

DOI: 10.20103/j.stxb.202405071014

董江海, 李蓉姣, 郑文芳, 刘入源, 赵立娟, 高瑞贺. 关帝山杨桦混交林土壤动物功能群海拔梯度分布格局及其环境驱动因素. 生态学报, 2025, 45(2): 769-787.

Dong J H, Li R J, Zheng W F, Liu R Y, Zhao L J, Gao R H. Elevation gradient distribution pattern and environmental driving factors of soil fauna functional groups in poplar-birch mixed forest in Guandi Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 769-787.

关帝山杨桦混交林土壤动物功能群海拔梯度分布格局及其环境驱动因素

董江海¹, 李蓉姣¹, 郑文芳¹, 刘入源¹, 赵立娟¹, 高瑞贺^{1,2,*}

¹ 山西农业大学林学院, 晋中 030800

² 山西省林业危险性有害生物检验鉴定中心, 晋中 030800

摘要: 为探究关帝山不同海拔梯度下杨桦混交林土壤动物功能群的分布格局及环境驱动因素, 以山西省关帝山林区典型森林生态系统“山杨-桦树”混交林为调查对象, 设置 4 个海拔梯度 (1600 m、1800 m、2000 m、2200 m), 于 2022—2023 年的 5 月、7 月、10 月对杨桦林中土壤动物进行采样调查, 采用多因素方差分析对不同海拔、月份、土层及其交互作用进行检验, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和最小差异显著法 (LSD) 分析不同海拔、采样季节、土壤各土层间的土壤动物功能群的动态响应; 运用 Mantel 检验、冗余分析以明确环境因素对土壤动物功能群时空分布格局的影响。研究结果表明: 关帝山不同海拔共获得土壤动物 24434 只, 隶属于 3 门 11 纲 34 目 (亚目) 127 个类群, 其中菌食性 3 类、杂食性 13 类、植食性 23 类、捕食性 30 类、腐食性 54 类, 数量占比分别为 19.66%、4.33%、8.95%、10.08%、56.98%; 随海拔上升, 土壤动物功能群类群和个体数下降, 菌食性类群数最少, 腐食性类群数和数量最多, 在时间动态上, 土壤动物功能群总类群数随月份变化先上升后下降, 变化趋势为 7 月 > 5 月 > 10 月, 总个体数随时间逐渐下降, 变化趋势为 5 月 > 7 月 > 10 月; 在垂直分布上, 总类群数和个体数随土层加深逐渐变少, 变化趋势为同一海拔凋落物层 > 0—10 cm 层 > 10—20 cm 层 > 20—30 cm 层。此外, 腐食性土壤动物类群数、个体数均高于其它功能群。土壤温度、湿度、土壤酸碱度、电导率、速效氮、速效磷、速效钾是决定关帝山土壤动物功能群群落时空分布格局的主要环境因子。研究结果可为关帝山林区土壤动物的多样性监测与保护提供科学参考。

关键词: 关帝山; 土壤动物; 杨桦混交林; 功能群

Elevation gradient distribution pattern and environmental driving factors of soil fauna functional groups in poplar-birch mixed forest in Guandi Mountain

DONG Jianghai¹, LI Rongjiao¹, ZHENG Wenfang¹, LIU Ruyuan¹, ZHAO Lijuan¹, GAO Ruihe^{1,2,*}

¹ College of Forestry Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030800, China

² Shanxi Provincial Forestry Hazardous Pest Inspection and Identification Center, Jinzhong 030800, China

Abstract: In order to explore the distribution pattern and environmental driving factors of soil fauna functional groups in poplar-birch mixed forest under different altitude gradients in Guandi Mountain, this study took the poplar-birch mixed forest, a typical forest ecosystem in Guandi Mountain Forest Area, Shanxi Province, as the survey object, set up four altitude gradients (1600 m, 1800 m, 2000 m, 2200 m), and sampled soil animals in poplar-birch forest in May, July and October from 2022 to 2023. The one-way ANOVA and LSD method were used to analyze the dynamic responses of soil fauna functional groups at different altitudes, sampling seasons and soil layers. Mantel test and redundancy analysis were used to

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32401594); 山西省应用基础研究计划青年科技研究基金 (20210302124062); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2023-087); 山西农业大学科技创新基金 (2017YJ20)

收稿日期: 2024-05-07; **网络出版日期:** 2024-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoruihe1989@163.com

clarify the influence of environmental factors on the spatial and temporal distribution pattern of soil fauna functional groups. The results showed that a total of 24444 soil animals were obtained at different altitudes in Guandi Mountain, belonging to 127 groups of 3 phyla, 11 classes, 34 orders (suborders), including 3 mygivorious groups, 13 omnivorous species, 23 herbivorous species, 30 predatory groups, and 54 saprophagous groups, accounting for 19.66%, 4.33%, 8.95%, 10.08%, and 56.98% respectively. In terms of temporal dynamics, the total number of soil animal functional groups increased first and then decreased with the change of months, with a trend of July> May>October, and a gradual decrease of the total number of individuals with time, with a trend of May> July> October. In terms of vertical distribution, the total number of taxa and the number of individuals gradually decreased with the deepening of the soil layer, and the change trend was O layer> A layer> B layer>C layer. In addition, the number of saprophagous soil fauna groups and the number of individuals were higher than those of other functional groups. Soil temperature, humidity, soil pH, electrical conductivity, available nitrogen, available phosphorus and available potassium were the main environmental factors that determined the spatial and temporal distribution pattern of soil fauna functional communities in Guandi Mountain. The results of this study can provide a scientific reference for the monitoring and protection of soil fauna diversity in the Guandi Mountain forest area.

Key Words: Guandi Mountain; soil fauna; mixed *Populus davidiana* and *Betula platyphylla* forest; functional groups

土壤动物是生存在土壤中和凋落叶下的各种动物的总称^[1]。土壤动物种类丰富、数量庞大,其摄食活动和排泄等均会对土壤生态系统产生影响,是土壤生态系统中不可或缺的生物组分^[2],大型土壤动物通过吞食、挖掘等行为促进凋落物分解过程,改变土壤物理结构,促进土壤团聚体的形成。中小型土壤动物中的食碎屑者能够对凋落物起破碎作用^[3],土壤动物在森林生态系统中充当着消费者与分解者的角色,对物质循环和能量流动具有不可替代的作用^[4],目前,我国的土壤动物的研究主要集中在群落特征^[5-6]、物质循环^[7]以及环境效应^[8]等方面。

目前,国内外学者围绕土壤动物功能类群已经开展了大量研究工作,国外学者 Root 针对同功能类群物种首次提出了“种团”(Guild)一词,意为“以类似的方式利用同一类环境资源”的物种集团^[9-10]。随后又增加“摄食方式”(Mode of Feeding)作为第二个判别标准^[11],在对土壤微型节肢动物的研究中将不同的繁殖方式与代表这些方式的物种所对应环境条件联系起来,总结出 12 种“生活史策略”(life-history tactics);Brussaard 进一步将物种功能群分类标准总结为生活史策略、微生境、主要食物、摄食方式和生理生态学^[12]。土壤动物各类群大小及活动能力差异悬殊^[13],活动方式各不相同,但许多种类在功能上相近,形成几个功能类群,在系统中却起着相似的生态作用,占据着相同的生态位^[14]。按照土壤动物食性将土壤动物分为 5 种功能类群:植食性、捕食性、腐食性、菌食性、杂食性^[15-16]。以功能类群为单位来研究土壤动物的群落结构、生物量及其动态与生态过程的关系,是研究土壤动物生态学的重要途径^[17]。

海拔梯度差异导致的生物因子(植被种类和微生物群落)和非生物因子(光照、温度、湿度和土壤特征)的改变,在海拔梯度上形成差异明显的土壤—植被生态系统和环境特征,土壤动物群落季节变化与其栖息环境季节性节律密切相关,植被、土壤水分和温度的季节变化制约着土壤动物类群组成和个体数量的动态变化。关于华东地区(上海大金山岛)的研究表明,秋季土壤动物群落多样性最高,夏季个体土壤动物个体密度最高^[18]。西南地区(四川贡嘎山)关于土壤动物季节动态的研究显示,土壤动物群落密度在 11 月最高,7 月最低^[19]。土壤动物的个体数在不同季节同一地地呈现出“春高、夏低、秋高、冬低”的规律;土壤表层较深层植物根系聚集、土壤透气、透水性更好,土质疏松,养分含量及理化性质都比较适合土壤动物的生存,其次表层土壤动物食物来源更广。土壤动物在不同月份大多表现为在土壤表层不仅个体数多,且种类丰富,土壤动物功能群在土壤中的垂直分布具有表聚现象。探讨不同功能群与环境因子之间的关系、贡献及其对环境变化的响应,可为土壤生态系统科学管理提供科学依据。

杨桦次生林是阔叶红松林自然恢复演替规律的重要过渡阶段之一,是中国北方地区地带性植被的先锋类

型,天然次生林是中国重要的后备森林资源,在中国分布广泛。山杨(*Populus davidiana*)和白桦(*Betula platyphylla*)耐寒冷,耐干旱,生态适应性强,常以混交林的形式出现,更替其它树种形成次生阔叶林。关帝山分布有面积较大、植被类型多样、林相齐整、华北地区少有的天然次生林^[20]。关帝山杨桦次生林是该地区森林遭采伐、放牧、自然灾害等干扰破坏后恢复形成的主要次生林类型之一^[21]。杨桦混交林作为山西省西部重要的水源涵养林和生态林,对关帝山国有林管理局生态环境起着重要的支撑作用。目前对该区的研究主要集中在森林群落海拔格局^[22]、次生林的更新^[23]、土壤抗蚀性^[24]、凋落物持水^[25]等方面,目前仅有部分学者对关帝山华北落叶松林中土壤动物的群落结构和多样性有所研究^[26—28],少部分学者对关帝山杨桦混交林的种群结构有所研究。对于关帝山土壤动物功能群在杨桦混交林中的作用及其与环境因子的相互影响研究较少。

为此,本研究拟开展关帝山 1600—2200 m 海拔梯度上土壤动物功能群调查,旨在明确:(1)不同海拔杨桦混交林土壤动物功能群群落结构特征;(2)杨桦混交林土壤动物功能群时空分布规律;(3)环境因子对土壤动物功能群时空分布格局的影响。本研究结果可为关帝山土壤动物的多样性监测与保护提供科学参考,为保护区可持续经营与管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为吕梁山脉中段的山西关帝山国有林管理局(37°45′—37°55′N,111°22′—111°33′E)。保护区南北距离 15 km,东西距离 14.5 km,总面积 10443.5 hm²,其中有林地面积 7709.7 hm²,灌木林地面积 1165.9 hm²,海拔 1500—2831 m,属中温带到暖温带的过渡地带,是温带大陆性气候,年均温 4.3℃,相对湿度 70%,年降水量 820 mm,土壤类型为山地棕壤,无霜期 180 d。保护区内动植物资源丰富,以保护世界珍禽褐马鸡及华北落叶松、云杉天然次生林为主的森林和野生动物类型自然保护区。主要优势乔木树种为华北落叶松,伴生乔木有云杉、白桦、油松;林下灌木主要有蔷薇、黄刺玫、茶条槭等。保护区内土壤植被垂直分布带较明显,全区土壤类型由高海拔到低海拔分别为亚高山草甸土、山地棕壤土、山地淋溶褐土、山地褐土 4 类。是黄土高原生物多样性极其丰富的区域,植被覆盖率达 85%以上,被誉为黄土高原上的“绿色明珠”,有“华北落叶松故乡”之称。

1.2 样地设置

本研究于 2022 年及 2023 年的 5 月初、7 月中旬、10 月初在关帝山林区进行了为期两年的调查。在研究区域分别选取 1600、1800、2000、2200 m 四个海拔的杨桦混交林为研究对象(杨:桦=1:1),每个海拔选取分布均匀、距离适中,光照相似,大小为 30 m×30 m 的 3 个标准样地(表 1)。

表 1 关帝山不同海拔样地基本特征

Table 1 The basic characteristics of sample plots at different altitudes in Guandi Mountain

海拔 Elevation/m	北纬 North latitude	东经 East longitude	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope aspect	郁闭度 Canopy density	凋落物厚 Litter thickness/cm	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m
1600	37°49′11″	111°29′49″	19	半阳	0.78	6.3	17.5±0.72	13.4±1.64
1800	37°49′12″	111°29′52″	21	半阳	0.75	5.9	16.7±2.72	12.9±3.90
2000	37°52′34″	111°26′22″	18	半阳	0.76	6.5	17.2±1.25	12.6±1.55
2200	37°53′13″	111°25′54″	20	半阳	0.73	6.1	15.6±2.55	11.9±2.26

DBH:胸径 Diameter at breast height

1.3 采集样品与测定指标

每个样地按五点取样法,沿土壤剖面对 O(凋落物层)、A(0—10 cm 层)、B(10—20 cm 层)、C(20—30 cm 层)共 4 个土层进行取样(取样面积为 30 cm×30 cm),置于塑料布上就地过筛挑拣,将所拣土壤动物装入含有 75%酒精管中,标记好样地编号和采样时间,带回实验室进行统计鉴定。中小型土壤动物采用 Tullgren 干漏

斗法。按五点取样法,分别对 O、A、B、C 四层进行土壤取样(取样面积为 10 cm×10 cm),装入透气袋中带回驻地分离。干漏斗法原理是利用土壤动物避热性和趋湿性而设计的。土壤动物的分离装置在外形上可能有所不同,但其核心部分都是 3 部分组成:上部是烘烤热源(25 w 灯泡),灯泡上方要加罩;中部是铁皮漏斗和网筛(纱网或金属网),供装烘烤样本(土壤或苔藓等)之用,网眼大小视要求而定;下部是收集瓶(装有 75% 乙醇),动物通过网筛后被收集的小瓶内。在体视显微镜下,参照《中国土壤动物检索图鉴》^[29]、《中国土壤动物》^[30]和《幼虫分类学》^[31]等书籍进行初步鉴定并统计数量。大部分土壤动物鉴定到科水平,个别鉴定到目或亚目,按照土壤动物食性将土壤动物分为 5 种功能类群:植食性、捕食性、腐食性、菌食性、杂食性^[15-16],由于部分幼虫和成虫形态功能不同,故将幼虫和成虫分开统计,对于不确定的物种向相关领域专家请教进行辅助鉴定。

在每个样地内,按对角线法设置 3 个取样点进行土壤环境因子的测定与土壤取样。利用环刀(体积为 100 cm³)收集不同海拔样地内各土层土壤样品,同时利用手持土壤参数仪测定土壤的温度、地表相对湿度、土壤 pH 值、土壤电导率、土壤速效氮、土壤速效磷、土壤速效钾。标记好样地海拔信息,带回实验室后用作测定土壤孔隙度和土壤容重,采用烘干法测定土壤含水量。有机质(硫酸-重铬酸钾稀释热法)、全氮(半微量开氏法)、全磷(硫酸-次氯酸消煮法)进行化学性质的测定,各物理性质的测定与计算均参考中华人民共和国林业行业标准《森林土壤分析方法》^[32]进行。

1.4 数据处理与分析

运用 Excel 对采集的数据进行整理统计,采用多因素方差分析对海拔、月份和土层及其交互作用进行检验,单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小差异显著法(LSD)比较不同海拔、采样季节、土壤各层间的土壤动物功能群(类群数、个体数)差异;利用 R 4.3.3 中的“linkET”、“tidyverse”、“ggplot2”包对土壤动物功能群与环境因子进行 Mantel 检验,运用 Canoco5 对土壤动物功能群与环境因子进行冗余分析。主要绘图在 Origin 2022、R 4.3.3、GraphPad Prism 9.5.0 及 Canoco 5 进行,检验分析通过 IBM SPSS Statistics 22 完成。

2 结果与分析

2.1 不同海拔土壤动物功能群组成及结构

由表 2 可知,4 个海拔共捕获土壤动物 24434 只,隶属于 3 门 11 纲 34 目(亚目)127 个类群,类群水平上,海拔 1800 m 的土壤动物总类群数最多,为 103 类,海拔 2200 m 的总类群数最少,为 87 类;菌食性、杂食性土壤动物随海拔升高类群数变化大;植食性、捕食性土壤动物随海拔升高先上升后下降,海拔 1800 m 类群数最多,2200 m 最少;腐食性土壤动物随海拔升高类群数逐渐下降,海拔 2000 m 类群数最少,为 42 类,腐食性土壤动物类群数在各海拔的占比为 44.66%—48.28%,相对其他物种占比较大,个体水平上,土壤动物的总个体数随着海拔升高逐渐降低,海拔 1600 m 的总个体数最多,为 8748 只,海拔 2200 m 的总个体数最少,为 3678 只。菌食性、杂食性、捕食性、腐食性土壤动物随海拔升高个体数下降,海拔 1600 m 个体数最多,2000 m 最少,植食性土壤动物随海拔升高先下降在上升在上升,其中,腐食性土壤动物个体数在各海拔的占比为 54.34%—60.45%,相对其他类群的个体数占比较大;菌食性土壤动物类群数在各海拔占比为 1.94%—3.23%,但个体数占比达到 18.41%—20.86%。

2.2 不同海拔土壤动物功能群的时间变化特征

2.2.1 月份土壤动物功能群总类群、个体数分布情况

由图 1 可知,月份影响土壤动物功能群类群数和个体数的动态变化。从类群水平上,5 月份共捕获各功能群土壤动物 80 类,其中菌食性 2 类、杂食性 7 类、植食性 15 类、捕食性 19 类、腐食性 37 类;7 月份共捕获各功能群土壤动物 94 类,其中其中菌食性 3 类、杂食性 11 类、植食性 14 类、捕食性 23 类、腐食性 43 类;10 月份共捕获各功能群土壤动物 69 类,其中其中菌食性 2 类、杂食性 7 类、植食性 9 类、捕食性 18 类、腐食性 33 类;从个体水平上,5 月份中,菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性数量占比分别为 18.96%、3.72%、8.17%、

10.01%、59.13%;7 月份中,菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性数量占比分别为 21.62%、5.70%、10.60%、10.11%、51.97%;10 月份中,菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性数量占比分别为 16.56%、2.91%、7.46%、10.37%、62.71%。

表 2 不同海拔土壤动物功能类群组成

Table 2 Composition of functional groups of soil fauna at different altitudes

功能群 Functional Groups		海拔 Elevation/m							
		1600		1800		2000		2200	
		数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%
类群 Taxa	菌食性	2	1.96	2	1.94	3	3.23	2	2.30
	杂食性	12	11.76	11	10.68	11	11.83	11	12.64
	植食性	17	16.67	18	17.48	13	13.98	13	14.94
	捕食性	25	24.51	26	25.24	23	24.73	19	21.84
	腐食性	46	45.10	46	44.66	43	46.24	42	48.28
	总共	102	1	103	1	93	1	87	1
个体 Individual	菌食性	1763	20.15	1272	18.78	1092	20.86	677	18.41
	杂食性	314	3.59	277	4.09	244	4.66	223	6.06
	植食性	936	10.70	474	7.00	479	9.15	297	8.08
	捕食性	831	9.50	656	9.68	575	10.99	401	10.90
	腐食性	4904	56.06	4095	60.45	2844	54.34	2080	56.55
	总共	8748	1	6774	1	5234	1	3678	1

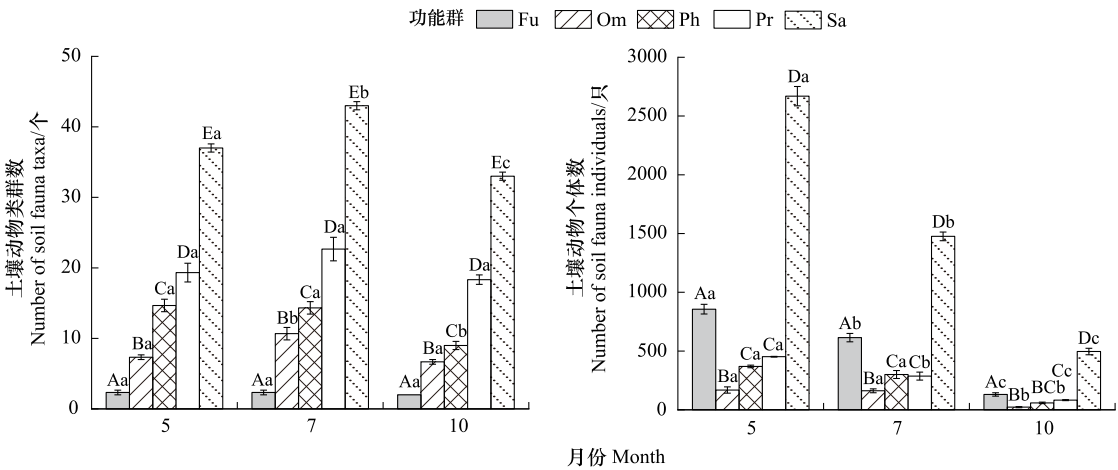


图 1 不同月份土壤动物功能群类群、个体数结构(平均值±标准误)

Fig.1 Structure of soil animal functional groups, taxa and individual number in different months(Mean±SE)

Fu: 菌食性 Fungivorous; Om: 杂食性 Omnivorous; Ph: 植食性 Phytophage; Pr: 捕食性 Predacity; Sa: 腐食性 Saprozoic; 不同大写字母表示同一月份不同功能群差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一功能群不同月份差异显著 ($P<0.05$)

2.2.2 不同海拔、月份对土壤动物功能群的影响

由表 3 可知,海拔对土壤动物功能群总类群数的主效应影响不显著,对总个体数的主效应影响显著;月份对土壤动物功能群总类群数和个体数主效应影响显著;海拔与月份交互影响不显著。

2.2.3 土壤动物功能群对海拔和月份的动态响应

由图 2 可知,土壤动物各功能群在月份中的分布随着海拔升高呈现动态变化,从类群数水平上,同一海拔不同月份中,菌食性土壤动物在月份中的分布差异不显著(表 4),杂食性和植食性土壤动物随着月份变化呈现先升高后下降的趋势,7 月份类群数最多,10 月份最少,捕食性土壤动物在海拔 1800 m 中,随着月份变化逐渐下降,腐食性土壤动物在海拔 2200 m 中,随着月份变化逐渐下降;同一月份不同海拔中,植食性土壤动物随

海拔升高逐渐下降。由图 3 可知,从个体数水平上,同一海拔不同月份中,菌食性、捕食性及腐食性土壤动物随着月份变化逐渐下降,杂食性土壤动物在海拔 2000 m 中随月份变化呈现先上升后下降趋势,植食性土壤动物在海拔 2200 m 中随月份变化呈现先上升后下降趋势;同一月份不同海拔中,菌食性和腐食性土壤动物随海拔升高逐渐下降,海拔 1600 m 个体数最多,2200 m 最少。

表 3 不同海拔、月份的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA for different altitudes and months

影响因子 Impact factor	df	总类群数 Total number of taxa		总个体数 Total number of individuals	
		F	P	F	P
海拔 Elevation	3	1.024	0.384	3.627	0.015
月份 Month	2	14.765	<0.001	18.152	<0.001
海拔×月份 Elevation×Month	6	0.166	0.985	0.831	0.548

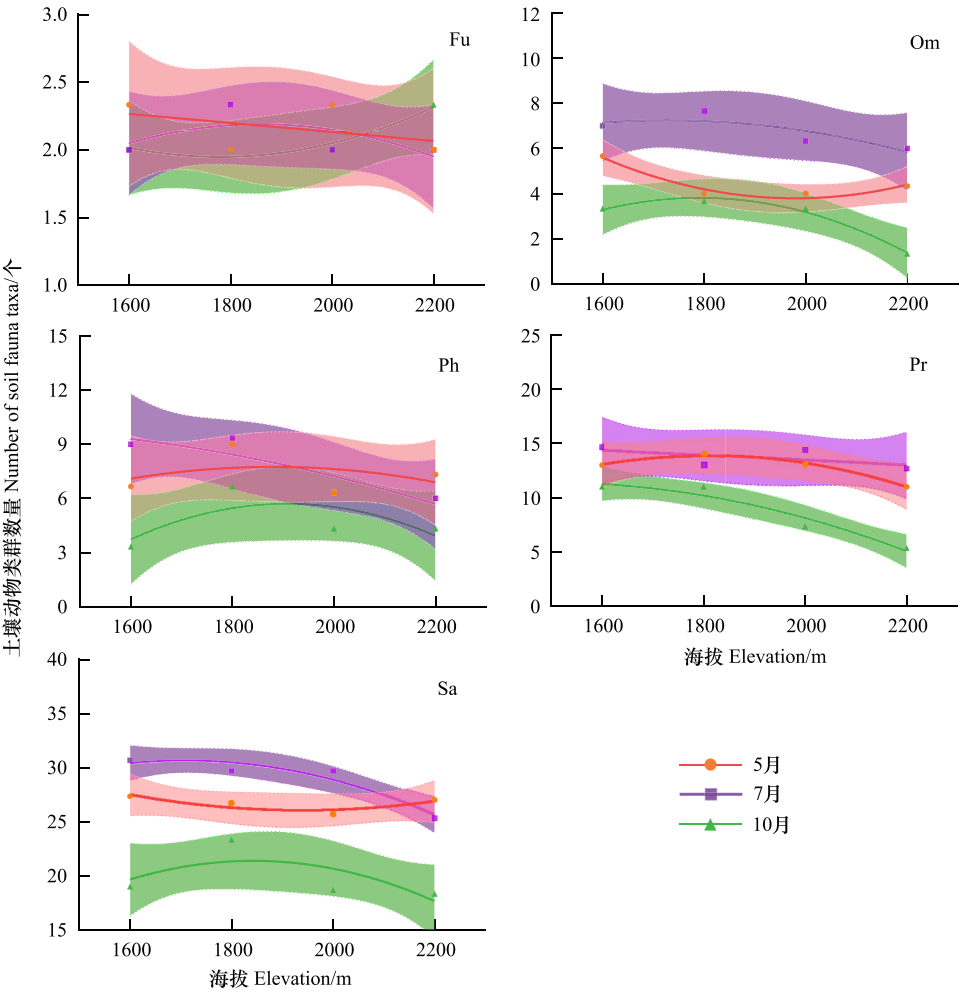


图 2 不同海拔土壤动物功能群类群数的月份动态变化

Fig.2 Monthly dynamics of the number of functional groups of soil fauna at different altitudes

不同颜色阴影区代表不同月份下 95% 的置信度带

2.3 不同海拔土壤动物功能群沿土层的垂直分布特征

2.3.1 各土层总物种、个数分布情况

由图 4 可知,土层影响土壤动物功能群类群数和个体数的动态变化,从类群水平上,O 层捕获各功能群土

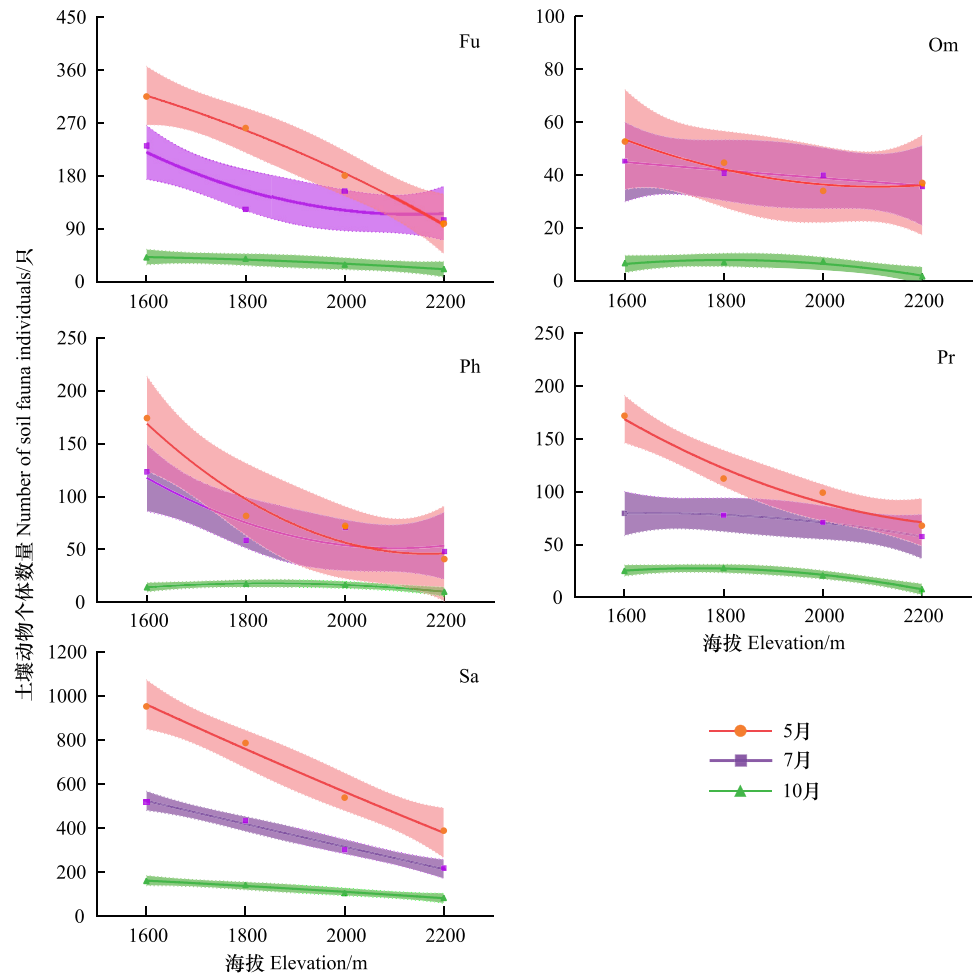


图 3 不同海拔土壤动物功能群类群数与个体数的月份动态变化

Fig.3 Monthly dynamic changes in the number of groups and individuals of soil fauna functional groups at different altitudes

表 4 不同海拔土壤动物功能群类群数与个体数的月份动态变化差异性(平均值±标准误)

Table 4 Differences in the monthly dynamics of the number of altitudes, taxa and individuals in soil fauna functional groups (Mean±SE)

功能群 Functional groups		海拔 Elevation/m	月份 Month		
			5 月	7 月	10 月
菌食性 Fungivorous	类群	1600	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa
		1800	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa
		2000	2.33±0.33Aa	2.33±0.33Aa	2.00±0.00Aa
		2200	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa
	个体	1600	315.33±24.11Aa	231.00±16.56Ba	41.33±9.91Ca
		1800	261.67±14.52Aa	123.33±11.55Bbc	39.00±4.73Ca
		2000	180.67±36.32Ab	154.33±10.33Ab	29.00±5.13Ba
		2200	98.67±13.84Ac	105.33±15.76Ac	21.67±3.18Ba
杂食性 Omnivorous	类群	1600	5.67±0.33ABa	7.00±1.15Aa	3.33±0.33Ba
		1800	4.00±0.58Ab	7.67±0.88Ba	3.67±0.88Aa
		2000	4.00±0.00Ab	6.33±0.33Ba	3.33±0.33Aa
		2200	4.33±0.33Ab	6.00±0.58Ba	1.33±0.33Cb
	个体	1600	52.67±15.68Aa	45.33±2.73Aa	6.67±2.03Ba
		1800	44.67±2.40Aa	40.67±6.06Aa	7.00±2.00Ba

续表

功能群 Functional groups		海拔 Elevation/m	月份 Month		
			5 月	7 月	10 月
植食性 Phytophage	类群	2000	34.00±4.58Aa	40.00±11.53Aa	7.33±0.88Ba
		2200	37.00±7.23Aa	35.67±5.78Aa	1.67±0.33Bb
		1600	6.67±0.88ABa	9.00±1.73Aa	3.33±1.20Ba
		1800	9.00±1.00Aa	9.33±0.88Aa	6.67±0.88Aa
		2000	6.33±0.88Aa	6.33±0.88Aa	4.33±0.33Aa
	个体	2200	7.33±0.88Aa	6.00±0.58Aa	4.33±1.33Aa
		1600	174.33±31.23Aa	123.33±20.25Aa	14.33±2.73Bab
		1800	81.67±5.17Ab	58.67±10.11Bb	17.67±0.88Ca
		2000	72.33±21.87Ab	70.67±9.68Ab	16.67±2.85Bab
		2200	41.00±10.44Ab	48.00±4.04Ab	10.00±1.15Bb
捕食性 Predacity	类群	1600	13.00±1.53Aa	14.67±1.20Aa	11.00±0.58Aa
		1800	14.00±1.15Aa	13.00±1.73Aa	11.00±0.58Aa
		2000	13.00±0.00Aa	14.33±1.86Aa	7.33±0.33Bb
		2200	11.00±0.58Aa	12.67±0.33Aa	5.33±0.88Bb
		1600	172.00±10.58Aa	79.67±12.25Ba	25.33±2.91Ca
	个体	1800	112.67±14.52Ab	78.00±5.00Ba	28.00±3.06Ca
		2000	99.33±2.19Ab	71.33±12.86Ba	21.00±1.53Ca
		2200	68.00±6.43Ac	57.67±7.97Aa	8.00±2.08Bb
		1600	27.33±1.45Aa	30.67±0.67Aa	19.00±1.00Ba
		1800	26.67±0.33Aa	29.67±0.88Ba	23.33±0.33Cb
腐食性 Saprozoic	类群	2000	25.67±0.88Aa	29.67±0.33Aa	18.67±1.86Ba
		2200	27.00±0.58Aa	25.33±0.67Ab	18.33±1.20Ba
		1600	953.67±74.90Aa	520.00±24.01Ba	161.00±3.61Ca
		1800	787.00±56.32Aa	434.33±12.44Bb	143.67±16.41Ca
		2000	539.33±45.91Ab	302.00±26.50Bc	106.67±3.48Cb
	个体	2200	389.00±7.77Ab	219.67±9.96Bd	84.67±12.47Cb

不同大写字母表示同一海拔不同月份差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一月份不同海拔差异显著 ($P<0.05$)

壤动物共 103 类, 其中菌食性 2 类、杂食性 12 类、植食性 17 类、捕食性 25 类、腐食性 43 类; A 层捕获各功能群土壤动物共 74 类, 其中菌食性 2 类、杂食性 8 类、植食性 10 类、捕食性 15 类、腐食性 39 类; B 层捕获各功能群土壤动物共 57 类, 其中菌食性 2 类、杂食性 4 类、植食性 8 类、捕食性 12 类、腐食性 31 类; C 层捕获各功能群土壤动物共 42 类, 其中菌食性 2 类、杂食性 3 类、植食性 7 类、捕食性 8 类、腐食性 22 类; 从个体水平上, O 层中, 菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性数量占比分别为 21.01%、4.62%、9.08%、10.40%、54.90%; A 层中, 菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性数量占比分别为 18.52%、3.63%、8.62%、9.30%、59.92%; B 层中, 菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性数量占比分别为 16.38%、4.47%、9.30%、10.13%、59.73%; C 层中, 菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性数量占比分别为 15.27%、4.24%、8.17%、10.18%、62.14%。

2.3.2 不同海拔、土层对土壤动物功能群的影响

由表 5 可知, 海拔对土壤动物功能群总类群数和个体数的主效应影响显著, 土层对土壤动物功能群总类群数和个体数的主效应影响显著, 海拔和土层交互影响不显著。

2.3.3 土壤动物功能群对海拔和土层的动态响应

由图 5 可知, 土壤动物各功能群在土层中的分布随着海拔升高呈现动态变化, 从类群数水平上, 同一海拔不同土层中, 菌食性土壤动物在各土层中的分布差异不显著 (表 6), 其余各功能群随土层加深类群数逐渐减少, 总体上看类群数 O 层>A 层>B 层>C 层; 同一土层不同海拔中, 杂食性、捕食性 O 层土壤动物随海拔升高逐渐下降, 其余各土层土壤动物随海拔升高呈现先上升后下降趋势; 植食性、腐食性各土层土壤动物随海拔升

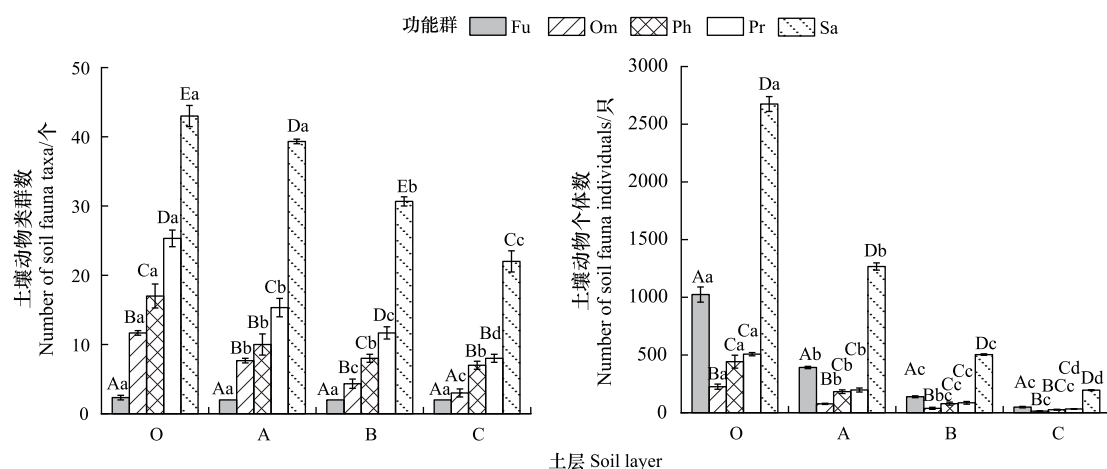


图 4 不同土层土壤动物功能群类群、个体数结构(平均值±标准误)

Fig.4 Structure of soil fauna functional groups, groups and individual numbers in different soil layers(Mean±SE)

O: 凋落物层 Litter layer; A: 0—10 cm 层 0—10 cm layer; B: 10—20 cm 层 10—20 cm layer; C: 20—30 cm 层 20—30 cm layer; 不同大写字母表示同一功能群不同土层差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一土层不同功能群差异显著($P < 0.05$)

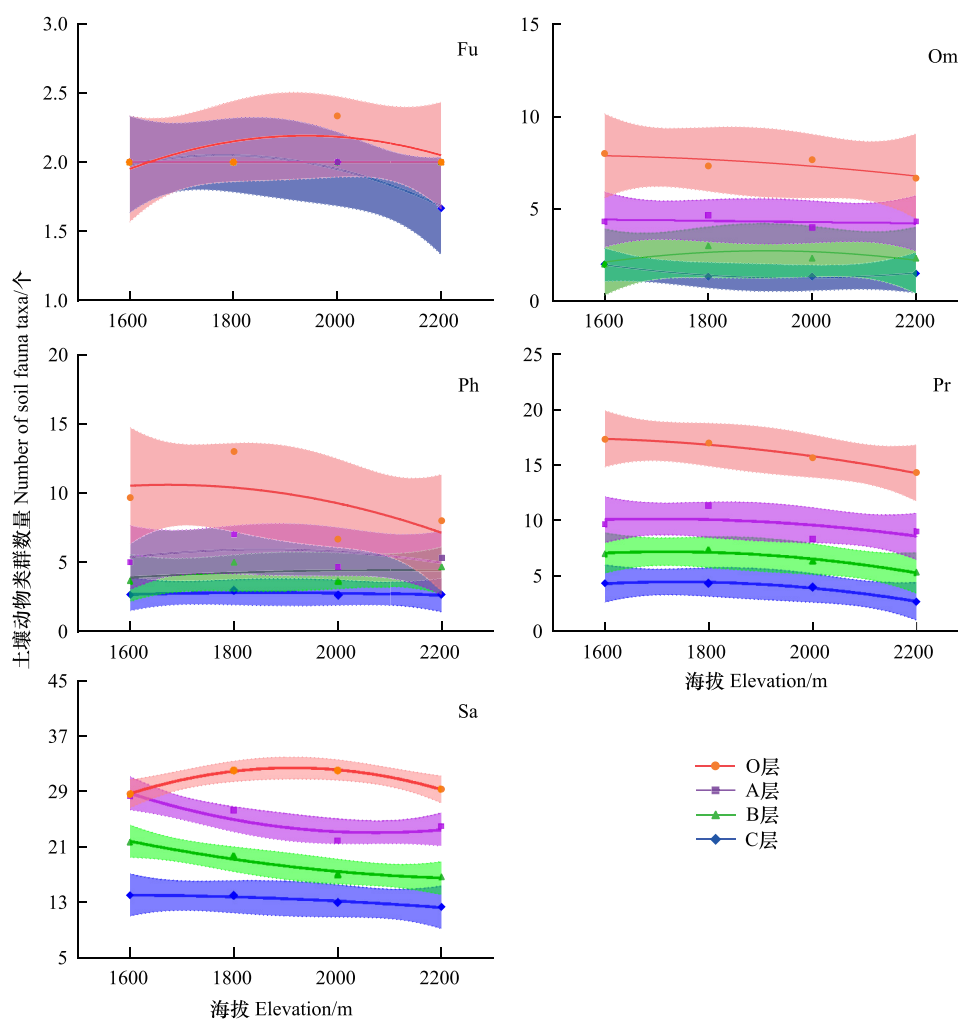


图 5 不同海拔土壤动物功能群的土层动态变化

Fig.5 Dynamic changes of soil layer in soil fauna functional groups, altitude, number of groups

高呈现先上升后下降的趋势,海拔 1800 m 类群数最多,海拔 2200 m 最少。由图 6 可知,从个体数水平上,同一海拔不同土层中,各功能群个体数 O 层>A 层>B 层>C 层,同一土层不同海拔中,各功能群土壤动物在各土层中随海拔升高逐渐下降,海拔 1600 m 个体数最多,海拔 2200 m 个体数最少。

表 5 不同海拔、土层的双因素方差分析

Table 5 Two-way ANOVA for different elevations and soil layers

影响因子 Impact factor	df	总类群数 Total number of taxa		总个体数 Total number of individuals	
		F	P	F	P
海拔 Elevation	3	3.215	0.025	5.808	<0.001
土层 Soil layer	3	126.292	<0.001	46.178	<0.001
海拔×土层 Elevation×Soil layer	9	0.376	0.945	1.223	0.287

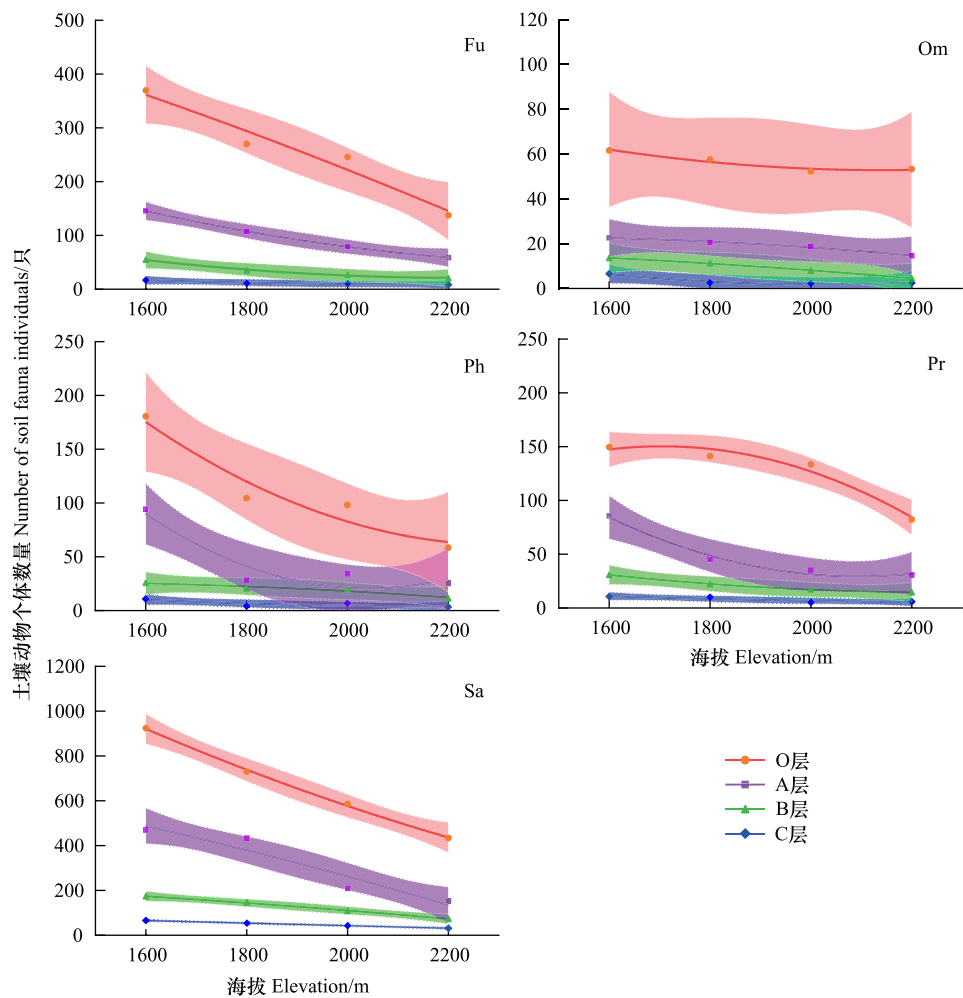


图 6 不同海拔土壤动物功能群个体数的土层动态变化

Fig.6 Dynamic changes of soil layer in the number of altitudes, taxa and individuals of soil fauna functional groups

2.4 土壤动物功能群环境驱动因素

2.4.1 土壤动物与环境因子的 Mantel 分析

由图 7 可知,杂食性土壤动物跟环境因子的相关性不显著 ($P>0.05$),植食性土壤动物与土壤酸碱度、电导率、速效氮、速效钾呈极显著相关;捕食性土壤动物与土壤酸碱度呈极显著相关,与速效氮、速效钾呈显著相关;杂食性土壤动物与温度、土壤酸碱度呈极显著相关,与速效氮、速效磷、速效钾和毛管持水量呈显著相关;

菌食性土壤动物与土壤酸碱度、速效氮、速效磷、速效钾呈极显著相关,与温度、电导率呈显著相关。

表 6 不同海拔土壤动物功能群类群数与个体数的土层动态变化差异性(平均值±标准误)

Table 6 Differences in the dynamic changes of soil layer in the number of altitude groups and the number of individuals in soil animal functional groups(Mean±SE)

功能群 Functional groups		海拔 Elevation/m	土层 Soil Layer			
			O 层	A 层	B 层	C 层
菌食性 Fungivorous	类群	1600	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa
		1800	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa
		2000	2.33±0.33Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa
		2200	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	2.00±0.00Aa	1.67±0.33Aa
	个体	1600	369.67±22.81Aa	145.67±7.26Ba	55.00±13.23Ca	17.33±5.78Ca
		1800	270.33±14.45Ab	107.67±5.93Bb	35.00±5.13Cab	11.00±4.36Ca
		2000	246.00±35.50Ab	79.33±12.57Bc	27.33±4.18BCb	11.33±1.45Ca
		2200	137.67±6.69Ac	59.00±4.73Bc	20.67±2.67Cb	8.33±0.88Ca
杂食性 Omnivorous	类群	1600	8.00±1.53Aa	4.33±0.88Ba	2.00±1.00Ba	2.00±0.58Ba
		1800	7.33±1.20Aa	4.67±0.33Ba	3.00±1.00BCa	1.33±0.33Ca
		2000	7.67±0.67Aa	4.00±1.00Ba	2.33±0.67BCa	1.33±0.33Ca
		2200	6.67±0.67Aa	4.33±0.33Ba	2.33±0.67Ca	1.00±0.58Ca
	个体	1600	61.67±20.67Aa	22.67±2.73Ba	13.67±3.28Ba	6.67±6.48Ba
		1800	57.67±6.98Aa	20.67±3.67Ba	11.33±4.67BCa	2.67±0.88Ca
		2000	52.33±8.35Aa	18.67±6.57Ba	8.00±2.65Ba	2.33±0.33Ba
		2200	53.33±8.21Aa	14.67±1.20Ba	4.67±1.20Ba	1.67±1.20Ba
植食性 Phytophage	类群	1600	9.67±1.86Aab	5.00±1.00Ba	3.67±1.20Ba	2.67±0.33Ba
		1800	13.00±1.53Aa	7.00±0.58Ba	5.00±0.58BCa	3.00±0.58Ca
		2000	6.67±0.88Ab	4.67±1.20ABa	3.67±0.33Ba	2.67±0.67Ba
		2200	8.00±1.53Aab	5.33±0.88ABa	4.67±0.33Ba	2.67±0.67Ba
	个体	1600	180.67±21.40Aa	94.33±20.42Ba	26.00±5.03Ca	11.00±3.61Ca
		1800	104.67±25.89Ab	28.33±6.17Bb	20.67±7.31Ba	4.33±0.67Bab
		2000	98.33±19.75Ab	34.33±8.65Bb	20.00±4.04Ba	7.00±1.00Bb
		2200	58.67±14.31Ab	25.33±4.70Bb	11.67±1.86Ba	3.33±0.88Bb
捕食性 Predacity	类群	1600	17.33±1.45Aa	9.67±0.88Bab	7.00±0.58BCa	4.33±0.88Ca
		1800	17.00±1.15Aa	11.33±0.33Ba	7.33±0.67Ca	4.33±1.20Da
		2000	15.67±1.33Aa	8.33±1.20Bb	6.33±1.20BCa	4.00±0.58Ca
		2200	14.33±0.88Aa	9.00±0.00Bab	5.33±0.88Ca	2.67±0.33Da
	个体	1600	149.67±8.51Aa	85.67±15.60Ba	31.00±3.79Ca	10.67±1.45Ca
		1800	141.33±4.41Aa	45.00±7.51Bb	22.33±3.67Cab	10.00±2.65Ca
		2000	133.67±9.74Aa	35.33±6.78Bb	17.33±4.41BCab	5.33±0.33Ca
		2200	82.33±3.18Ab	30.67±2.96Bb	14.67±5.17Cb	6.00±1.00Ca
腐食性 Saprozoic	类群	1600	28.67±1.20Aa	28.33±0.88Aa	21.67±0.67Ba	14.00±2.52Ca
		1800	32.00±1.00Aa	26.33±1.20Bab	19.67±1.20Cab	14.00±0.00Da
		2000	32.00±0.58Aa	22.00±0.58Bc	17.00±0.58Cb	13.00±1.58Da
		2200	29.33±0.88Aab	24.00±1.00Bbc	16.67±1.67Cb	12.33±0.33Da
	个体	1600	924.33±23.08Aa	470.33±30.34Ba	174.00±8.50Ca	66.00±3.06Da
		1800	730.67±40.40Ab	433.67±36.20Ba	146.00±12.74Ca	54.67±2.60Db
		2000	586.33±42.66Ac	209.33±19.78Bb	109.33±12.41Cb	43.00±1.73Cc
		2200	434.00±3.21Ad	153.67±6.44Bb	74.00±7.81Cb	31.67±2.96Dd

O:凋落物层 Litter layer;A:0—10cm 层 0—10cm layer;B:10—20cm 层 10—20cm layer;C:20—30cm 层 20—30cm layer;不同大写字母表示同一海拔不同土层差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一海拔不同土层差异显著($P<0.05$)

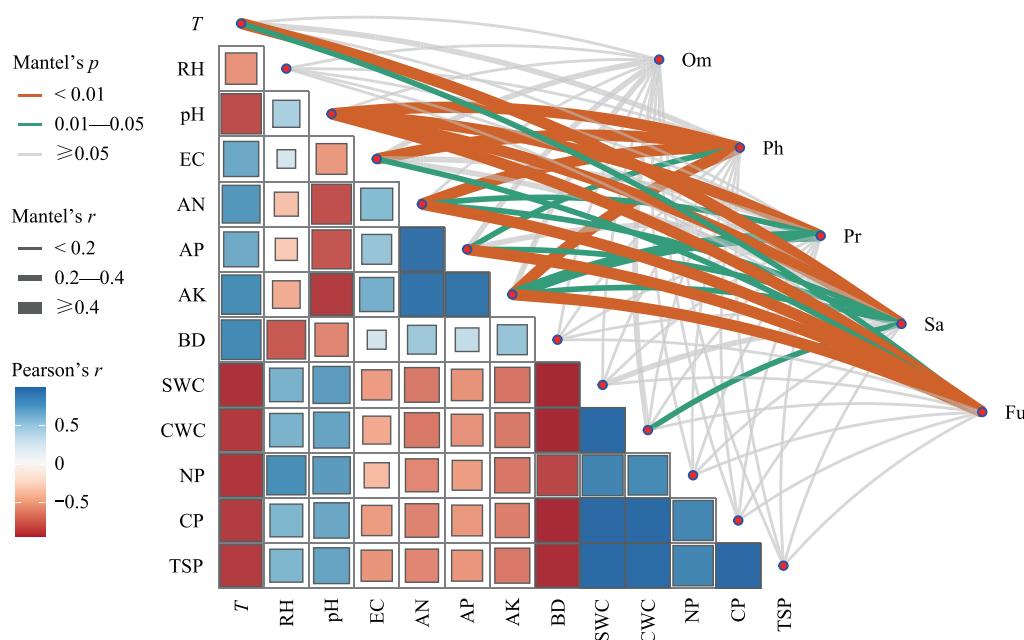


图7 土壤动物功能群与环境因子的 Mantel 检验

Fig.7 Mantel test of soil fauna functional groups and environmental factors

Fu: 菌食性 Fungivorous; Om: 杂食性 Omnivorous; Ph: 植食性 Phytophage; Pr: 捕食性 Predacity; Sa: 腐食性 Saprophytic; T: 温度 Temperature; RH: 相对湿度 Relative humidity; EC: 电导率 Electrical conductivity; AN: 速效氮 Available N; AP: 速效磷 Available P; AK: 速效钾 Available K; BD: 土壤容重 Soil bulk density; SWC: 最大持水量 Maximum water holding capacity; CWC: 毛管持水量 Capillary water holding capacity; NP: 非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; CP: 毛管孔隙度 Capillary porosity; TSP: 总孔隙度 Total porosity

2.4.2 土壤动物功能群与环境因子的冗余分析

将土壤动物各功能类群与环境因子进行冗余分析,由图8可知,排序轴1解释了60.16%功能群与环境因子的关系,排序轴2解释了11.33%与环境因子的关系。排序轴1与全氮、土壤容重、温度、速效磷、速效钾呈正相关;与有机碳、土壤pH、全磷、最大持水量、总孔隙度、相对湿度呈负相关;排序轴2与土壤pH、有机碳、全氮、土壤容重、温度呈正相关;与全磷、最大持水量、总孔隙度、相对湿度、速效磷、速效钾呈负相关。植食性、杂食性、捕食性、腐食性及菌食性土壤动物与土壤容重、温度、速效磷、速效钾呈正相关,与相对湿度、总孔隙度、最大持水量、全磷、土壤pH、有机碳呈负相关。

3 讨论

3.1 海拔对土壤动物功能群时间动态的影响

土壤动物群落结构受气候^[33]、坡向^[34]、植被类型^[35]、海拔^[36]和土壤等立地条件的影响。土壤动物的生命活动受到温度和降水的影响,因此随着季节变化,其群落结构会因温度和降水条件的变化而形成季节动态。本研究中,同一功能群不同月份中,菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性均表现为7月>5月>10月;同一月份不同功能群中,变化趋势为腐食性>捕食性>植食性>杂食性>菌食性,其中7月份土壤动物各功能群类群数最多,10月份土壤动物各功能群类群数最少。各月份中土壤动物功能群类群数腐食性最多,菌食性最少。从个体水平上,同一功能群不同月份中,菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性均表现为5月>7月>10月,同一月份不同功能群中,腐食性>菌食性>捕食性>植食性>杂食性,5月份总个体数最多,10月份最少;各月份中腐食性占比最大,杂食性最少。这与高敏等^[37]的研究结果相似,与史沉鱼等^[38]、金生英等^[39]的研究结果不一致。这可能与7月份当地降雨量多,土壤含水量高,土壤表层枯落物生物量堆积,随着枯落物覆盖厚度的

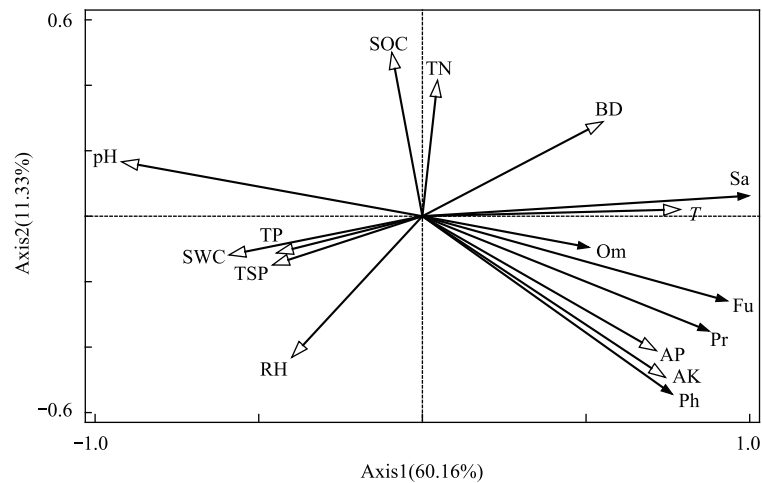


图 8 土壤动物功能群与环境因子的冗余分析

Fig.8 Redundancy analysis of soil fauna functional groups and environmental factors

SOC:有机碳 Organic carbon; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus

增加,土壤水分蒸发的能力减弱,导致土壤含水量过高,而降低了土壤动物功能群类群数和个体数。此外,10月份较其他月份气温较低,植物开始慢慢枯落,土壤逐渐上冻,土壤动物生存条件相对较差;因此,10月份土壤动物功能群类群数和个体数最低。

3.2 海拔对土壤动物功能群垂直分布的影响

土壤动物的在土层中的垂直分布与植被、土壤环境、气候等分布密切相关。本研究中,研究区各海拔梯度上,土壤动物功能群的表聚现象非常明显,同一功能群不同土层中,菌食性表现为 O 层>A 层=B 层=C 层,杂食性、植食性、捕食性、腐食性均表现为 O 层>A 层>B 层>C 层,其中,土壤 O 层类群数最多,C 层最少,且各土层中腐食性类群数最多,菌食性最少。同一土层不同功能群中,O、A、B、C 层中均表现为腐食性>捕食性>植食性>杂食性>菌食性;从个体水平上,同一功能群不同土层中,菌食性、杂食性、植食性、捕食性、腐食性均表现为 O 层>A 层>B 层>C 层;同一土层不同功能群中,腐食性>菌食性>捕食性>植食性>杂食性,O 层各功能群总个体数最多,C 层最少,且在各土层中,腐食性土壤动物占比最大,杂食性占比最少。这与严萤^[40]的研究结果相似,土壤动物的分布之所以有分层现象,可能是因为土壤表层较深层植物根系聚集、土壤透气、透水性更好,土质疏松,养分含量及理化性质都比较适合土壤动物的生存,其次表层土壤动物食物来源更广。而随着土层加深,土壤动物取食的食物种类和数量及小生境因子如温度、湿度、pH、有机质等降低,从而导致土壤动物的类群数和个体数也相应的减少。

3.3 土壤理化环境变化对动物功能群的影响

环境因子是影响土壤动物群落组成的重要因素之一,研究土壤动物与环境因子之间的关系,对深刻了解土壤生态系统的运行机制、评价其功能具有重要意义,在土壤环境的各项因子中,土壤湿度、温度及养分等是土壤动物分布的主要限制因子。大量研究表明,将土壤动物与土壤环境因子排序分析,能较好的解释土壤环境因子对土壤动物群落分布的影响^[41],本研究发现,土壤动物各功能类群对于土壤 pH 表现出明显的负向响应,而与温度、土壤酸碱度、电导率、速效氮、速效磷、速效钾呈正相关,这与白哲^[42]的研究结果一致。相关研究表明,土壤动物对于其生存环境具有一定适应性,微酸和中性条件下更适宜土壤动物生存^[43]。

4 结论

本研究调查了关帝山不同海拔杨桦混交林中土壤动物功能群群落结构及其与环境因子的关系,结果表明:研究区中共获得土壤动物 24434 只,隶属于 3 门 11 纲 34 目(亚目)127 个类群;土壤动物总功能群在类群

水平上,总体上随海拔升高而降低,随月份变化先上升后降低;在个体水平上,随海拔升高而降低,随月份变化而减少,腐食性土壤动物在各功能群中占比最大。土壤动物各功能群在表层具有表聚现象,在凋落物层各功能群类群数最为丰富,数量最多。土壤环境因素对各功能群影响程度具有差异,通过 Mantel 检验及冗余分析表明:各功能群与土壤酸碱度、速效磷、速效氮、速效钾响应程度最大。

参考文献 (References):

- [1] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社. 1992.
- [2] Giller P S. The diversity of soil communities, the 'poor man's tropical rainforest'. *Biodiversity & Conservation*, 1996, 5: 135-168.
- [3] Maaß S, Caruso T, Rillig M C. Functional role of microarthropods in soil aggregation. *Pedobiologia*, 2015, 58(2-3): 59-63.
- [4] Huang W, Siemann E, Xiao L, Yang X, Ding J. Species-specific defence responses facilitate conspecifics and inhibit heterospecifics in above-belowground herbivore interactions. *Nature Communications*, 2014, 5: 4851.
- [5] 廖崇惠, 李健雄, 黄海涛. 亚热带森林土壤动物群落多样性研究. *生态学报*, 1997, 17(5): 549-555.
- [6] 殷秀琴, 王海霞, 周道玮. 松嫩草原区不同农业生态系统土壤动物群落特征. *生态学报*, 2003, 23(6): 1071-1078.
- [7] 杨效东, 邹晓明. 西双版纳热带季节雨林凋落叶分解与土壤动物群落两种网孔分解袋的分解实验比较. *植物生态学报*, 2006, 30(5): 791-801.
- [8] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 薛璟花, 李德军. 模拟氮沉降对苗圃地土壤动物群落的影响. *生态环境*, 2004, 13(4): 487-492.
- [9] Root R B. The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher. *Ecological Monographs*, 1967, 37(4): 317-350.
- [10] Root R B. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats; the fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs*, 1973, 43(1): 95-124.
- [11] Siepel H. Life-history tactics of soil microarthropods. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18(4): 263-278.
- [12] Brussaard L. Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(13): 123-135.
- [13] 高岩, 骆永明. 蚯蚓对土壤污染的指示作用及其强化修复的潜力. *土壤学报*, 2005, 42(1): 140-148.
- [14] 孙儒泳. 动物生态学原理. 北京: 北京师范大学出版社, 1987.
- [15] 黄玉梅. 巨桉人工林土壤动物生态初步研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006.
- [16] 周泓杨, 张丹桔, 张捷, 赵燕波, 赵波, 魏大平, 张健. 马尾松人工林郁闭度对大型土壤动物功能群的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1860-1868.
- [17] 张雪萍, 侯威岭, 陈鹏. 东北森林土壤动物同功能种团及其生态分布. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(4): 370-374.
- [18] 罗鼎晖, 李翔, 骆蓓蓓, 许治山, 妥彬, 阎恩荣, 由文辉. 大金山岛常绿阔叶林和落叶阔叶林中小型土壤动物群落特征. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(3): 349-357.
- [19] 周育臻, 吴鹏飞. 贡嘎山东坡森林小型土壤节肢动物群落多样性与时空分布. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 586-599.
- [20] 杨秀清, 韩有志. 关帝山次生杨桦林种群结构与立木的空间点格局. *西北植物学报*, 2010, 30(9): 1895-1901.
- [21] 陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [22] 郭汉清, 张勇, 李特, 秦智通. 关帝山典型针叶林土壤理化性状研究. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2014, 34(2): 162-167.
- [23] 秦浩, 张殷波, 董刚, 张峰. 山西关帝山森林群落物种、谱系和功能多样性海拔格局. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 762-773.
- [24] 李璟, 周朵朵, 陈颂, 闫海冰, 杨秀清. 关帝山云杉次生林树木更新与土壤养分的空间关联性. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2363-2370.
- [25] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 79-84.
- [26] 梁文俊, 魏曦, 赵伟文, 冯燕辉, 卜瑞瑛, 王凯娜. 关帝山不同林分结构华北落叶松林枯落物水文效应. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 324-329, 337.
- [27] 赵世魁, 刘贤谦. 关帝山华北落叶松天然林和人工林土壤动物的群落多样性. *林业科学*, 2007, 43(6): 105-110.
- [28] 王月东. 关帝山华北落叶松林大型土壤动物多样性的研究. *山西林业科技*, 2006, 35(4): 23-26.
- [29] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社. 2000.
- [30] 尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社. 2000.
- [31] 钟觉民. 幼虫分类学. 北京: 中国农业出版社. 1990.
- [32] 张万儒. 森林土壤分析方法. 江西: 江西林业科技. 1989.
- [33] Frak E, Ponge J F. The influence of altitude on the distribution of subterranean organs and humus components in *Vaccinium myrtillus* carpets. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13(1): 17-26.
- [34] 邵华木, 王宗英, 张光生. 九华山东西坡不同垂直带谱土壤动物群落山地研究. *山地研究*, 1995, 13(1): 14-21.
- [35] 陈颖彪, 殷秀琴. 凉水地区不同林型土壤动物群落研究. *上海师范大学学报: 自然科学版*, 2000, 29(2): 79-84.
- [36] 佟富春, 金哲东, 王庆礼, 肖以华. 长白山北坡土壤动物群落物种共有度的海拔梯度变化. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1723-1728.
- [37] 高敏, 马香丽, 杨晋宇, 黄选瑞, 许洪军, 孙海静. 围封对冀北山地华北落叶松人工林土壤动物群落结构的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(3): 141-152, 159.
- [38] 史沉鱼, 李晓东, 覃国乐, 韦仕珍, 张翔, 容万韬, 罗丰, 覃杏芬. 广西喀斯特地区甘蔗园土壤动物群落多样性及季节动态. *南方农业学报*, 2016, 47(6): 941-946.
- [39] 金生英, 严林, 马玉寿, 陈生翠, 陈伶俐, 马洪福, 李琳琳. 三江源区人工草地中小型土壤动物群落特征及季节变化. *草地学报*, 2014, 22(5): 954-960.
- [40] 严莹. 浙江百山祖自然保护区土壤动物群落多样性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [41] 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.
- [42] 白哲. 环境因子对浙江省土壤动物多样性及其分布格局的影响[D]. 金华: 浙江师范大学, 2021.
- [43] 李红月, 殷秀琴, 马辰, 郭玉梅. 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. *土壤学报*, 2017, 54(4): 1018-1028.

附表 1 关帝山杨桦混交林土壤动物群落结构组成
Attached Table 1 Soil fauna structure of poplar-birch mixed forest in Guandi Mountain

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	个体数 Individual	占比 Ratio/%	多度 Abundance	功能群 Functional groups	
节肢动物门 Arthropoda	昆虫纲 Insecta	半翅目 Hemiptera	蝽科	2	0.01	+	Ph	
			Pentatomidae stinkbug					
			奇蝽科	8	0.03	+	Ph	
			Enicocephalidae					
			土蝽科	15	0.06	+	Ph	
			Cydnidae					
			叶蝉科	8	0.03	+	Ph	
			Cicadellidae					
			长蝽科	1	0.00	+	Ph	
			Lygaeidae					
			蚜科	1	0.00	+	Om	
			Aphidinae					
			虫齿目 Psocoptera		29	0.12	+	Ph
			革翅目 Deramptera	肥螋科	5	0.02	+	Om
		Anisolabididae						
		绵螋科		18	0.07	+	Om	
		Spongiphoridae						
		球螋科		15	0.06	+	Om	
		Forficulidae						
		鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae		1	0.00	+	Ph	
		膜翅目 Hymwnoptera		切叶蚁亚科	63	0.26	+	Ph
			Myrmicinae					
			蚁科	29	0.12	+	Om	
			Formicidae					
		鞘翅目 Coleoptera	步甲科	18	0.07	+	Pr	
			Carabidae					
			金龟科	7	0.03	+	Ph	
			Scarabacidae					
			叩甲科	5	0.02	+	Ph	
			Elalcridae					
			叶甲科	9	0.04	+	Ph	
			Chrysomelidae					
			隐翅虫科	11	0.05	+	Pr	
			Staphylinidae					
			虎甲科	1	0.00	+	Pr	
			Cicindelidae					
			小蠹科	1	0.00	+	Ph	
			Scolytidae					
			隐翅虫科	167	0.68	+	Pr	
			Staphylinidae					
			鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	粗角叩甲科	11	0.05	+	Sa
			Throscidae larvae					
			花萤科	38	0.16	+	Pr	
			Cantharidae larvae					
			金龟科	25	0.10	+	Ph	
			Scarabaeoidea					
			叩甲科	58	0.24	+	Ph	
			Elateridae					
			拟步甲科	1	0.00	+	Ph	
			Tenebrionidae larvae					

续表

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	个体数 Individual	占比 Ratio/%	多度 Abundance	功能群 Functional groups
			球蕈甲科 Leiodidae larvae	2	0.01	+	Pr
			苔甲科 Scydmaenidae larvae	1	0.00	+	Ph
			象甲科 Curculionidae larvae	84	0.34	+	Ph
			叶甲科 Chrysomelidae	83	0.34	+	Ph
			蚊甲科 Pselaphidae larvae	71	0.29	+	Pr
			缨甲科 Ptiliidae larvae	340	1.39	++	Sa
		双翅目蛹 Diptera pupae	双翅目蛹 Diptera larvae	5	0.02	+	Sa
		双翅目幼虫 Diptera larvae	粗股粪蚊科 Hyperoscelididae larvae	4	0.02	+	Sa
			大蚊科 Tipulidae larvae	25	0.10	+	Sa
			冬大蚊科 Trichoceridae larvae	12	0.05	+	Sa
			粪蚊科 Scatopsidae larvae	23	0.09	+	Sa
			腐木蝇科 Clusiidae larvae	44	0.18	+	Sa
			花蝇科幼虫 Anthomyiidae larvae	18	0.07	+	Sa
			尖眼蕈蚊科 Sciaridae larvae	30	0.12	+	Sa
			剑虻科 Therevidae larvae	2	0.01	+	Pr
			丽蝇科 Calliphoridae larvae	63	0.26	+	Sa
			毛蠓科 Psychodidae larvae	39	0.16	+	Sa
			瘦足蝇科 Micropezidae larvae	12	0.05	+	Sa
			伪大蚊科 Anisopodidae larvae	71	0.29	+	Sa
			蕈蚊科 Mycetophilidae larvae	1	0.00	+	Sa
			摇蚊科 Chironomidae larvae	232	0.95	+	Sa
			蝇科 Muscidae larvae	150	0.61	+	Sa
			鹬虻科 Rhagionidae larvae	15	0.06	+	Pr
			长角毛蚊科 Hesperinidae larvae	65	0.27	+	Om
			长足虻科 Dolichopodidae larvae	17	0.07	+	Ph
		缨翅目 Thysanoptera	蓟马科 Thripidae	8	0.03	+	Ph
		直翅目	蚱科	2	0.01	+	Ph

续表

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	个体数 Individual	占比 Ratio/%	多度 Abundance	功能群 Functional groups
		Orthoptera	Tetragoidea				
	软甲纲	等足目	潮虫科	2	0.01	+	Sa
	Malacostraca	Isopoda	Oniscidae				
			鼠妇科	2	0.01	+	Sa
			Porcellionidae				
	双尾纲		康蚱科	42	0.17	+	Om
	Diplura		Campodeidae				
	蛛形纲	革螨亚目	上革螨科	67	0.27	+	Pr
	Arachnida	Gamasida	Ologamasidae				
		甲螨亚目	奥甲螨群	272	1.11	++	Pr
		Oribatida	Oppoid				
			大翼甲螨群	503	2.06	++	Om
			Galumnoid				
			缝甲螨群	252	1.03	++	Pr
			Hypochthonioid				
			古甲螨群	35	0.14	+	Sa
			Palacosomatic				
			尖棱甲螨群	10	0.04	+	Sa
			Ceratozetoid				
			懒甲螨群	1955	8.00	++	Sa
			Notheroid				
			丽甲螨群	1312	5.37	++	Sa
			Liacaroid				
			罗甲螨群	157	0.64	+	Sa
			Lohmannioid				
			裸珠甲螨群	173	0.71	+	Sa
			Gymnodamaeoid				
			螨类若虫	789	3.23	++	Sa
			Nymph of mit				
			若甲螨群	1752	7.17	++	Fu
			Oribatuloid				
			沙甲螨群	17	0.07	+	Sa
			Eremuloid				
			跳甲螨群	279	1.14	++	Sa
			Zetorchestoid				
			小赫甲螨群	48	0.20	+	Sa
			Hermannielloid				
			小棱甲螨群	3	0.01	+	Sa
			Microzetoid				
			折甲螨总群	276	1.13	++	Sa
			Ptychoid				
			蛛甲螨群	1683	6.89	++	Sa
			Damaeoid				
		前气门亚目	绒螨科	6	0.02	+	Pr
		Prostigmata	Trombididae				
			矮蒲螨科	2	0.01	+	Fu
			Pygmephoridae				
			盾螨科	193	0.79	+	Sa
			Scutacaridae				
			跗线螨科	1682	6.88	++	Ph
			Tarsonemidae				
			盲蛛螨科	749	3.07	++	Pr
			Caeculidae				

续表

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	个体数 Individual	占比 Ratio/%	多度 Abundance	功能群 Functional groups
			微离螨科 Microdispidae	33	0.14	+	Sa
			吸螨科 Bdellidae	18	0.07	+	Ph
			隐颚螨科 Cryptognathidae	26	0.11	+	Pr
			长须螨科 Stigmaeidae	337	1.38	++	Pr
		蜘蛛目 Araneida	地蛛科 Atypidae	18	0.07	+	Pr
			猫蛛科 Oxyopidae	4	0.02	+	Pr
			皿蛛科 Linyphiidae	7	0.03	+	Pr
			平腹蛛科 Gnaphosidae	7	0.03	+	Pr
			弱蛛科 Leptonetidae	8	0.03	+	Pr
			跳蛛科 Salticidae	10	0.04	+	Pr
			蟹蛛科 Thomisidae	3	0.01	+	Pr
			长奇盲蛛科 Phalangiidae	4	0.02	+	Pr
			节板蛛科 Liphistiidae	6	0.02	+	Pr
		中气门亚目 Mesostigmata	足角螨科 Podocinidae	98	0.40	+	Pr
			厉螨科 Laelapidac	1	0.00	+	Pr
			尾足螨科 Uropodidae	6	0.02	+	Sa
	蠋虫戈纲 Pauropoda			1	0.00	+	Sa
	综合纲 Symphyla		地么蚣科 Geophilellidae	17	0.07	+	Sa
			么蚣科 Scolopendrellidae	2	0.01	+	Sa
	倍足纲 Diplopoda	姬马陆目 Julida		8	0.03	+	Sa
		马陆目 millipede		9	0.04	+	Sa
		球马陆目 Glomerida		2	0.01	+	Sa
		圆马陆目 Sphaero theriida		8	0.03	+	Sa
	唇足纲 Chilopoda	地蜈蚣目 Geophilomorpha		142	0.58	+	Pr
		石蜈蚣目 Lithobiomorpha		41	0.17	+	Pr
		蜈蚣目 Scolopendromorpha		76	0.31	+	Pr
		蚰蜒目		4	0.02	+	Pr

续表

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	个体数 Individual	占比 Ratio/%	多度 Abundance	功能群 Functional groups	
软体动物门 Mollusca	弹尾纲 Collembola	Scutigeromorpha						
		节腹亚目	等节跳科	3748	15.34	+++	Sa	
		Arthropleona	Isotomidae					
			棘跳科	3050	12.48	+++	Fu	
			Onychiuridae					
			鳞跳科	42	0.17	+	Sa	
			Tomoceridae					
			球角跳科	68	0.28	+	Sa	
			Hypogastruridae					
			跳虫科	309	1.26	++	Om	
			Poduridae					
			疣跳科	816	3.34	++	Sa	
			Neanridae					
			长角跳科	293	1.20	++	Sa	
			Entomobryidae					
			长角长跳科	151	0.62	+	Sa	
			Orchesellidae					
			爪跳科	7	0.03	+	Om	
			Paronellidae					
			短角跳科	4	0.02	+	Sa	
		Symphypleona	Neelidae					
			圆跳科	28	0.11	+	Ph	
			Sminthuridae					
	腹足纲 Gastropoda		柄眼目 Stylommatophora	巴蜗牛科	13	0.05	+	Ph
				Bradybaenidae				
		萎瓦蜗牛科		17	0.07	+	Ph	
		Valloniidae						
		内齿螺科		36	0.15	+	Om	
		Endodontidae						
		树螺科		1	0.00	+	Sa	
		Archaeogastropoda						
		Helicinidae						
		中腹足目		22	0.09	+	Om	
		环口螺科						
		Mesogastropoda						
		Cyclophoridae						
		蛹螺科		6	0.02	+	Om	
		Triviidae						
环节动物门 Annelida	寡毛纲 Oligochaeta	颤蚓目	线蚓科	447	1.83	++	Sa	
		Tubificida	Enchytraeidae					
			后孔寡毛目	21	0.09	+	Sa	
		Opisthopora	Lumbricida					
		小蚯蚓类	21	0.09	+	Sa		
		Microdrile oligochaetes	Tubificidae					
		小蚯蚓类	211	0.86	+	Sa		
		Microdrile oligochaetes	Haplotaxidae					
		总计 Total			24434			
		类群 Groups			127			

Fu: 菌食性 Fungivorous; Om: 杂食性 Omnivorous; Ph: 植食性 Phytophage; Pr: 捕食性 Predacity; Sa: 腐食性 Saprophytic; “+++”表示优势类群; “++”表示常见类群; “+”表示稀有类群