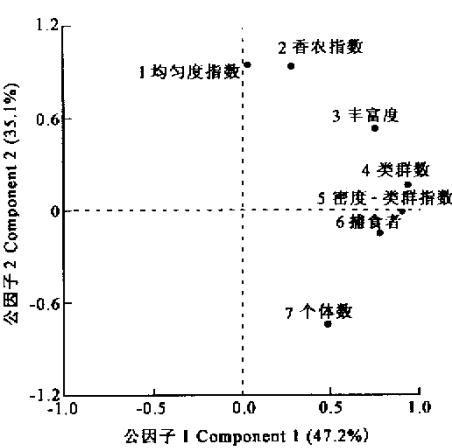


图 3 各指标的主成分分析因子负载图
Fig. 3 Loading plots of principal component analysis for all arthropod communities indices
1. Pielou index, 2. Shannon-Wiener index, 3. Marglef index, 4. Group number, 5. Densitg-Group index, 6. Predators, 7. Ind. number

参考文献

- [1] Zhao Q G(赵其国). Degradation problems of red soil in China. *Soils*(in Chinese)(土壤), 1995, **27**(6): 281~285.
- [2] Shi H(石 华), Zhao Q G(赵其国), Wang M Z(王明珠), *et al.* Study on the comprehensive improvement techniques of red soil ecological system and sustained development of agriculture. In: Wang M Z(王明珠), Zhang T L(张桃林), He Y Q(何圆球) eds. *Research on Red Soil Ecosystem III* (in Chinese)(红壤生态系统研究, 第三集). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 1995. 1~27.
- [3] Wu Z D(吴志东), Peng F Q(彭福泉), Che Y P(车玉萍), *et al.* Characteristics of the biological material cycling of several types of artificial forests and their influences on soils in south subtropical China. *Acta Pedologica Sinica* (in Chinese)(土壤学报), 1990, **27**(3): 250~261.
- [4] Yang Y S(杨玉盛), He Z M(何宗明), Lin G Y(林光耀), *et al.* Effects of different harness measures on Latertic red soil fertility in Southeast coast of Fujian. *Acta Phytocologica Sinica*(in Chinese)(植物生态学报), 1998, **22**(3): 281~288.
- [5] Yang Y S(杨玉盛), He Z M(何宗明), Qiu R H(邱仁辉), *et al.* Effects of different recover and restoration measures on plant diversity and soil fertility for serious degradation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 1999, **19**(4): 490~494.
- [6] Lavelle P. Faunal activities and soil process: Adaptive strategies that determine ecosystem function. In: *Transaction of International Congress of Soil Science*(Mexico) Vol. 1: 189~220.
- [7] Seastedt T R. The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Ann. Rev. Entomol.*, 1984, **29**: 25~46.
- [8] Moore J C and Walter D E. Arthropod regulation of micro- and mesobiota in below-ground detrital food webs. *Ann. Rev. Entomol.*, 1988, **33**: 419~439.
- [9] Van Straalen N M. Community structure of soil arthropods as bioindicator of soil health. In: Pankhurst C, Doube B M and Gupta V V S R ed. *Biological indicators of soil health*. CAB International. 1997. 235~264.
- [10] Yin W Y(尹文英) ed. *Chinese Sub-tropical Soil Animal*(in Chinese). Beijing: Science Press. 53~72. 1992.
- [11] Yin W Y(尹文英) ed. *Pictorial keys to soil animals of China*(in Chinese). Beijing: Science Press. 90~106. 1998.
- [12] Sun R Y(孙儒泳), Li B(李博), Zhu G Y(诸葛阳), *et al.* General Ecology. Beijing: Higher Education Press. 1993.
- [13] Liao C H(廖崇惠), Li J X(李健雄) and Huang H T(黄海涛). Soil animal community diversity in the forest of the Southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 1997, **17**(5): 549~545.
- [14] Lu Y C(路有成), Wang Z Y(王宗英). Vertical distribution of soil animal on the Jiuhua Mountain. *Geographical Research*(in Chinese)(地理研究), 1994, **13**(2): 74~81.
- [15] Yin W Y(尹文英) ed. *Soil Animals of China*(in Chinese). Beijing: Science Press. 2000. 77~100.
- [16] Verhoef H A and de Goede R G M. Effects of collembolan grazing on nitrogen dynamics in a coniferous forest. In: Fitter A H ed. *Ecological interactions in Soil*. Oxford: The British Ecological Society. 1985. 367~376.
- [17] Larink O. Springtails and mites: Important knots in the food web of soils. In: Benckiser G. *Fauna in soil ecosystems: Recycling process, nutrient fluxes, and agriculture production*. New York: Marcel Dekker, Inc. 1997. 225~264.
- [18] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. London: Blackwell Scientific Publications. 1979.
- [19] Cai X M(蔡晓明). *Ecosystem Ecology*(in Chinese). Beijing: Science Press. 2000. 131~135.
- [20] Anderson J M. Inter- and intra-habitat relationships between woodland Cryptostigamata species diversity and diversity of soil and litter microhabitats. *Oecologia*, 1978, **32**: 341~348.
- [21] Copley J. Ecology goes underground. *Nature*, 2000. **406**: 452~454.
- [22] Hu F, Li H X and Wu S M. Differentiation of soil fauna populations in conventional tillage and no-tillage red soil ecosystems. *Pedosphere*, 1997, **7**(4): 339~348.
- [23] Freckman D W, Ettema C H. Assessing nematode communities in agroecosystems of varying human intervention. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 1993, **45**: 239~261.
- [24] Liao C H(廖崇惠), Chen M Q(陈茂乾). Secondary succession of soil animal community in tropical artificial forest. *Chin. J. Appl. Ecol.* (in Chinese)(应用生态学报), 1990, **1**(1): 53~59.
- [25] Yue T X(岳天祥). Studies on models for biodiversity. *Journal of Natural Resources*(in Chinese)(自然资源研究), 1999, **14**(4): 377~380.
- [26] Hodda M. Cluster analysis of marine nematodes. *Nematologica*, 1986, **32**: 419~438.