

西江流域亚热带常绿阔叶林土壤动物群落特征与
环境因子的关系

叶 岳, 刘文华*

(肇庆学院, 广东 肇庆 526061)

摘 要:对西江流域生态系统进行健康评价、管理,为生态地理研究提供土壤动物学资料。选取西江流域内 6 个地区近 1 a 的生境常绿阔叶林情况,采用 DCA 和数理统计学方法选择线性模型的 RDA 冗余度,并进一步分析确定土壤动物群落分布与环境因子之间的关系。结果表明,6 个地区土壤中存在 1 750 只大型土壤动物,分别隶属 2 门 6 纲 13 类,蚁科受到速效 P、K 影响较大,蛴螬目、拟步甲科幼虫受到土壤温度影响较大,而等足目、鞘翅目幼虫受到土壤含水量和土壤容重影响较大,蚯蚓类受到土壤含水量、土壤容重和土壤温度影响较大,马陆受到土壤有机质影响较大。土层是影响西江流域(肇庆市段)大型土壤动物分布的因素,土壤因子对研究区主要大型土壤动物的分布有重要影响。

关键词:西江流域;大型土壤动物;群落结构;多样性;分布;土壤因子

中图分类号:S714.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0029-07

Relationship Between the Community Characteristics of Soil Macrofauna and
Environmental Factors in Xijiang River Basin (Zhaoqing Section)

YE Yue, LIU Wen-hua

(Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, Guangdong, China)

Abstract: The objectives of this study were to evaluate and manage the ecosystem health of Xijiang River Basin to provide soil zoology data for ecological restoration research. The habitats of the evergreen broad-leaved forests occurring in six regions in the Xijiang River Basin in the past year were taken as the research objects. The RDA redundancy of the linear model was determined by using DCA and mathematical statistical method. The relationship between the distribution of soil animal communities and environmental factors were further analyzed and determined. It was found that there existed 1 750 macro soil faunas, belonging to 2 phyla, 6 classes and 13 categories. Formicidae was greatly affected by the available phosphorus and potassium, the larvae of Selenide and Pseudocriminal were greatly affected by the soil temperature, while the larvae of the Isopoda and Coleoptera were greatly affected by the soil water content and soil bulk density, and the earthworms were greatly affected by the soil water content, soil bulk density and soil temperature. Malu was greatly affected by soil organic matter. The results indicated that the soil layer plaid important rule in the distribution of soil macrofauna, and the relative soil factors presented significant influences on the distribution in the study area.

Key words: Xijiang River Basin; soil macrofauna; community structure; diversity; distribution; soil factor

广东省进入城市化高速发展阶段,尤其在珠江三角洲地区,城市化极速发展过程,已成为引发土壤

收稿日期:2020-07-11 修回日期:2020-12-02
基金项目:国家自然科学基金:多巴胺 D4 受体基因多态性变异体通过 PSD-95 调节 NMDA 受体功能的研究(31271124)。
作者简介:叶 岳,硕士,讲师。研究方向:动物生态学。E-mail:d266s0@163.com
* 通信作者:刘文华,博士,教授。研究方向:生物化学与分子生物学等。E-mail:wenhualaw@126.com

侵蚀的重要人为因素之一。西江流域是国家战略珠江-西江经济带的重要组成部分,是珠三角地区的生态屏障。长期以来,人类活动导致水土流失严重,航道缩短,洪水、旱灾、病虫害已成为西江流域的主要灾难^[1]。水土保持和生态恢复工作是实现可持续发展的关键环节。土壤动物作为土壤生态系统中最活跃的组成部分,其群落结构、多样性与生态分布会随生态环境的变化而改变^[2-3];大型土壤动物是生态系统中种类繁多、数量巨大的一个类群,作为陆地生态系统中重要的消费者和分解者,在分解生物残体、改变土壤物理化学性质及土壤生态系统物质循环和能量流动中起着重要的作用^[4],同时间接调控地表植物群落的结构、功能和演替^[4]。土壤动物可以稳定、综合的响应各环境因子的变化,并具有一定的生物指示作用^[5]。因此,对环境中的土壤动物特征调查研究具有重大意义。

由于环境水热条件等的不同,同纬度地区耕地生境土壤动物也会发展出不同特征,如土壤动物密度、多样性等特征受气候等因子的调节而存在差异,这些差异进而对耕地生态系统产生影响。因为雨水情况变化、人类生产生活的滋扰、重金属的过度排放等导致农田污染对土壤动物的干扰,目前学者们对西江流域研究主要集中在干旱、土壤重金属、植被等^[6-8]方面,其中对森林生态系统的大型土壤动物的群落分布特征研究调查较多,但对广东省内西江流域土壤动物方面鲜有研究,因此,考察西江流域亚热带常绿阔叶林土壤动物群落特征具有重要意义。

为此,选取接壤广西的肇庆市段西江流域 6 个生境作为研究对象,旨在对土壤动物群落分布与环境因子之间的关系进一步分析,为西江流域生态系统的健康评价、管理及水土保持与生态恢复研究提供土壤动物学依据。

1 材料与方法

肇庆市属广东省西部地区,位于 22°47′—24°24′N、111°21′—112°52′E,属于热带、亚热带湿润季风气候区,土壤每年气温为 21.5℃,每年的降水量达 1 800 mm,该市是广东省主要林区之一^[9]。处于亚热带季风气候区,地带性植被为亚热带常绿阔叶林,本研究选取的生境 1(鼎湖山)、生境 2(七星岩)、生境 3(北岭山)、生境 4(九龙湖)、生境 5(羚羊峡)、生境 6(黑石顶),从地理纬度上来看,都属于亚热带常绿阔叶林,这些分布区的气候四季分明,年均温在 15℃以上,一般不超过 22℃。冬季温暖,最冷月平均温度不低于 0℃;夏季炎热潮湿,最热月平均温度为 24℃~27℃。年降水量>1 000 mm,主要集中在

夏季。由于雨热同期,特别有利于植被的发育。冬季降雨虽少,但不存在明显的旱季。相对湿度平均为 75%~80%,蒸发量<降水量,全年都比较湿润。常绿阔叶林主要由壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)、木兰科(Magnoliaceae)等组成(表 1),以上 4 个科也可以作为常绿阔叶林的一个重要标志。常绿阔叶林种类丰富,我国亚热带常绿阔叶林中有维管束植物 1 000 多种。土壤为红壤、黄壤或黄棕壤。亚热带常绿阔叶林中动物物种丰富,两栖类、蛇类、昆虫、鸟类等是主要的消费者。本研究中除生境 6(黑石顶)设置在肇庆封开,其余生境设置在端州,端州是肇庆的府城,是西江与东江、北江交汇的前站^[10]。

1.1 采样时间和采样方法

采样时间:2017 年 7 月—2018 年 5 月。样品采集于 2017 年 7 月(样品 1)、10 月(样品 2)、1 月(样品 3)和 4 月(样品 4)。采样方法:为了保证数据可比性,在相同采样时间段内,按“Z”字形在 6 个地点(生境)的中心区域采取等取样法选择 5 个样方(在样方内设 3 个重复,样方面积 30 m×30 m),分别按土层 0~5、5~10、10~15 cm 取样,面积为 25 cm×25 cm,每个生境 5 个点 3 个深度,6 个生境合计 1 080 个样品。大型土壤动物采用国际通用的手拣法采集:70%的酒精杀死固定,带回室内分类鉴定。大型土壤动物的分类和统计主要采用尹文英^[11]的方法,室外统计个体数量,室内鉴定到目或科。

1.2 数据处理

Shannon-Wiener 多样性指数公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

均匀性指数公式 $e = H' / \ln S$

优势度指数公式 $c = \sum (n_i / N)^2$

Margalef 丰富度指数公式: $D = (S - 1) / \ln N$ 。

$P_i = n_i / N$

式中, P_i 为第 i 类群或物种的个体数量占土壤动物总数的比率; n_i 为生境点样区内第 i 个类群的个体数量; S 为样区内总类群数目; N 为样区内所有物种的个体数量,以上统计单位均以生境点“样方”为单位统计。

数据统计分析使用 SPSS19.0 和 Canoco4.5,利用单因素和多因素方差分析分别对土壤动物平均密度和多样性指数特征的差异性进行检验,采用 LSD 和 S-N-K 法(方差齐性)和 Games-Howell 法进行多重比较分析。做图采用 origin8,采用 DCA 分析确定排序轴的梯度长度^[12]。

土壤理化性质(有机质、铵 N、速效 P、速效 K 和

pH 值)通过仪器顺龙(型号 sl2c2)处理土样所得,而土壤容重和土壤含水量通过环刀法和铝盒法计算。土壤类群等级划分:个体数量大于捕获总量的 10.0%以上者为优势类群(+++),占 1.0%~10.0%者为常见类群(++),不足 1.0%者为稀有类群(+).

表 1 生境自然环境特征概况

Table 1 Overview of natural environment characteristics of 6 habitats

	生境 1	生境 2	生境 3	生境 4	生境 5	生境 6
林冠盖度/%	64	76	64.75	49.50	62.05	64
凋落物厚度/cm	1.3	1.75	1.1	0.95	0.74	0.7
土壤质地	砂壤土	砂壤土	壤土	砂土	砂土	砂壤土
植物特征 主要乔木:	荷木 (<i>Schima superba</i>)、三桠苦 (<i>Evdodia lepta</i>)	构树 (<i>Broussonetia papyrifera</i>)、黄牛木 (<i>Cratoxylum cochinchinense</i>)、小叶榕 (<i>Ficus concinna</i>)、大叶桂樱 (<i>Prunus zipeliana</i>)	红椎 (<i>Castanopsis hystrix</i>)、大叶桂樱、石栎 (<i>Lithocarpus glaber</i>)	大叶桂樱、女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i>)、黄杞 (<i>Engelhardia roxburghiana</i>)	红椎、红花羊蹄甲 (<i>Bauhinia blakeana</i>)、中华杜英 (<i>Elaeocarpus chinensis</i>)、大叶紫薇 (<i>Lagerstroemia speciosa</i>)	荷木、黄果厚壳桂 (<i>Cryptocarya concinna</i>)、黄叶树 (<i>Xanthophyllum hainanense</i>)
主要灌木:	海桐 (<i>Pittosporum tobira</i>)、九节 (<i>Psychotria rubra</i>)、鹅掌柴 (<i>Schefflera octophylla</i>)、玉叶金花 (<i>Mussaenda pubescens</i>)	红千层 (<i>Callistemon rigidus</i>)、九节 (<i>Psychotria rubra</i>)	粗叶榕 (<i>F. hirta</i>)、野牡丹 (<i>Melastoma candidum</i>)、鹅掌柴	鹅掌柴、茜树 (<i>Aidia cochinchinensis</i>)、滨木患 (<i>Arytera littoralis</i>)、杜茎山 (<i>Maesa japonica</i>)	九节、小槐花 (<i>Ohwia caudata</i>)、鹅掌柴、粗叶榕	乌冈栎 (<i>Quercus phillyreoides</i>)、疏花卫矛 (<i>Euonymus laxiflorus</i>)、朱砂根 (<i>Ardisia crenata</i>)、毛冬青 (<i>Ilex pubescens</i>)
主要草本:	江南星蕨 (<i>Microsorium fortunei</i>)、金毛狗 (<i>Cibotium barometz</i>)、芒萁 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、乌毛蕨 (<i>Blechnum orientale</i>)	南美蟛蜞菊 (<i>Sphagneticola trilobata</i>)、刺齿半边旗 (<i>Pteris dispar</i>)	铁线蕨 (<i>Adiantum capillus</i>)、芒箕 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)、榭蕨 (<i>Drynaria roosii</i>)	板蓝 (<i>Strobilanthes cusia</i>)、蕨 (<i>Pteridium aquilinum</i>)、石柑子 (<i>Pothos chinensis</i>)、金毛狗 (<i>Cibotium barometz</i>)、芒箕 (<i>Dicranopteris dichotoma</i>)	牛白藤 (<i>Hedyotis hedyotideae</i>)、蕨 (<i>Pteridium aquilinum</i>)、钩腺大戟 (<i>Euphorbia sieboldiana</i>)、乌毛蕨	蕨、剑叶耳草 (<i>Hedyotis caudatifolia</i>)、铁线蕨、卷柏 (<i>Selaginella tamarriscina</i>)

2 结果与分析

2.1 生境大型土壤动物的群落结构

6 个生境共捕获 1 750 只大型土壤动物,平均密度为 155.56 只·m⁻²,分别隶属于 2 门 6 纲 13 类(表 2)。优势类群是蚯蚓类(35.09%)、马陆(12.63%)和蚁科(35.60%)3 类,占总捕获数的 83.31%,常见类群是等足目(1.83%)、蜈蚣目(3.37%)、拟步甲幼虫(1.14%)、鞘翅目幼虫(8.23%)4 类,占总捕获数的 14.57%,稀有类群是蜘蛛目(0.34%)、蛭蚓目(0.46%)、蜚蠊目(0.11%)、蟋蟀总科(0.11%)、金龟甲科(0.23%)、鞘翅目成虫(0.86%)6 类,占总捕获数的 2.11%。由此可见,蚯蚓类、马陆和蚁科 3 类大型土壤动物构成各生境土壤生态系统的重要组成成分。

从生境 1(112°31'E,23°10'N)到生境 6(111°50'E,23°26'N),类群数顺序为:生境 3(12 目)>生境 1(10 目)>生境 2(9 目)=生境 4(9 目)=生境 5(9 目)=生境 6(9 目),个体密度顺序为:生境 2(41.69 只·m⁻²)>生境 3(41.16 只·m⁻²)>生境 5(21.16 只·m⁻²)>生境 4(19.82 只·m⁻²)>生境

6(17.96 只·m⁻²)>生境 1(13.78 只·m⁻²)。蛭蚓目仅出现在北岭山。

因类群在部分土层中没有发现,所以仅对不同土层大型土壤动物平均密度进行多因素方差分析。结果表明,仅土层对大型土壤动物平均密度具有显著性的影响($F=13.937,P=0.000$),因此,后面在分析土壤动物群落结构垂直分布的同时也分析多样性。

2.2 土壤动物水平分布及多样指数动态

土壤动物类群最多的是生境 3(12 目),最少的是生境 2(9 目)、生境 4(9 目)、生境 5(9 目)、生境 6(9 目);平均密度最大的是生境 2(41.69 只·m⁻²),最小的则是生境 1(13.78 只·m⁻²)。

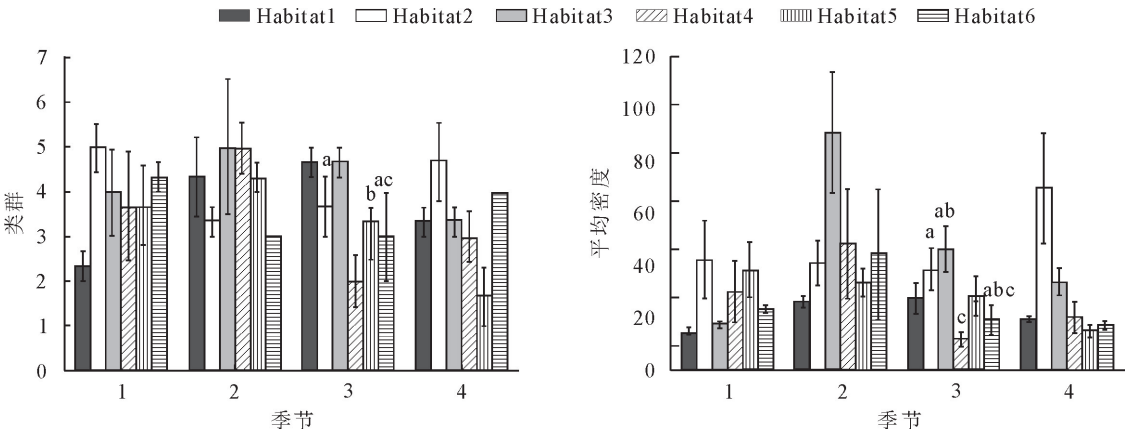
由图 1 可知,6 个生境大型土壤动物类群数和平均密度在季节的动态变化,春季类群数的顺序为:生境 2>生境 6>生境 3>生境 4=生境 5>生境 1;平均密度的顺序为:生境 2>生境 5>生境 4>生境 6>生境 3>生境 1。夏季类群数的顺序为:生境 3=生境 4>生境 1=生境 5>生境 2>生境 6;平均密度的顺序为:生境 3>生境 4>生境 6>生境 2>生境 5>生境 1。秋季类群数的顺序为:生境 1=生境 3>生境 2>生境 5>生境 6>生境 4;平均密度的顺

序为:生境 3>生境 2>生境 5>生境 1>生境 6>生境 4。冬季类群数的顺序为:生境 2>生境 6>生境 1=生境 3>生境 4>生境 5;平均密度的顺序为:生境 2>生境 3>生境 4>生境 1>生境 6>生境 5。

表 2 大型土壤动物类群组成和数量

Table 2 Composition and number of soil macrofauna

类群	生境 1 个体数	生境 2 个体数	生境 3 个体数	生境 4 个体数	生境 5 个体数	生境 6 个体数	总个体数	多度
蚯蚓类	71	68	292	31	104	48	614	+++
蜘蛛目	1	2	1	1	1	0	6	+
等足目	7	6	5	1	10	3	32	++
马陆	39	161	2	15	2	2	221	+++
蛐蜒目	0	0	8	0	0	0	8	+
蜈蚣目	5	9	8	8	6	23	59	++
蜚蠊目	0	0	1	0	0	1	2	+
蟋蟀总科	1	0	1	0	0	0	2	+
金龟甲科	1	0	3	0	0	0	4	+
拟步甲幼虫	5	1	3	6	4	1	20	++
鞘翅目成虫	0	8	0	2	3	2	15	+
鞘翅目幼虫	14	56	54	4	12	4	144	++
蚁科	11	158	85	155	96	118	623	+++
总数	155	469	463	223	238	202	1 750	



注:1. 春季;2. 夏季;3. 秋季;4. 冬季。不同小写字母表示不同土层大型土壤动物类群数、平均密度具有显著差异。下同。

图 1 不同生境大型土壤动物类群数和平均密度动态比较(平均值±标准误)

Fig. 1 Dynamic comparison of the number and average density of soil macrofauna in different habitats(mean±SE)

对同一季节不同生境大型土壤动物类群数和平均密度进行单因素方差分析结果显示,仅秋季部分生境类群数和平均密度存在差异性。分别为:类群数生境 2 和生境 5 有显著性差异($P<0.05$),生境 5 和生境 6 有显著性差异($P<0.05$);平均密度生境 2 和生境 4,生境 3 和生境 4,生境 3 和生境 6 存在显著性差异($P<0.05$)。

2.3 土壤动物垂直分布及多样指数动态

由图 2 可见,土层下大型土壤动物类群数存在差异性,而土层 0~5 cm 和 5~10 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 之间存在极显著性差异。对比不同的生境发现,在 0~5 cm 和 5~10 cm 下,生境 4 土壤动物类群数存在极显著差异 $P=0.007$ 。在 0~5 cm 和 10~15 cm 下,生境 2、5、6 土壤动物类群数存在极

显著差异 $P=0.007$,生境 1 和 2 平均密度存在显著性差异,在 5~10 cm 和 10~15 cm 下,生境 2 平均密度存在显著性差异。以上结果说明土层是影响西江流域(肇庆市段)大型土壤动物分布的重要因素。

由图 3 可知,6 个生境大型土壤动物多样性指数在土层的动态变化,生境 1 的 H' 和 c 顺序均为:0~5 cm=5~10 cm>10~15 cm; e 和 D 的顺序均为:5~10 cm>0~5 cm>10~15 cm。生境 2 的 H' 、 e 和 D 顺序均为:5~10 cm>0~5 cm>10~15 cm; c 的顺序为:0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm。生境 3 的 H' 和 e 顺序均为:10~15 cm>5~10 cm>0~5 cm; c 的顺序为:0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm; D 的顺序为:0~5 cm>10~15 cm>5~10 cm。生境 4 的 H' 和 D 顺序均为:0~5 cm>10~15

cm>5~10 cm;*e* 的顺序为:10~15 cm>0~5 cm>5~10 cm;*D* 的顺序为:5~10 cm>10~15 cm>0~5 cm。生境 5 的 *H'*和*e* 顺序均为:5~10 cm>0~5 cm>10~15 cm;*c* 的顺序为:10~15 cm>0~5 cm>5~10 cm。*D* 的顺序为:0~5 cm>5~10 cm>10~15 cm。生境 6 的 *H'*、*e* 和 *D* 顺序均为:5~10 cm>0~5 cm>10~15 cm;*c* 的顺序为:10~15 cm>0~5 cm>5~10 cm。

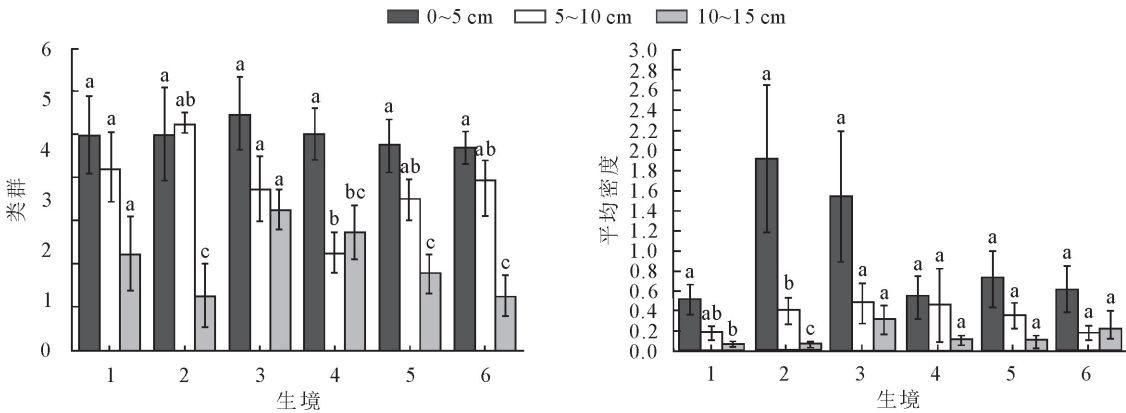


图 2 不同生境大型土壤动物类群、平均密度分布特征(平均值±标准误)

Fig. 2 Distribution characteristics of soil macrofauna and average density in different habitats(mean±SE)

2.4 大型土壤动物对土壤因子变化的响应

大型土壤动物与土壤之间有着密切的关系,因此土壤环境会在很大程度上影响土壤动物的分布特征^[13-14]。利用 Canoco4.5 对大型土壤动物和土壤因子进行 RDA 排序分析,采用置换次数为 999 的蒙特卡洛检验,排序结果见表 3。结果经蒙特卡洛检验第 1 排序轴不显著($F=3.098,P=0.257$),而全排序轴显著($F=1.560,P=0.042$),故 RDA 排序结果是可信的。

表 3 土壤因子与排序轴的相关系数、特征值和解释方差
Table 3 Correlation coefficient,characteristic value and explanatory variance of soil factor and sorting axis

	排序轴	
	Axis1	Axis2
有机质(SOM)	-0.039 5	-0.218 9
铵氮 AN	0.291 4	-0.061 2
速效 P	0.356 5	0.326 5
速效 K	0.212 1	0.223 7
pH 值	0.011 5	-0.004 1
土壤含水量	-0.297 6	0.309 9
土壤容重	-0.382 7	0.353 4
土壤温度	-0.046 2	0.366 7
土壤湿度	0.120 7	0.308 9
特征值	0.181	0.154
物种与环境相关系数	0.872	0.828
物种数据变化的累积比率	18.1	33.5
物种—环境数据变化的累积比率	36.2	67.0

由表 3 可知,大型土壤动物与 9 个土壤因子排序轴(第 1 轴和第 2 轴)的相关系数分别达到 0.872 和 0.828,Axis1 和 Axis2 特征值为 0.181 和 0.154,排序轴 Axis1 和 Axis2 解释了 33.5%物种关系信息,排序轴 Axis1 和 Axis2 解释了 67.0%物种-环境因子关系信息。图 4 表明,本研究中所筛选

出来的 9 个土壤因子对大型土壤动物群落结构存在影响。其中马陆、鞘翅目成虫与排序轴 Axis1 呈负相关;蚯蚓类、蜘蛛目、等足目、马陆、蛭蚓目、拟步甲科幼虫、鞘翅目幼虫与排序轴 Axis2 呈负相关;蚯蚓类受到土壤含水量、土壤容重和土壤温度影响较大;马陆受到土壤有机质影响较大。

3 结论与讨论

3.1 结论

6 个生境共捕获 1 750 只大型土壤动物,分别隶属于 2 门 6 纲 13 类。蚯蚓类、马陆和蚁科 3 类大型土壤动物构成各生境土壤生态系统的重要组成成分。生境和季节都不是影响大型土壤动物分布的因素,仅土层是影响西江流域(肇庆市段)大型土壤动物分布的因素。土壤因子与土壤动物的分布关系,是各生境大型土壤动物序列分布的一个重要的影响因素,土壤因子对研究区主要大型土壤动物的分布有重要影响。今后会在取样点、采样对象和不同的流域进行调查研究,进一步研究西江流域土壤生态系统。

3.2 讨论

3.2.1 土壤动物分布及多样指数动态 表 2 表明土壤动物在物种组成和各类群的相对数量均存在一定的差异。总体来看,6 个生境大型土壤动物群落组成虽相对简单(155.56 只·m⁻²),但对土壤动物群落的组成和多样性有一定的影响,这与有关学者研究结果一致^[15-16]。一般生境越优越,土壤动物个体密度越大,类群越丰富,群落结构越复杂^[17-18]。但在实际采样中发现生境 1 和生境 6 大型土壤动物类群数和个体数都不是最多,可能选取样点处在非核

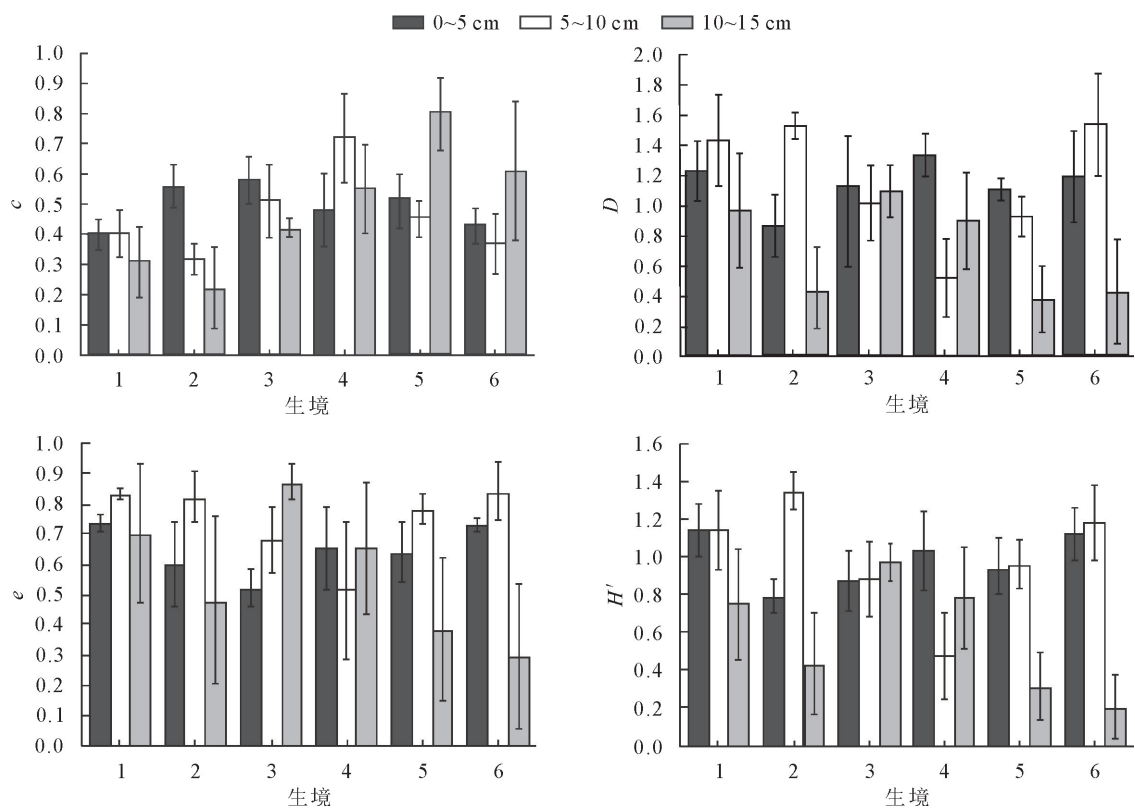


图 3 不同生境大型土壤动物多样性指数垂直分布特征(平均值±标准误)

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of diversity index of soil macrofauna in different habitats(mean±SE)

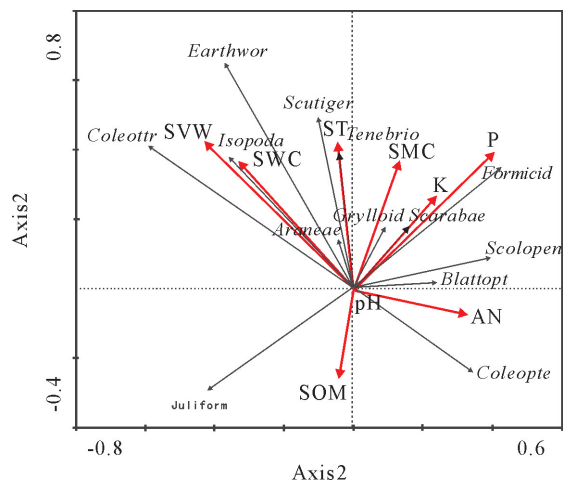


图 4 大型土壤动物与土壤因子排序

Fig. 4 Soil macrofauna and soil factor sequence

心区域,而土壤动物对其响应更为敏感^[19]。同时,土层 0~5 cm 的 H' 、 e 和 D 指数相对较高(图 4)。有学者^[18,20]研究植被条件越优越的生境,土壤动物的多样性越高,其他生境在土层 0~5 cm 的多样性较差,说明受到的人为干扰程度较重。

通过对生境、季节和土层的分析,生境和季节不是影响大型土壤动物水平分布的因素,而土层是影响大型土壤动物垂直分布的因素。土壤动物类群和个体密度均随土层加深而递减,这与研究^[21]结果具有相似性。其原因是土层 0~5 cm 土壤质地相对疏

松,通气良好,土壤养分丰富。生境 3 和生境 4 出现 H' 、 e 和 D 指数在 10~15 cm 土层比 5~10 cm 土层高。实际调查中发现生境 3 和生境 4 虽为自然保护区,但人为干扰程度比较重,因此在土层 10~15 cm 集中较多的土壤动物,这也说明大型土壤动物对人为干扰的响应。

3.2.2 大型土壤动物对环境因子变化的响应 通过研究大型土壤动物与其他物理性质比对发现,土壤动物对于长期生存的环境具有一定适应性,微酸和中性条件下土壤动物更适宜生存^[22],而研究区内土壤 pH 值一般在 5~6.7,且变化幅度不大对大型土壤动物分布影响小。充足的土壤有机质可以使植物茂盛的生长,为土壤动物提供充足的食物,从而对维持土壤动物的生存具有重要的作用^[23]。但本研究发现,多数土壤动物对土壤有机质表现出明显的负向响应,有学者^[24]研究表明,养分超过土壤动物生存所需量,便会表现出负向的响应。而本研究中有可能会调查生境大型土壤动物迁移能力强,对土壤有机质的依赖程度不高,所以不容易受到土壤有机质的制约。

参考文献:

[1] 刘志武,陈钰皓,房仕钢. 广东省高要林木生物技术基地规划理念——人与自然在信息时代的整合[J]. 中南林业调查规划,

2002,21(2):4-6.

[2] 殷秀琴,宋博,董炜华,等.我国土壤动物生态地理研究进展[J].地理学报,2010,65(1):91-102.
YIN X Q,SONG B,DONG W H,*et al.* A review on the eco-geography of soil fauna in China[J]. Journal of Geographical Sciences,2010,65(1):91-102. (in Chinese)

[3] 高梅香,张雪萍.石灰和EM处理条件下土壤动物群落在落叶分解中的变化[J].生态学报,2011,31(1):164-174.
GAO M X,ZHANG X P. Fluctuation of soil fauna community during defoliation decomposition under lime and EM treatment [J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(1):164-174. (in Chinese)

[4] 刘新民,杨劼.沙坡头地区人工固沙植被演替中大型土壤动物生物指示作用研究[J].中国沙漠,2005,25(1):40-44.
LIU X M,YANG J. Application of macrofauna as bioindicators of artificial plant succession in Shapotou region[J]. Journal of Desert Research,2005,25(1):40-44. (in Chinese)

[5] 李志强,柯云玲,班大雄,等.白蚁生物多样性及其对生态环境变化的指示作用[J].生态学杂志,2015,34(2):557-56.
LI Z Q,KE Y L,BAN D X,*et al.* Termite biodiversity and its ecological indication to environmental change[J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(2):557-561. (in Chinese)

[6] 张立杰,李健.基于SPEI和SPI指数的西江流域干旱多时间尺度变化特征[J].高原气象,2018,37(2):560-567.
ZHANG L J,LI J. Spatiotemporal change of drought at various time scales indicated by SPEI and SPI in Xijiang river basin [J]. Plateau Meteorology,2018,37(2):560-567. (in Chinese)

[7] 宋波,张云霞,庞瑞,等.广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J].环境科学,2018,39(9):4317-4326.
SONG B,ZHANG Y X,PANG R,*et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xi-jiang river draining of Guangxi[J]. Environmental Science, 2018,39(9):4317-4326. (in Chinese)

[8] 荣检,胡宝清,闫妍.广西西江流域植被净初级生产力时空分布特征及其影响因素[J].生态学杂志,2017,36(4):1020-1028.
RONG J,HU B Q,YAN Y. Spatial-temporal distribution and its influencing factors of vegetation net primary productivity in Guangxi Xijiang river basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(4):1020-1028. (in Chinese)

[9] 吴溢球.珠江行系列报导之六粤西之江——珠江最大干流西江[J].珠江经济,1996(4):34-37.

[10] 广西壮族自治区地方编纂委员会.广西通志.水利志(1991—2005)[M].广西:人民出版社,2011.

[11] 尹文英.中国土壤动物检索图鉴[M].北京:科学出版社,1998.

[12] TER BRAAK C J F, SMILAUER P. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide:software for canonical community ordination (Version 4. 5) [J]. Ithaca NY:Microcomputer Power,2002.

[13] 殷秀琴,蒋云峰,陶岩,等.长白山红松阔叶混交林土壤动物生态分布[J].地理科学,2011,31(8):935-940.
YIN X Q,JIANG Y F,TAO Y,*et al.* Ecogeographical distribution of soil fauna in *Pinus koraiensis* Mixed broad-leaved forest of Changbai Mountains[J]. Scientia Geographica Sinica,2011,31(8):935-940. (in Chinese)

[14] WANG Q Y,ZHOU D M,CANG L,*et al.* Indication of soil heavy metal pollution with earthworms and soil microbial biomass carbon in the vicinity of an abandoned copper mine in eastern Nanjing,China[J]. European Journal of Soil Biology, 2009,45(3):229-234.

[15] 林英华,张夫道,张俊清,等.鼎湖山不同自然植被土壤动物群落结构时空变化[J].生态学报,2005,2(10):2616-2622.

[16] 刘继亮,李锋瑞,刘七军,等.黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境关系研究[J].生态学报,2010,30(23):6389-6398.

[17] 张雪萍,黄丽荣,姜丽秋.大兴安岭北部森林生态系统大型土壤动物群落特征[J].地理研究,2008,27(3):509-518.
ZHANG X P,HUANG L R,JIANG L Q. Characteristics of macro-soil fauna in forest ecosystem of northern Da Hinggan Mountains[J]. Geographical Research,2008,27(3):509-518. (in Chinese)

[18] 李艳红,杨万勤,罗承德,等.桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态[J].生态学报,2013,33(1):159-167.
LI Y H,YANG W Q,LUO C D,*et al.* Dynamics on soil faunal community during the decomposition of mixed eucalypt and alder litters[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(1):159-167. (in Chinese)

[19] 李红月,殷秀琴,马辰,等.长白山地丘陵区不同土地利用方式土壤动物群落生态分布特征[J].土壤学报,2017,54(4):1018-1028.
LI H Y,YIN X Q,MA C,*et al.* Ecological distribution of soil fauna communities in Hilly Regions of the Changbai Mountains relative to land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(4):1018-1028. (in Chinese)

[20] MOSO M K S,GAMA-RODRIGUES E F,GAMA-RODRIGUES A C,*et al.* Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia,Brazil[J]. Applied Soil Ecology,2010,46(3):347-354.

[21] 章家恩,秦钟,李庆芳.不同土地利用方式下土壤动物群落的聚类与排序[J].生态学杂志,2011,30(12):2849-2856.

[22] 钱复生,王宗英.水东枣园土壤动物与土壤环境的关系[J].应用生态学报,1995,6(1):44-50.

[23] AYUKE F O,BRUSSAARD L,VANLAUWE B,*et al.* Soil fertility management:impacts on soil macrofauna,soil aggregation and soil organic matter allocation[J]. Applied Soil Ecology,2011,48(1):53-62.

[24] VILLENAVE C,SAJ S,PABLO A L,*et al.* Influence of long term organic and mineral fertilization on soil nematofauna when growing *Sorghum bicolor* in Burkina Faso[J]. Biology and Fertility of Soils,2010,46(7):659-670.