

DOI: 10.5846/stxb201904200798

杨光蓉, 豆鹏鹏, 马瑜, 王红娟, 林敦梅. 金佛山亚热带常绿阔叶林地表土壤动物群落特征及其影响因素. 生态学报, 2020, 40(21): 7602-7610.

Yang G R, Dou P P, Ma Y, Wang H J, Lin D M. Characteristics and influencing factors of surface soil fauna community in a subtropical evergreen broad-leaved forest of Jinfo Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7602-7610.

金佛山亚热带常绿阔叶林地表土壤动物群落特征及其影响因素

杨光蓉¹, 豆鹏鹏¹, 马瑜¹, 王红娟², 林敦梅^{1,*}

1 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045

2 重庆市农业科学院生物技术研究中心, 重庆 401329

摘要:为探讨小尺度下不同微生境的土壤动物群落特征及其与环境因子之间的关系,于2018年10月在金佛山西坡亚热带常绿阔叶林样带内,对其凋落物层及腐殖质层两类微生境的土壤动物群落进行调查及相应环境因子的测定。此次调查共捕获地表土壤动物12381头,隶属于3门9纲22目。其中优势类群为蜱螨目和长角蜱目,个体数占比为75.24%;常见类群为原蜱目、愈腹蜱目、短角蜱目、双翅目、鞘翅目和膜翅目,个体数占比为21.23%。同时,土壤动物的密度(M)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson优势度指数(D)及Pielou均匀度指数(E)均表现为腐殖质层极显著高于凋落物层($P<0.01$)。根据回归分析及冗余分析结果发现,两类微生境的土壤动物群落特征与环境因子的关系存在一定差异;影响凋落物层土壤动物群落特征的重要环境因子为凋落物的总有机碳、碳氮比、湿度及pH,而影响腐殖质层土壤动物群落特征的重要环境因子为腐殖质的干重、总氮、总磷、湿度、pH及微生物生物量氮。研究表明,常绿阔叶林生态系统的不同微生境间土壤动物多样性特征存在显著差异,小尺度下环境因子对土壤动物群落特征具有重要影响。

关键词:土壤动物;群落特征;环境因子;小尺度;金佛山

Characteristics and influencing factors of surface soil fauna community in a subtropical evergreen broad-leaved forest of Jinfo Mountain

YANG Guangrong¹, DOU Pengpeng¹, MA Yu¹, WANG Hongjuan², LIN Dunmei^{1,*}

1 Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China

2 Academy of Agricultural Sciences Biotechnology Research Center, Chongqing 401329, China

Abstract: In order to explore the community characteristics of soil fauna and its relationship with environmental factors in different microhabitats in the fine scale, soil fauna community of litter layer and humus layer were investigated and the related environmental factors were determined in a subtropical evergreen broad-leaved forest of the west slope of Jinfo Mountain in October 2018. A total of 12381 individuals belonging to 3 phyla, 9 classes and 22 orders were found in this investigation. Among them, Entomobryomorpha and Acarina were dominant groups, accounting for 75.24% of the total number of individuals, while Podurompha, Symphyleona, Neelipleona, Diptera, Coleoptera and Hymenoptera were common groups, accounting for 21.23% of the total number of individuals. Meanwhile, soil fauna density (M), Shannon-Wiener diversity index (H), Simpson dominance index (D) and Pielou evenness index (E) were significantly higher in humus layer than in litter layer ($P<0.01$). According to the regression analysis and redundancy analysis, some differences were revealed in the relationships between the community characteristics of soil fauna and environmental factors of the two

基金项目:重庆大学中央高校基本科研业务费(2018CDXYCH0014);重庆市研究生科研创新项目(CYS19038)

收稿日期:2019-04-20; **修订日期:**2020-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lindunmei@cqu.edu.cn

microhabitats. Total organic carbon, carbon nitrogen ratio, humidity and pH of litter were found to be the important factors influencing soil fauna community characteristics of litter layer. Nevertheless, dry weight, total nitrogen, total phosphorus, humidity, pH and microbial biomass nitrogen of humus were verified to be the important factors affecting soil fauna community characteristics of humus layer. Overall, the results showed that there were significant differences in the diversity characteristics of soil fauna between different microhabitats in the evergreen broad-leaved forest, and environmental factors had important influence on the community characteristics of soil fauna in the fine scale.

Key Words: soil fauna; community characteristics; environmental factors; fine scale; Jinfo Mountain

土壤动物作为陆生生态系统中最复杂多样的生物群体之一,具有数量多、种类丰富、分布广等特点^[1]。庞大的土壤动物群通过自身活动直接或间接地参与到土壤结构的塑造及发育、有机质分解、植物生长和养分元素释放等生态过程中^[1-3],对维持生态系统的动态平衡有着重要作用^[1]。

虽然土壤动物在生态系统中有十分重要的作用,但其群落组成及多样性常常受到一系列复杂环境因子的显著影响^[4-5],包括生物因子及非生物因子^[4];这在以土壤动物作为环境变化的生物指标中得到很好的证明^[6-7]。土壤动物群落与环境因子的关系通常具有尺度相关性^[1],不同尺度下环境因子对土壤动物的影响存有差异^[4]。尽管许多森林生态系统的结构大致上是均匀的,但在森林地表由于资源分配等各种有关环境因子的差异,在小尺度上也存在较为多样的微生境^[4,8]。有研究指出地表土壤动物蜘蛛群落的组成在森林生态系统内部的不同微生境之间有显著差异^[4],然而基于小尺度探讨土壤动物群落与环境因子关系的研究并不多见^[4,8-9]。因此,详细了解森林生态系统小尺度下不同微生境的土壤动物群落特征以及环境因子的影响,对于弄清土壤动物群落分布及多样性特征具有重要意义。

重庆市金佛山国家级自然保护区是中国西南地区的重要生态屏障,生物多样性极为丰富^[10]。目前,对金佛山生物多样性的研究主要针对植物、地上昆虫和哺乳动物方面^[10-15],该地区土壤动物多样性的资料尚处于缺乏状态。本研究在重庆金佛山西坡海拔约 1450 m 处的一条长约 1 km 的常绿阔叶林样带内,开展地表土壤动物调查,进而探讨小尺度土壤动物群落的变异性及其与环境因子间的关系,以填补金佛山地区土壤动物多样性方面的信息空缺。

1 研究材料与方法

1.1 研究区基本概况

研究地点位于重庆市南川区金佛山国家级自然保护区内(28°50′—29°20′N, 107°00′—107°20′E)。保护区面积约 441 km²,最高峰风吹岭海拔 2251.1 m^[13]。该地属于亚热带湿润季风气候区,雨量充沛,年平均降水量 1395.5 mm,年平均气温 8.2℃,年日照数 1100 h^[13]。金佛山地区土壤类型呈现垂直分带,从上到下大致分为棕壤、黄棕壤、暗黄壤和黄壤^[16]。区内植被类型主要包括亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶与常绿阔叶混交林,常见树种有栲(*Castanopsis fargesii*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、云山青冈(*Cyclobalanopsis sessilifolia*)、石灰花楸(*Sorbus folgneri*)、四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、合欢(*Albizia julibrissin*)、川桂(*Cinnamomum wilsonii*)等^[10]。

1.2 样品采集

2018 年 10 月,我们在金佛山西坡海拔约 1450 m 处水平选择一条长约 1 km 的常绿阔叶林样带,在该样带内设置 24 个采样点(样点之间相隔 30 m 以上)。在每个采样点将一个内径为 30 cm 的亚克力套圈置于地表,分别收集套圈内的凋落物和腐殖质(形态较完整的枯落叶归入凋落物层,无法辨认的枯枝落叶碎屑等归入腐殖质层),装入聚乙烯自封袋内并做好标记;同时在取样点旁分别收集部分凋落物和腐殖质样品用于该样点微生物生物量碳、氮的测定。所有样品置于低温箱中当天带回实验室,用于测定微生物生物量碳氮的样品保存于 4℃ 冰箱中,在 1 个月内完成测定。

1.3 土壤动物分离与鉴定

采集回来的凋落物及腐殖质样品使用 Tullgren 漏斗进行土壤动物分离,漏斗采用 25 w 白炽灯加热,在样品上形成约 14℃ 的温度梯度。根据样品分离后的干燥程度,我们将所有样品的分离时间均设置为 48 h。分离出的土壤动物保存在 75% 的酒精中,在体视显微镜(OLYMPUS—SZX16)下进行鉴定和计数,鉴定参考《中国土壤动物检索图鉴》^[17]、《中国亚热带土壤动物》^[17]及 Bellinger 等^[19]建立的世界跳虫名录网站。所有分离得到的土壤动物均鉴定到目水平。

1.4 环境因子测定

本研究的环境因子分为三大类:(1)物理因子:包括温度(℃)、湿度(%)、单位面积的凋落物和腐殖质的干重(g/m²)。其中温、湿度用便携式温湿度仪在采样时测定,腐殖质及凋落物层的样品在分离土壤动物后置于 60℃ 烘箱中干燥 36 h,然后称重获得干重。(2)化学因子:包括凋落物和腐殖质样品的 pH、总有机碳(g/kg)、总氮(g/kg)、总磷(g/kg)。用电位法测定样品 pH;测定元素含量的样品先充分研磨并混匀,有机碳含量使用固体燃烧法在岛津 TOC-TN 分析仪中测定^[20];用于测总氮、总磷含量的样品先用浓硫酸和 30% 过氧化氢在消煮炉中高温消解,待溶液冷却并定容后,总磷含量用钼锑抗分光光度法测定,总氮含量用岛津 TOC-TN 分析仪测定^[20];最后根据测定的各样品碳、氮、磷含量计算出 3 个元素的化学计量比值,即碳氮比、碳磷比和氮磷比。(3)生物因子:包括微生物生物量碳(mg/kg)和氮(mg/kg)。在测定之前先把保存于冰箱的样品置于温度为 25℃ 的恒温培养箱中培养 7 天,使微生物恢复活性,然后取适量样品用氯仿熏蒸-硫酸钾(0.5 mol/L)浸提^[21],再用岛津 TOC-TN 分析仪测定浸提液的碳、氮含量,最终计算微生物生物量碳和氮。

1.5 统计分析

分别计算各采样点凋落物层与腐殖质层土壤动物的密度(M)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(E)来表征土壤动物的多样性特征^[22]。用 t 检验分析凋落物层和腐殖质层的环境因子及土壤动物多样性特征是否存在显著差异。再选用一元线性回归探究凋落物层及腐殖质层土壤动物多样性特征与环境因子的关系^[23],除 pH 及总磷外的环境因子进行对数转换。最后用冗余分析探讨两类微生物土壤动物群落与环境因子的关系,土壤动物群落数据进行 $\log_{10}(x+1)$ 转换,通过计算变量之间的方差膨胀因子查看各解释变量之间是否存在严重的共线性^[24]。冗余分析结果的显著性用置换检验进行 1000 次运算,并根据双终止准则前向选择环境变量^[25]。本研究的所有分析在 Microsoft Excel(2016)及 R(3.5.1)中完成。

2 结果

2.1 凋落物层及腐殖质层微生境间的差异

总磷、氮磷比、温度、湿度及 pH 在凋落物层及腐殖质层的差异不显著($P>0.05$;表 1),干重、总氮、微生物生物量碳及微生物生物量氮都表现为腐殖质层显著高于凋落物层($P<0.05$),总有机碳、碳氮比及碳磷比表现为凋落物层显著高于腐殖质层($P<0.01$)。

2.2 土壤动物总体概况

本次调查共捕获地表土壤动物 12381 头,隶属于 3 门 9 纲 22 目(表 2)。优势类群为蜱螨目和长角蜱目,个体总数为 9315 头,占比 75.24%;常见类群包括原蜱目、愈腹蜱目、短角蜱目、双翅目、鞘翅目和膜翅目,个体总数 2628 头,占比 21.23%;稀有类群包括缨翅目、革翅目、鳞翅目、双尾目和综合目等 14 个类群,个体总数 438 头,占比 3.53%。

其中凋落物层共捕获土壤动物 20 目 3645 头。优势类群为蜱螨目及长角蜱目,总占比为 78.71%;常见类群包括原蜱目、愈腹蜱目、双翅目及鞘翅目,总占比为 16.77%;稀有类群包括膜翅目、缨翅目及革翅目等 14 类,占比为 4.52%。腐殖质层共捕获土壤动物 22 目 8736 头;优势类群为蜱螨目、长角蜱目及原蜱目,总占比为 84.57%;常见类群包括愈腹蜱目、双翅目、鞘翅目、膜翅目及线蚓亚目,总占比为 12.02%;稀有类群包括等

足目、柄眼目、带马陆目及伪蝎目等 14 类,占比仅为 3.41%。

表 1 凋落物层与腐殖质层环境因子汇总 (平均值±标准误, $n=24$)

Table 1 The summary of environmental factors of litter layer and humus layer (Mean±SE, $n=24$)

环境因子 Environmental factors	腐殖质层 Humus layer	凋落物层 Litter layer	t	P
干重 Dry weight/(g/m ²)	364.41±23.65	287.43±22.87	2.34	0.02
总有机碳 Total organic carbon/(g/kg)	392.80±19.34	542.96±6.72	-7.34	< 0.001
总氮 Total nitrogen/(g/kg)	10.40±0.44	7.34±0.29	5.8	< 0.001
总磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.77±0.06	0.63±0.05	1.91	0.06
碳氮比 Carbon nitrogen ratio	38.46±1.95	76.39±2.84	-11.1	< 0.001
碳磷比 Carbon phosphorus ratio	628.37±82.60	954.77±60.04	-3.19	< 0.01
氮磷比 Nitrogen phosphorus ratio	16.53±2.52	12.33±0.5	1.63	0.11
微生物量碳 Microbial biomass carbon/(mg/kg)	2192.00±132.89	1559.81±98.93	-8.6	< 0.001
微生物量氮 Microbial biomass nitrogen/(mg/kg)	515.36±41.14	393.58±34.51	-6.29	< 0.001
温度 Temperature/℃	15.15±0.10	15.05±0.12	0.68	0.49
湿度 Humidity/%	35.35±0.10	35.73±1.26	1.54	0.18
pH	5.02±0.07	5.14±0.05	0.47	0.63

表 2 凋落物层与腐殖质层土壤动物组成概况 (平均值±标准误, $n=24$)

Table 2 Summary of soil fauna composition in litter layer and humus layer (Mean±SE, $n=24$)

类群 Groups	凋落物层 Litter layer			腐殖质层 Humus layer			总数 Total	丰富度 Abundance
	个体数 Individuals/ 头	密度 Density/ (头/m ²)	占比 Ratio/%	个体数 Individuals/ 头	密度 Density/ (头/m ²)	占比 Ratio/%		
蜱螨目 Acarina	2498	1473.0±131	68.53	4348	2564.0±403	49.77	6846	+++
长角蜱目 Entomobryomorpha	371	219.0±32	10.18	2098	1237.0±153	24.02	2469	+++
原蜱目 Podurompha	169	100.0±20	4.64	942	556.0±47	10.78	1111	++
愈腹蜱目 Symphyleona	28	40.0±7	1.87	106	63.0±12	1.21	134	++
短角蜱目 Neelipleona	68	17.0±3	0.77	62	37.0±9	0.71	130	++
双翅目 Diptera	296	175.0±27	8.12	534	315.0±63	6.11	830	++
鞘翅目 Coleoptera	78	46.0±8	2.14	164	97.0±17	1.88	242	++
膜翅目 Hymenoptera	31	18.0±10	0.85	150	88.0±35	1.72	181	++
缨翅目 Thysanoptera	29	17.0±5	0.80	20	12.0±6	0.23	49	+
革翅目 Dermaptera	4	2.0±1	0.11	4	2.0±2	0.05	8	+
鳞翅目 Lepidoptera	18	11.0±3	0.49	38	22.0±8	0.43	56	+
双尾目 Diplura	—	—	—	6	4.0±3	0.07	6	+
综合目 Symphyla	2	1.0±1	0.05	48	28.0±8	0.55	50	+
地蜈蚣目 Geophilomorpha	3	2.0±2	0.08	26	15.0±6	0.30	29	+
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	13	8.0±3	0.36	30	18.0±5	0.34	43	+
线蚓亚目 Enchytraeina	22	13.0±8	0.60	96	57.0±26	1.10	118	+
带马陆目 Polydesmida	3	2.0±1	0.08	12	7.0±4	0.14	15	+
等足目 Isopoda	1	1.0±1	0.03	6	4.0±3	0.07	7	+
柄眼目 Stylommatophora	—	—	—	8	5.0±3	0.09	8	+
伪蝎目 Pseudoscorpiones	2	1.0±1	0.05	14	8.0±4	0.16	16	+
蜘蛛目 Araneae	7	4.0±2	0.19	18	11.0±4	0.21	25	+
盲蛛目 Opiliones	2	1.0±1	0.05	6	4.0±2	0.07	8	+
总数 Total	3645	2150	1	8736	5152	1	12381	

+++; 优势类群 Dominant groups (>10%); ++; 常见类群 Common groups (1%—10%); +; 稀有类群 Rare groups (<1%); —; 未捕获到 uncollected

2.3 土壤动物多样性特征及其与环境因子的关系

凋落物层及腐殖质层土壤动物的密度 (D) 差异极显著 ($P < 0.001$; 图 1)。同样, 土壤动物的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Pielou 均匀度指数 (E) 及 Simpson 优势度指数 (D) 在凋落物层与腐殖质层都存在极显著差异 ($P < 0.01$), 均为腐殖质层显著高于凋落物层。

进一步的回归分析结果显示 (表 3), 凋落物层土壤动物的密度 (M)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 优势度指数 (D) 及 Pielou 均匀度指数 (E) 均与凋落物的碳氮比、湿度及 pH 显著负相关 ($P < 0.05$), 与凋落物总有机碳极显著正相关 ($P < 0.01$)。

腐殖质层土壤动物的密度 (M)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 优势度指数 (D) 及 Pielou 均匀度指数 (E) 均与腐殖质的湿度及 pH 显著负相关 ($P < 0.05$), 与腐殖质的干重、总氮显著正相关 ($P < 0.05$); Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 及 Pielou 均匀度指数 (E) 还与腐殖质的总磷及微生物生物量氮显著正相关 ($P < 0.05$)。

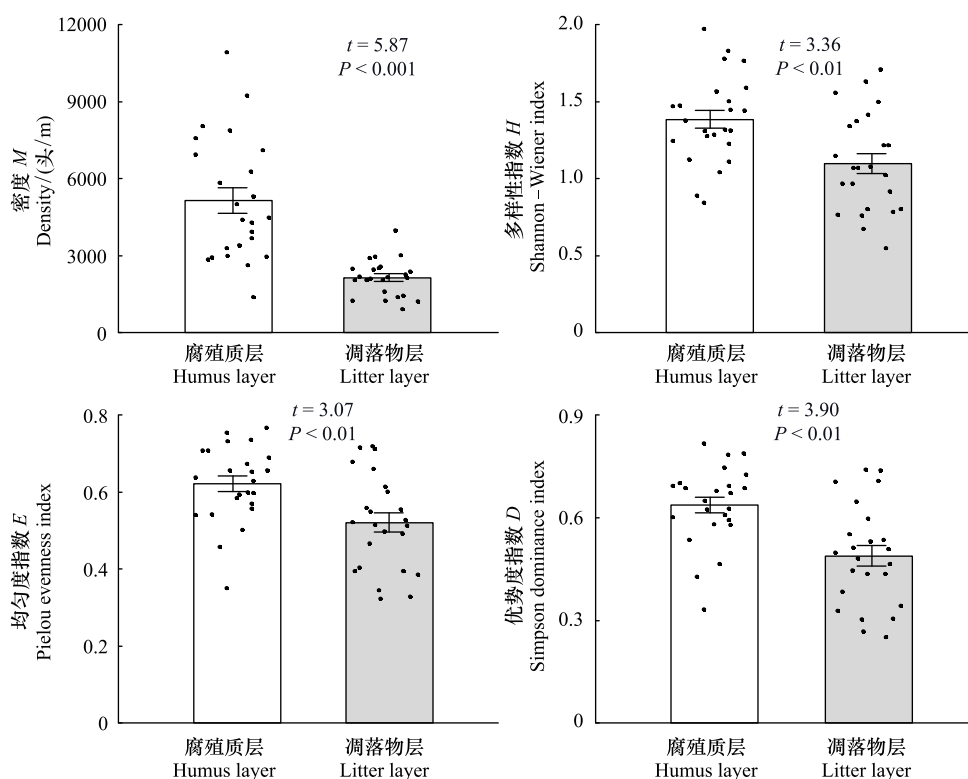


图 1 凋落物层与腐殖质层土壤动物多样性特征 (平均值 $\pm$ 标准误, $n = 24$)

Fig.1 Characteristics of soil fauna diversity in litter layer and humus layer (Mean $\pm$ SE, $n = 24$)

2.4 土壤动物群落与环境因子的关系

凋落物的总有机碳、碳氮比及 pH 和湿度与所有排序轴存在显著相关性 ($F = 1.67, P = 0.04$)。排序轴 1 与轴 2 分别解释 18.71% 和 8.81% 的微生境变化, 其中轴 1 主要反映凋落物的湿度及 pH 的影响, 轴 2 主要反映凋落物的总有机碳及碳氮比的影响 (表 4)。结合图 2 看出, 线蚓亚目、带马陆目及石蜈蚣目与凋落物的湿度及 pH 正相关, 双翅目、缨翅目、综合目、蜘蛛目与凋落物的湿度及 pH 负相关, 鳞翅目、伪蝎目及盲蛛目与凋落物碳氮比正相关, 蜉蝣目、原蛭目、愈腹蛭目、长角蛭目、革翅目及鞘翅目等类群与凋落物总有机碳正相关。

同样, 腐殖质的干重、总氮、总磷、微生物生物量氮、湿度及 pH 与所有排序轴存在显著相关性 ($F = 1.59, P = 0.02$)。排序轴 1 与轴 2 分别解释 12.81% 和 11% 的微生境变化, 其中轴 1 主要反映腐殖质的总氮、干重及微生物生物量氮的影响, 轴 2 主要反映腐殖质的总磷、湿度及 pH 的影响 (表 4)。结合图 2 看出, 蜉蝣目、长角

蛭目、原蛭目、双翅目、等足目及鞘翅目与腐殖质的总氮、干重及微生物生物量氮正相关;线蚓亚目、带马陆目、双尾目及柄眼目与腐殖质湿度正相关;综合目、缨翅目、愈腹蛭目、短角蛭目与腐殖质的总磷及 pH 正相关,地蜈蚣目、石蜈蚣目、膜翅目、鳞翅目及盲蛛目与腐殖质的总磷及 pH 负相关。

表 3 凋落物层与腐殖质层土壤动物多样性特征与环境因子的回归结果

Table 3 Regression results of soil fauna diversity characteristics and environmental factors in litter layer and humus layer		环境因子 Environmental factors											
微生境 Microhabitats		DW/ (g/m ²)	T/℃	S/%	pH	TN/ (g/kg)	TOC/ (g/kg)	TP (g/kg)	C/N	C/P	N/P	MBN/ (mg/kg)	MBC/ (mg/kg)
凋落物层	<i>M</i>	0.09	0.11	-0.22 *	-0.33 *	0.18	0.69 **	0.06	-0.26 *	-0.02	0.07	0.18	0.17
Litter layer	<i>H</i>	0.05	0.11	-0.19 *	-0.24 *	0.17	0.73 **	0.14	-0.22 *	-0.01	0.16	0.12	0.14
	<i>D</i>	0.09	0.05	-0.24 *	-0.28 *	0.12	0.44 **	0.15	-0.39 *	-0.12	0.03	0.13	0.15
	<i>E</i>	0.14	0.20	-0.23 *	-0.43 *	0.16	0.46 **	0.15	-0.32 *	-0.12	0.05	0.11	0.12
腐殖质层	<i>M</i>	0.27 *	-0.07	-0.26 *	-0.26 *	0.30 **	0.18	0.08	-0.12	-0.13	-0.05	0.09	-0.02
Humus layer	<i>H</i>	0.35 *	-0.03	-0.21 *	-0.25 *	0.46 **	0.02	0.26 *	-0.09	-0.12	-0.09	0.27 *	0.11
	<i>D</i>	0.31 *	-0.19	-0.22 *	-0.22 *	0.32 **	-0.03	0.03	-0.13	-0.04	-0.02	0.04	0.06
	<i>E</i>	0.35 *	-0.41	-0.22 *	-0.27 *	0.43 **	-0.05	0.24 *	-0.12	-0.05	-0.04	0.22 *	0.04

M:密度 Density;*H*:多样性指数 Shannon-Wiener diversity index;*D*:优势度指数 Simpson dominance index;*E*:均匀度指数 Pielou evenness index;DW:干重 Dry weight;T:温度 Temperature;S:湿度 Humidity;TN:总氮 Total nitrogen;TOC:总有机碳 Total organic carbon;TP:总磷 Total phosphorus;C/N:碳氮比 Carbon nitrogen ratio;C/P:碳磷比 Carbon phosphorus ratio;N/P:氮磷比 Nitrogen phosphorus ratio;MBN:微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen;MBC:微生物生物量碳 Microbial biomass carbon;* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

表 4 凋落物层与腐殖质层土壤动物群落与环境因子的冗余分析结果

Table 4 Results of redundancy analysis of soil fauna community and environmental factors in litter layer and humus layer			
微生境 Microhabitats	环境因子及排序信息 Environment factors and ordination information	排序轴 1 Axis1	排序轴 2 Axis2
凋落物层 Litter layer	pH 值	-0.65	0.26
	湿度	-0.37	0.07
	总有机碳	-0.13	-0.41
	碳氮比	-0.12	0.57
	排序轴解释方差百分比	18.71%	8.81%
	所有轴显著性检验	$F = 1.67$	$P = 0.04$
腐殖质层 Humus layer	pH 值	-0.12	0.47
	湿度	-0.13	0.21
	干重	0.53	0.10
	总氮	0.45	0.13
	总磷	0.11	0.32
	微生物生物量氮	0.39	0.09
	排序轴解释方差百分比	12.81%	11%
	所有轴显著性检验	$F = 1.59$	$P = 0.02$

3 讨论

3.1 土壤动物群落结构及多样性特征

本研究捕获的地表土壤动物隶属于 9 纲 22 目,与衡山(11 纲 30 目)^[26]及天童山(10 纲 29 目)^[27]等亚热带常绿阔叶林生态系统的土壤动物群落调查结果较为接近;表明金佛山地区土壤动物资源较为丰富,是土壤动物多样性分布的热点区域之一。捕获的土壤动物中,长角蛭目和蛭蟥目为凋落物层及腐殖质层的共同优势类群(表2),尤其是蛭蟥目占绝对优势地位;表明金佛山常绿阔叶林的地表蛭类及弹尾类较为丰富且相对

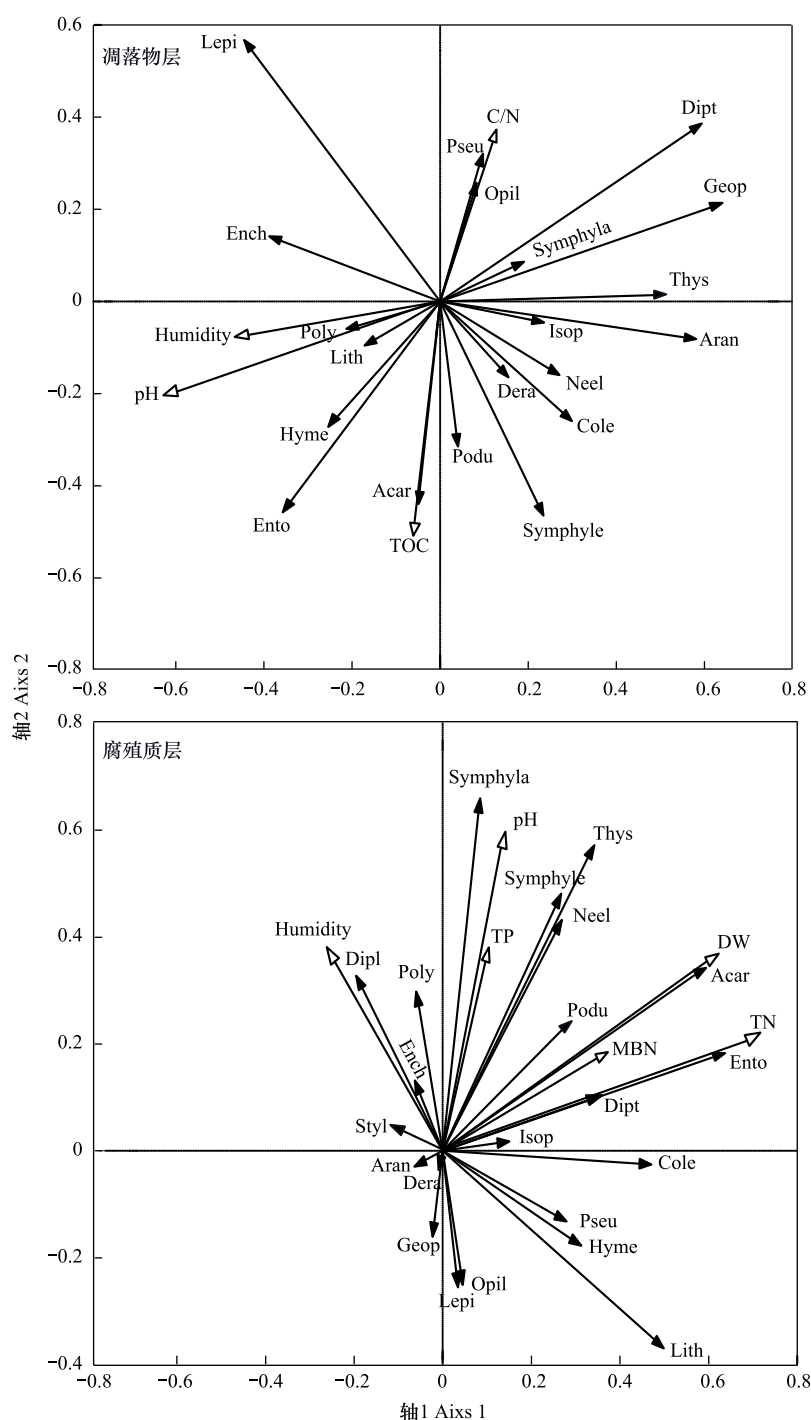


图2 凋落物层与腐殖质层土壤动物类群与环境因子的冗余分析

Fig.2 Redundancy analysis between soil fauna groups and environmental factors at litter layer and humus layer

Acar: 蜱螨目 Acarina; Aran: 蜘蛛目 Araneae; Cole: 鞘翅目 Coleoptera; Dera: 革翅目 Deramptera; Dipl: 双尾目 Diplura; Dipt: 双翅目 Diptera; Ench: 线蚓亚目 Enchytraeina; Ento: 长角蛭目 Entomobryomorpha; Geop: 地蜈蚣目 Geophilomorpha; Hyme: 膜翅目 Hymenoptera; Isop: 等足目 Isopoda; Lepi: 鳞翅目 Lepidoptera; Lith: 石蜈蚣目 Lithobiomorpha; Neel: 短角蛭目 Neelipleona; Opil: 盲蛛目 Opiliones; Poly: 带马陆目 Polydesmida; Podu: 原蛭目 Podurompha; Pseu: 伪蝎目 Pseudoscorpiones; Symphyle: 愈腹蛭目 Symphyleona; Symphyla: 综合目; Stylom: 柄眼目 Stylomatophora; Thys: 纓翅目 Thysanoptera; pH: pH 值 pH value; Humidity: 湿度; TN: 总氮 Total nitrogen; TOC: 总有机碳 Total organic carbon; C/N: 碳氮比 Carbon nitrogen ratio; DW: 干重 Dry weight; MBN: 微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen

稳定,表现出对不同微生境的普适性。王振中和张友梅^[26]对衡山常绿阔叶林土壤动物群落的研究显示蜚蠊目及弹尾目为优势类群,线蚓亚目、膜翅目及双翅目为常见类群,与本研究结果不完全一致;另外易兰^[27]在天童山常绿阔叶林的土壤动物群落调查结果同样显示蜚蠊目是优势类群,但其研究中弹尾目、双翅目、膜翅目及线蚓亚目是常见类群,同样与本研究结果不完全一致;表明不同区域的同类型生态系统中土壤动物群落结构存在一定差异。

本研究中土壤动物的密度(M)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)及 Pielou 均匀度指数(E)均为腐殖质层极显著高于凋落物层(图 1),土壤动物群落的分布及多样性并没有出现部分研究所描述的表聚性特征^[22,28]。大量研究表明,土壤动物分布及多样性特征与生境因子相关^[3-7];而在森林生态系统中,即使是微小尺度上也常常形成十分多样化的微生境进而影响土壤动物的多样性^[4-5]。根据本研究中腐殖质层与凋落物层环境因子的对比分析发现,多数环境因子在两层间存在显著差异(表 1),表明凋落物层与腐殖质层是土壤动物栖息的不同微生境。同时,生境间资源的数量及质量可能对土壤动物多样性特征产生重要的影响^[29],凋落物与腐殖质不仅可以直接作为土壤动物的食物资源^[4,27],且具有一定程度的保湿及保温效果^[28]。而本研究中腐殖质的干重及总氮含量显著高于凋落物的干重及总氮,同时腐殖质碳氮比显著低于凋落物碳氮比(表 1)。另外总氮含量更高的腐殖质还能为该层微生物的生长繁殖补充丰富的氮源,也就间接为食菌类土壤动物提供食源^[30]。即腐殖质层为其土壤动物提供了更多可利用的优质资源,从而更有利于该层土壤动物的生长繁殖。

3.2 土壤动物与环境因子的关系

研究表明,土壤动物栖息地的养分含量、湿度等环境因子对土壤动物群落分布及多样性变化起着重要的作用^[22,27-28]。本研究综合分析了小尺度下不同微生境的土壤动物群落特征受微生境物理、化学及生物因子的影响,结果表明土壤动物群落组成及多样性特征变化与环境因子有显著相关性,且在不同的微生境存在一定差异。回归分析结果显示,凋落物层土壤动物的密度及多样性指标均与凋落物的碳氮比、湿度及 pH 显著负相关,而与凋落物总有机碳显著正相关(表 3);表明影响凋落物层土壤动物多样性特征的重要环境因子是凋落物的碳氮比、总有机碳、湿度及 pH。而腐殖质层土壤动物的密度及多样性指标均与腐殖质的湿度及 pH 显著负相关,与腐殖质的干重及总氮显著正相关(表 3),该层土壤动物的多样性指数(H)及均匀度指数(E)还与腐殖质的总磷及微生物生物量氮显著正相关;即表明腐殖质的干重、湿度、pH、总氮、总磷及微生物生物量氮是影响腐殖质层土壤动物多样性特征的重要环境因子。

本研究中凋落物干重并没有显著影响凋落物层土壤动物群落及多样性,而表征凋落物质量状况的总有机碳及碳氮比则对其有显著影响,表明凋落物质量的作用对该层土壤动物群落特征的影响更大。凋落物总有机碳能够为土壤动物提供其生长发育所需的碳源^[28],然而当碳氮比过高则可能影响凋落物的可利用性从而对土壤动物群落特征产生不利影响^[29]。而在腐殖质层,腐殖质的干重、总氮、总磷及微生物生物量氮都显著正向影响该层土壤动物群落多样性,腐殖质中较高的总氮和总磷含量充分保障了土壤动物生长发育所需要的养分元素^[26-29]。另外凋落物层及腐殖质层的湿度及 pH 都分别对其土壤动物群落多样性特征产生显著负效应,表明小尺度下微生境的湿度及 pH 也是影响土壤动物群落特征的重要环境因子。土壤动物的迁移能力较弱,微生境湿度过高可能出现缺氧或水淹状况从而不利于土壤动物的生存^[27]。另有研究指出多数土壤动物宜居住于中性或弱酸性环境下^[22],本研究中两类微生境的 pH 都为弱酸性,尽管变化不大,仍然对两类微生境土壤动物的多样性特征产生了消极影响,反映出土壤动物对环境微弱变化的高敏感性^[1,6]。此外,本研究中温度因子并未显著影响两类微生境的土壤动物群落特征,可能由于温度因子主要从大尺度上对土壤动物群落特征产生显著影响^[7]。

冗余分析进一步表明,即使是在同一微生境下,不同土壤动物类群受环境因子的影响也存在差异。凋落物层的双翅目、缨翅目、综合目和蜘蛛目等几个类群与凋落物的湿度及 pH 呈负相关关系,蜚蠊目、原蛭目和长角蛭目等类群则与凋落物的总有机碳正相关(图 2);腐殖质层的蜚蠊目、长角蛭目、原蛭目、双翅目及鞘

翅目等类群与腐殖质的总氮、干重及微生物生物量氮正相关,线蚓亚目、带马陆目、双尾目等类群则与腐殖质湿度正相关(图2);这些差异体现了各土壤动物类群对环境因子变化的敏感程度、适应能力不同^[4-5]。

4 结论

金佛山西坡常绿阔叶林地表土壤动物群落组成类群丰富,凋落物层与腐殖质层的共同优势类群为蜚蠊目和长角蜚目,二者表现出对不同微生境的普适性。而凋落物层及腐殖质层两类微生境的土壤动物多样性特征存在显著差异,土壤动物个体密度及多样性指标均表现为腐殖质层极显著高于凋落物层。

小尺度下微生境因子差异对土壤动物群落组成及多样性特征有重要影响,同时不同土壤动物类群受环境因子的影响存在差异。其中影响凋落物层土壤动物群落组成及多样性特征的重要环境因子是凋落物的总有机碳、碳氮比、湿度及pH,而腐殖质的干重、总氮、总磷、湿度、pH及微生物生物量氮是影响腐殖质层土壤动物群落组成及多样性特征的重要环境因子。

参考文献(References):

- [1] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 2014, 515(7528): 505-511.
- [2] Culliney T W. Role of arthropods in maintaining soil fertility. *Agriculture*, 2013, 3(4): 629-659.
- [3] Jones C G, Lawton J H, Shachak M. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 1994, 69(3): 373-386.
- [4] Ziesche T M, Roth M. Influence of environmental parameters on small-scale distribution of soil-dwelling spiders in forests: what makes the difference, tree species or microhabitat?. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 738-752.
- [5] Doblas-Miranda E, Sánchez-Piñero F, González-Megías A. Vertical distribution of soil macrofauna in an arid ecosystem: are litter and belowground compartmentalized habitats?. *Pedobiologia*, 2009, 52(6): 361-373.
- [6] Vasconcellos R L F, Segat J C, Bonfim J A, Baretta D, Cardoso E J B N. Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 58: 105-112.
- [7] Kardol P, Reynolds W N, Norby R J, Classen A T. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1): 37-44.
- [8] Oxbrough A, Irwin S, Kelly T C, O'Halloran J. Ground-dwelling invertebrates in reforested conifer plantations. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(10): 2111-2121.
- [9] 高梅香, 何萍, 孙新, 张雪萍, 吴东辉. 环境筛选、扩散限制和生物间相互作用在温带落叶阔叶林土壤跳虫群落构建中的作用. *科学通报*, 2014, 59(24): 2426-2438.
- [10] 方任吉, 刘玉成, 钟章成, 潘体常, 许鸿鹄. 南川金佛山植被调查报告. *西南师范学院学报: 自然科学版*, 1982, (2): 82-100.
- [11] 童虹宇, 周小雪, 李娟, 邓洪平, 王茜, 周启贵, 汤绍虎, 张军, 李中娟, 陈玉蕊. 珍稀濒危植物金佛山兰的组培快繁. *植物生理学报*, 2018, 54(11): 1681-1686.
- [12] 彭杰, 彭建军, 邓亚平, 黄飘逸, 高红梅, 孙念, 王霞, 袁旭东, 周洪艳, 张承伦. 重庆金佛山国家级自然保护区林麝种群数量初步调查. *林业科技通讯*, 2018, (4): 30-32.
- [13] 郝秀东, 欧阳绪红, 谢世友, 罗伦德. 重庆金佛山国家自然保护区现代植被表土孢粉的初步研究. *古生物学报*, 2011, 50(2): 230-239.
- [14] 洪兆春. 重庆金佛山蜻蜓目昆虫区系调查. *西南大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(7): 33-38.
- [15] 张军, 刘翔, 林茂祥, 申杰, 王黎, 刘正宇. 金佛山自然保护区哺乳动物资源调查报告. *现代中药研究与实践*, 2016, 30(1): 21-25.
- [16] Zhang C, Yan J, Pei J G, Jiang Y J. Hydrochemical variations of epikarst springs in vertical climate zones: a case study in Jinfo Mountain National Nature Reserve of China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(2): 375-381.
- [17] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.
- [19] Bellinger P F, Christiansen K A, Janssens F. Checklist of the collembola of the world. [2018-11-15]. <http://www.collembola.org/>.
- [20] 豆鹏鹏, 王芳, 马瑜, 庞梅, 米湘成, 马克平, 林敦梅. 叶凋落物碳、氮和磷元素对模拟淋溶的响应. *科学通报*, 2018, 63(30): 3114-3123.
- [21] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [22] 钱复生, 王宗英. 水东枣园土壤动物与土壤环境的关系. *应用生态学报*, 1995, 6(1): 44-50.
- [23] Jørgensen S E. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach, second edition, Kenneth P. Brunham, David R. Anderson, Springer-Verlag, Heidelberg, 2002, 490 pages, hardbound, 31 illustrations. *Ecological Modelling*, 2004, 172(1): 96-97.
- [24] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical ecology with R. *International Statistical Review*, 2012, 80(1): 201-201.
- [25] Blanchet F G, Legendre P, Borcard D. Forward selection of explanatory variables. *Ecology*, 2008, 89(9): 2623-2632.
- [26] 王振中, 张友梅. 衡山自然保护区森林土壤中动物群落研究. *地理学报*, 1989, 44(2): 205-213.
- [27] 易兰. 浙江天童受损常绿阔叶林的次生演替对土壤动物群落的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [28] 曹阳, 高梅香, 张雪萍, 董承旭. 黑龙江省不同纬度梯度农田大型土壤动物群落分布特征. *生态学报*, 2017, 37(5): 1677-1687.
- [29] Jochum M, Barnes A D, Weigelt P, Ott D, Rembold K, Farajallah A, Brose U. Resource stoichiometry and availability modulate species richness and biomass of tropical litter macro-invertebrates. *Journal of Animal Ecology*, 2017, 86(5): 1114-1123.
- [30] Coleman D C, Callaham M A, Crossley Jr D A. *Fundamentals of Soil Ecology*. 3rd ed. London: Academic Press, 2017: 77-171.