

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0176

周园园,陈浒,魏强,等.施秉喀斯特遗产地常绿阔叶林土壤螨类群落结构及对环境因子的响应[J].生态与农村环境学报,2023,39(4):511-522.

ZHOU Yuan-yuan, CHEN Hu, WEI Qiang, et al. Response between the Community Structure of Soil Mites and Environmental Factors on the Evergreen Broad-leaved Forest in the Shibing Karst Heritage Property, China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(4): 511-522.

施秉喀斯特遗产地常绿阔叶林土壤螨类群落结构及对环境因子的响应

周园园, 陈 浒^①, 魏 强, 殷秀梅, 刘文俊 (贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为查明施秉喀斯特世界自然遗产地常绿阔叶林土壤螨类群落特征,于2021年9月对遗产地常绿阔叶林3种不同植被类型下土壤螨类进行标本采集和鉴定,采用属数、个体数量、群落多样性各参数、捕食性革螨生态指数以及甲螨生态指数对土壤螨类群落结构进行分析,同时探究了土壤螨类群落与环境因子的关系。研究期间,共捕获土壤螨类1563头,隶属于3目55科91属,以全菌甲螨属(*Perscheloribates*)为主要优势类群,优势类群和常见类群构成常绿阔叶林生态系统的土壤螨类基本组分,稀有属是螨类属数增加的主要贡献者。土壤螨类群落结构和多样性空间分析表明,对于螨类属数和个体数量,在水平方向上呈现出黑壳楠+山胡椒群落(EBF1)>乌冈栎+大明松群落(EBF2)>香叶树+女贞群落(EBF3)的变化情形,在垂直方向上表现出腐殖质层>土壤上层>土壤下层的变化趋势,群落分布具有明显的表层聚集性特征。用螨类属数定量分析群落相似性,结果表明不同植被类型间土壤螨类群落相似性达到中度相似或极相似水平,这与稀有类群存在有着直接关系。土壤螨类生态类群分析表明,甲螨生态类群总体上以O选择型有翅孔背甲螨群(P群)为主,捕食性革螨生态类群总体上以r选择型为主。相关性分析表明,均匀度指数与土壤全磷含量呈显著负相关关系,与土壤pH值呈显著正相关关系;除均匀度指数外,土壤孔隙度、土壤含水量和土壤有机质均与土壤螨类群落各参数呈现显著正相关关系($P<0.05$)。冗余分析表明,除稀有类群外,不同植被类型土壤螨类群落组成差异性较大,土壤有机质是显著影响土壤螨类群落分布的主要环境因子($P<0.05$)。研究结果可为中亚热带喀斯特世界遗产地森林生态系统土壤生物多样性研究和保护提供数据支撑和理论依据。

关键词: 土壤螨类; 群落结构; 常绿阔叶林; 世界自然遗产地; 施秉喀斯特; 土壤环境因子

中图分类号: S154.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)04-0511-12

Response between the Community Structure of Soil Mites and Environmental Factors on the Evergreen Broad-leaved Forest in the Shibing Karst Heritage Property, China. ZHOU Yuan-yuan, CHEN Hu^①, WEI Qiang, YIN Xiu-mei, LIU Wen-jun (Institute of Karst Research, Guizhou Normal University/ National Engineering Research Center for Karst Desertification Prevention and Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: The evergreen broad-leaved forest represents the pinnacle stage of vegetation succession within the dolomite karst mountain forest ecosystem in the Shibing Karst World Natural Heritage Property. To characterize the soil mite community in this forest type, soil mites were collected and identified from three distinct vegetation types in the Heritage Property in September 2021. The community structure of the soil mites was analyzed using several parameters, including the number of genera, number of individuals, community diversity, and ecological indices of Mesostigmata and Oribatida. Additionally, the relationship between the soil mite community and environmental factors was investigated. A total of 1563 soil mites were captured, comprising 91 genera in 55 families of 3 orders, with *Perscheloribates* identified as the dominant taxon. Dominant and common taxa constituted the fundamental components of soil mites in the evergreen broad-leaved

收稿日期: 2022-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502601)

① 通信作者 E-mail: gy_chenhu@163.com

forest ecosystems, with the rare taxa contributing primarily to the increase in mite genera. Spatial analysis of soil mite community structure and diversity revealed the following pattern: EBF1 > EBF2 > EBF3 in the horizontal direction and humic layer > upper soil layer > lower soil layer in the vertical direction. Moreover, the community distribution displayed evident surface aggregation characteristics. Quantitative analysis of community similarity, based on the number of mite genera, demonstrates that soil mite communities between vegetation types exhibited moderate or highly similar levels, directly associated with the presence of rare taxa. Ecological taxa analysis of Oribatid mites predominantly featured the O-type Poronota group, while Mesostigmata ecological taxa were primarily characterized by the *r* selective type. Correlation analysis indicate that the evenness index is significantly negatively correlated with soil total phosphorus and positively correlated with soil pH. Soil porosity, soil water content, and soil organic matter all exhibited significant positive correlations ($P < 0.05$) with each parameter of the soil mite community, except for the evenness index. Redundancy analysis demonstrated that, excluding rare taxa, the composition of soil mite communities varied considerably among vegetation types, with soil organic matter serving as the primary environmental factor significantly impacting the distribution of soil mite communities ($P < 0.05$). These findings offer data support and a theoretical foundation for the research and conservation of soil biodiversity in forest ecosystems of the Central Subtropical Karst World Heritage Property.

Key words: soil mites; community structure; evergreen broad-leaved forest; World Natural Heritage; Shibing Karst; soil environmental factors

土壤螨类是森林土壤环境的重要组成部分,是土壤有机质的重要分解者,在维持地下生态系统物质循环和能量流动中发挥着重要作用^[1-2]。近年来,土壤螨类与地上植物群落的相互作用越来越受关注。一方面,土壤螨类可通过破碎凋落物^[3-5]或调控微生物和原生动物的方式影响分解过程,提高土壤养分的矿化速率和无机养分供给来促进植物生长^[6],并对地上植物群落物种组成、结构和演替起着重要调控作用^[7-8]。另一方面,地上植物群落的变化直接影响着森林凋落物的组成和营养物质含量,改变土壤动物的食物质量和数量,进而对地下土壤螨类组成和群落结构产生影响^[9];同时,植物群落还能通过影响土壤理化性质间接影响土壤螨类群落分布^[10]。此外,土壤螨类对环境变化敏感,是指示植被演替、环境干扰及气候变化等的重要生物指标^[11]。因此,研究土壤螨类群落结构及多样性与地上植被的相互关系,对理解地上、地下生态过程的时空变化有重要意义。

施秉喀斯特世界自然遗产地(以下简称“遗产地”)是中国南方喀斯特二期系列遗产地之一,在全球热带—亚热带地区白云岩喀斯特地貌分布上极具代表性,同时因其满足世界遗产标准(vii)与标准(viii),于2014年6月在第38届世界遗产大会上被列入《世界遗产名录》^[12]。遗产地属于典型的过渡性质的亚热带山地森林生态系统,是中国南方喀斯特地区森林植被覆盖度高、动植物资源较为丰富的地区之一^[12]。其特殊的自然环境使得该地区发育了独特的白云岩喀斯特地貌,保留了大面积的喀斯特原生植被,植被演替顶级为中亚热带常绿阔叶林

和常绿落叶阔叶混交林,群落成层结构明显,在生物多样性方面集中体现了白云岩喀斯特峰丛峡谷所独有的生物和生态演化特征^[13]。截至目前,国内外已有关于非喀斯特环境下世界自然遗产地森林土壤螨类群落结构的研究^[14],但是对于喀斯特森林环境下,尤其是白云岩喀斯特森林生态系统中土壤螨类群落结构的研究较为匮乏。

相关研究表明,西南喀斯特地区的天然森林,特别是常绿阔叶林,是土壤螨类的“避难所”^[14],而遗产地分布着大量的原生性亚热带常绿阔叶林^[8]。基于此,以施秉白云岩喀斯特常绿阔叶林生态系统土壤螨类为研究对象,通过对常绿阔叶林不同植被类型下土壤螨类结构特征、多样性及其与环境因子的相关性进行对比分析,从生物生态学方面揭示遗产地土壤螨类生态价值,研究结果可为森林生态系统的健康监测与评估提供生物对比数据,同时为遗产地土壤生物多样性保护提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

遗产地位于贵州省黔东南施秉县境内(27°05'49"~27°13'59" N, 108°01'34"~108°09'32" E),处于云贵高原向湖南低山丘陵过渡带的山前斜坡地带,同时也是我国第二阶梯与第三阶梯之间的地形阶梯过渡区边界,地势北高南低,平均海拔912 m。与云台山景区、杉木河景区、生态水源涵养区重合,遗产地总面积282.95 km²,其中核心区面积为102.80 km²,缓冲区面积为180.15 km²。遗产地属于中亚热带季风湿润气候区,气候温和,雨量充沛,年平均

气温为 16 ℃,年平均降水量达 1 220 mm,年均相对湿度为 80%。成土母岩为寒武系纯白云岩,土壤类型主要是白云岩风化的薄层石灰土。遗产地保存和发育了大面积的白云岩喀斯特原生森林生态系统,山体中下部形成原始的中亚热带常绿阔叶林生态系统,典型的地带性植被类型为常绿阔叶林,森林覆盖率达 93.95%,是白云岩喀斯特森林植被自然演替的顶级阶段^[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与设置

根据遗产地的常绿阔叶林分布情况,以生态良好、地势相对平坦和采样的可操作性为原则,在遗产地常绿阔叶林生态系统中选取了典型的 3 个植物群落作为实验样地,其植被类型分别为黑壳楠+山胡椒群落(EBF1)、乌冈栎+大明松群落(EBF2)、香

叶树+女贞群落(EBF3),样地面积约为 20 m×30 m。同期记录各样地的经纬度、海拔、坡度和植被组成状况,样地详细情况见表 1。

1.2.2 样品采集与处理

2021 年 9 月,在每个样地中沿对角线设置 3 个 5 m×5 m 的样方,间隔 5 m 左右,每个样方随机设置 2 个采样点。拾取各样点表层的枯枝落叶后,进行腐殖质层切(刮)取,用 500 cm³标准环刀量取一环刀腐殖质层土样,单个取样面积为 15 cm×15 cm;同时采用容积为 500 cm³的土壤环刀在各样点进行 0~5 cm(上层)和>5~10 cm(下层)土壤层连续采样,每个样点采集 3 个垂直剖面层,总样品数量为 54 个(3 种植被类型×3 个样方×2 个采样点×3 个土层)。

表 1 研究区土壤螨类自然环境

Table 1 Natural environment of soil mites in the study area

样地名称	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	主要植物
EBF1	27°06'34.99" N, 108°06'18.07" E	857	30	黑壳楠(<i>Lindera megaphylla</i>)、八角枫(<i>Alangium chinense</i>)、榆树(<i>Ulmus pumila</i>)、山胡椒(<i>Lindera glauca</i>)、菝葜(<i>Smilax china</i>)、鸢尾(<i>Iris tectorum</i>)、马兰(<i>Kalimeris indica</i>)
EBF2	27°06'40.18" N, 108°06'28.86" E	968	45	乌冈栎(<i>Quercus phillyraeoides</i>)、欆木(<i>Loropetalum</i>)、大明松(<i>Pinus taiwanensis</i>)、火棘(<i>Pyracantha fortuneana</i>)、菝葜(<i>Smilax china</i>)、苔草(<i>Carex</i> spp)
EBF3	27°06'29.20" N, 108°06'30.29" E	912	45	香叶树(<i>Lindera communis</i>)、女贞(<i>Ligustrum lucidum</i>)、异叶梁王茶(<i>Nothopanax davidii</i>)、苧麻(<i>Boehmeria nivea</i>)、沿阶草(<i>Ophiopogon bodinieri</i>)

所有样品装入透气性良好的棉布袋,带回室内后采用 Tullgren 法连续烘烤 48 h 后,将分离出的螨类保存在 $\varphi=75\%$ 的酒精中进行清洗和固定,最后于盛有乳酸溶液的塑料试管中常温保存。将透明色的螨类制成临时标本,置于 Olympus 显微镜下观察,参照已有文献进行标本形态学鉴定^{[16]222-416, [17]124-564, [18-19]},所有样品均鉴定到属,分类单元主要采用文献^{[17]124-232}的分类系统。

1.2.3 环境因子采集与测定

同期在各样方用铁铲按 0~5 和>5~10 cm 分别采集 500 g 供化学性质分析的土壤,于塑料薄膜上剔除石块和植物根茎后混合均匀,共计 9 个样品(3 个样地×3 个样方×1 个混合样)。采用 100 cm³环刀在各样方内采集供物理分析的土壤,共计 18 个(3 个样地×3 个样方×2 个垂直剖面层),将同一样点的上下层土壤物理性质数据取平均值作为 1 个重复。

土壤容重、饱和含水量、自然含水量的测定采用原位环刀法。总孔隙度计算方法为

$$P = 93.947 - 32.995 \times D_B \quad (1)$$

式(1)中, P 为总孔隙度,%; D_B 为容重, $g \cdot cm^{-3}$ 。

水解氮含量采用碱解扩散法测定;全磷含量采用硫酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法测定;速效磷含量采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定;全钾含量采用氢氟酸-高氯酸消煮,火焰光度计法测定;速效钾含量采用中性乙酸铵浸提,火焰光度计法测定。测定方法参照文献^[20]。

1.2.4 数据计算与分析

(1)群落优势度的划分^[21]。个体数占总捕获量 10%以上为优势类群(+++),个体数占总捕获量 1%~10%为常见类群(++),个体数占总捕获量 0.5%~<1%为稀有类群(++),个体数占总捕获量 0.5%以下为极稀有类群(+)

(2)群落结构分析^[22]。采用 Shannon-Winner 多样性指数(H)、Margalef 丰富度指数(R_S)和 Pielou 均匀度指数(J)表征群落结构。计算公式为

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$R_S = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$J = H / \ln S \quad (4)$$

式(2)~(4)中, P_i 为第*i*属个体数量占总个体数的比例; S 为类群(属)数; N 为土壤螨类全部类群的个体总数。

(3)群落相似性分析^[23]。Jaccard 相似性系数(q)的计算公式为

$$q = c / (a + b - c) \quad (5)$$

式(5)中, a 为A群落类群数; b 为B群落类群数; c 为两群落共有类群数。 q 值判定阈值如下:0~<0.25为极度不相似;0.25~<0.5为中等不相似;0.5~<0.75为中等相似;0.75~<1为极度相似。

(4)甲螨生态类群 MGP 分析。采用甲螨 MGP 分别计算各类群属数百分比和各类群个体数百分比^{[16]222-416, [24-25]}。甲螨主要分为三大类群,分别为大孔低等甲螨群(Macropylina group,简称M)、无翅坚背甲螨群(Gymnonota group,简称G)和有翅孔背甲螨群(Poronota group,简称P)。分别以20%和50%为阈值,将甲螨类群划分为6种生态群落类型:M型(M>50%)、G型(G>50%)、P型(P>50%)、O型(20%<M、G、P<50%)、MG型(M、G为20%~50%且P<20%)、GP型(G、P为20%~50%且M<20%)和MP型(M、P为20%~50%且G<20%)。

(5)捕食性革螨生态类群。采用捕食性螨类成熟度指数(MI, I_M)分析中气门螨类生态类群^[26],计算公式为

$$I_M = \sum_{i=1}^s K_i / \left(\sum_{i=1}^s K_i + \sum_{i=1}^s r_i \right) \quad (6)$$

式(6)中, s 为土壤螨群落中气门螨类属数; K_i 为第*i*属所属科的*K*值; r_i 为第*i*属所属科的*r*值。MI值<0.5,即为*r*选择;MI值=0.5,即为*K*和*r*选择;MI值>0.5,即为*K*选择。

采用 Excel 2019 软件进行基础数据整理,在 SPSS 20.0 软件中进行不同生境土壤螨类群落多样性和土壤理化因子的单因素方差分析,使用 LSD 法进行多重比较。对不符合正态分布的数据采用 Tamhane's T2 法检验,显著性水平取 $P < 0.05$,同时利用 Origin 2021 软件进行柱状图绘制。

将同一样方 2 个样点内收集的螨类群落属数、个体数量和多样性数据求平均值,作为 1 次重复,采用 Spearman 相关性分析螨类群落各参数与环境因子的相关性,所有数据进行 $\ln(x+1)$ 转换,以确保试验数据满足正态分布假设,减小量纲对分析结果的影响,同时利用 TBtools 软件进行双向聚类相关性热图的绘制。

为减少稀有类群对排序结果的影响,降低图形的复杂程度,选取优势度>1%的土壤螨类物种(共

计 26 属,即土壤螨类优势属和常见属),采用 Canoco 5.0 软件绘制土壤螨类组成与土壤环境因子解释变量关系的二维排序图。首先,用除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)计算出排序轴的梯度长度(lengths of gradient, LGA),依据 LGA 值选择合适的排序方法,该研究中 LGA 值为 1.2<3,因此采用线性模型冗余分析(redundancy analysis, RDA)和蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo permutation test)定量评价环境因子对螨类群落分布的贡献率。

2 结果与分析

2.1 土壤螨类群落组成与分布

在研究区共捕获土壤螨类 1 563 头,隶属于 3 目 55 科 91 属,其中中气门目 18 科 28 属,绒螨目 2 科 4 属,疥螨目 35 科 59 属(表 2)。从土壤螨类优势度来看,全菌甲螨属(*Perscheloribates*)为优势类群,占总捕获量的 10.56%,新革螨属(*Neogamasus*)、厚厉螨属(*Pachylaelaps*)、丘疹甲螨属(*Papillacarus*)等 25 个属为常见类群,占捕获量的 65.58%;枝厉螨属(*Dendrolaelaps*)、囊螨属(*Asca*)、混居甲螨属(*Mixacarus*)等 20 个属为稀有类群,占总捕获量的 15.04%;糙尾螨属(*Trachytes*)、革板螨属(*Gamasholaspis*)、角单翼甲螨属(*Rostrozetes*)等 45 个属为极稀有类群,占总捕获量的 8.83%。可见优势属和常见属是螨类个体数量增加的主要贡献者,而稀有属是螨类属数增加的主要贡献者。

EBF1、EBF2、EBF3 这 3 种不同的常绿阔叶林的土壤螨类个体数量分别为 660、522、381 只,分别占总捕获量的 42.2%、33.5%、24.4%;属数分别为 75、65、53 属,分别占总属数的 82.4%、71.4%、58.2%。就各样地螨类优势属而言,全菌甲螨属(*Perscheloribates*)为 EBF1 生境下的优势类群,占总捕获量的 10.61%;盖头甲螨属(*Tectocephus*)和全菌甲螨属(*Perscheloribates*)为 EBF2 生境下的优势类群,分别占总捕获量的 10.15%和 10.34%;毛大翼甲螨属(*Trichogalumna*)和全菌甲螨属(*Perscheloribates*)为 EBF3 生境下的优势类群,分别占总捕获量的 11.29%和 10.76%。

就土层变化而言,在水平变化上,螨类属数和个体数量在各土层的排序均表现为 EBF1 > EBF2 > EBF3;垂直变化上,螨类属数和个体数量在各生境均表现出枯枝落叶层>土壤上层>土壤下层的变化趋势,表聚性明显(图 1)。

表2 土壤螨类群落组成与数量分布

Table 2 Community composition and quantity distribution of soil mites

科	属	个体数量(优势度)			合计
		EBF1	EBF2	EBF3	
糙尾螨科(Trachytidae)	糙尾螨属(<i>Trachytes</i>)	6(++)			6(+)
糙尾足螨科(Trachyurpodidae)	甲冑螨属(<i>Oplitis</i>)		1(+)	1(+)	2(+)
孔洞螨科(Trematuridae)	内特螨属(<i>Nenteria</i>)	3(+)	15(+++)	3(++)	21(+++)
二爪螨科(Dinychidae)	尾卵螨属(<i>Uroobovella</i>)		1(+)		1(+)
表刻螨科(Epicriidae)	表刻螨属(<i>Epicrius</i>)		2(+)		2(+)
寄螨科(Parasitidae)	新革螨属(<i>Neogamasus</i>)	17(+++)	3(++)	4(+++)	24(+++)
	寄螨属(<i>Parasitus</i>)	15(+++)	15(+++)	9(+++)	39(+++)
维螨科(Veigaiidae)	维螨属(<i>Veigaia</i>)	2(+)			2(+)
胭螨科(Rhodacaridae)	胭螨属(<i>Rhodacarus</i>)	1(+)	4(++)		5(+)
	枝厉螨属(<i>Dendrolaelaps</i>)	12(+++)			12(++)
土革螨科(Ologamasidae)	革伊螨属(<i>Gamasiphis</i>)	1(+)	1(+)		2(+)
巨螯螨科(Macrochelidae)	雕盾螨属(<i>Glyphotolaspis</i>)	13(+++)			13(++)
	巨螯螨属(<i>Macrocheles</i>)	6(++)	2(+)	12(+++)	20(+++)
派伦螨科(Parholaspididae)	革板螨属(<i>Gamasholaspis</i>)	2(+)			2(+)
	卡盾螨属(<i>Krantzholaspis</i>)	9(+++)	7(+++)	2(++)	18(+++)
	派伦螨属(<i>Parholaspulus</i>)	32(+++)	16(+++)	21(+++)	69(+++)
厚厉螨科(Pachylaelapidae)	厚厉螨属(<i>Pachylaelaps</i>)	20(+++)	18(+++)	15(+++)	53(+++)
	厚绥螨属(<i>Pachyseius</i>)		3(++)	3(++)	6(+)
囊螨科(Ascidae)	囊螨属(<i>Asca</i>)	14(+++)	1(+)		15(++)
足角螨科(Podocinidae)	足角螨属(<i>Podocinum</i>)		2(+)	4(+++)	6(+)
蟬螨科(Blattisociidae)	毛绥螨属(<i>Lasioseius</i>)	1(+)	2(+)	4(+++)	7(+)
	手绥螨属(<i>Cheiroseius</i>)	4(++)	3(++)	1(+)	8(++)
厉螨科(Laelapidae)	广厉螨属(<i>Cosmolaelaps</i>)	7(+++)	1(+)	7(+++)	15(++)
	土厉螨属(<i>Ololaelaps</i>)	2(+)			2(+)
	殖厉螨属(<i>Geolaelaps</i>)	14(+++)	7(+++)	5(+++)	26(+++)
	异寄螨属(<i>Alloparasitus</i>)		4(++)		4(+)
美绥螨科(Ameroseiidae)	美绥螨属(<i>Ameroseius</i>)	5(++)	3(++)	4(+++)	12(++)
多盾螨科(Polyaspididae)	异多盾螨属(<i>Polyaspinus</i>)		1(+)		1(+)
巨须螨科(Cunaxidae)	巨须螨属(<i>Cunaxa</i>)		1(+)		1(+)
	硬指螨属(<i>Dactyloscirus</i>)		1(+)		1(+)
	拟厉螨属(<i>Laelaspis</i>)		1(+)		1(+)
微绒螨科(Microtrombidiidae)	微绒螨属(<i>Microtrombidium</i>)	1(+)	1(+)		2(+)
缝甲螨科(Hypochthoniidae)	东缝甲螨属(<i>Eohypochthonius</i>)	6(++)	7(+++)	8(+++)	21(+++)
卷甲螨科(Phthiracaridae)	卷甲螨属(<i>Phthiracarus</i>)	1(+)	3(++)	1(+)	5(+)
	闭甲螨属(<i>Steganacarus</i>)	1(+)			1(+)
懒甲螨科(Nothridae)	懒甲螨属(<i>Nothrus</i>)	8(+++)	1(+)	2(++)	11(++)
礼服甲螨科(Trhypochthoniidae)	礼服甲螨属(<i>Trhypochthonius</i>)	10(+++)		9(+++)	19(+++)
洛甲螨科(Lohmanniidae)	混居甲螨属(<i>Mixacarus</i>)	3(+)	5(+++)	1(+)	9(++)
	罗甲螨属(<i>Lohmannia</i>)	4(++)			4(+)
	裂甲螨属(<i>Meristacarus</i>)	4(++)			4(+)
	丘疹甲螨属(<i>Papillacarus</i>)	37(+++)	2(+)	1(+)	40(+++)
盲甲螨科(Malaconothridae)	盲甲螨属(<i>Malaconothrus</i>)	2(+)	1(+)	1(+)	4(+)
上罗甲螨科(Epilohmanniidae)	上罗甲螨属(<i>Epilohmannia</i>)	6(++)		2(++)	8(++)
真卷甲螨科(Euphthiracariidae)	三皱甲螨属(<i>Rhysotritia</i>)	46(+++)	25(+++)	2(++)	73(+++)
	端三甲螨属(<i>Acrotritia</i>)	1(+)	2(+)		3(+)
	直卷毛甲螨属(<i>Hoplophthiracarus</i>)	1(+)			1(+)
	微三甲螨属(<i>Microtritia</i>)		1(+)		1(+)

续表 2 Table 2 (Continued)

科	属	个体数量(优势度)			
		EBF1	EBF2	EBF3	合计
中卷甲螨科(Mesoplophoridae)	直卷甲螨属(<i>Archoplophora</i>)	43(+++)	28(+++)	8(+++)	79(+++)
阿斯甲螨科(Astegistidae)	刀肋甲螨属(<i>Cultroribula</i>)	4(++)	2(+)	8(+++)	14(++)
奥甲螨科(Oppiidae)	弓奥甲螨属(<i>Arcoppia</i>)	8(+++)	1(+)	2(++)	11(++)
	微奥甲螨属(<i>Microppia</i>)	1(+)	1(+)	1(+)	3(+)
	小奥甲螨属(<i>Oppiella</i>)	16(+++)	12(+++)	8(+++)	36(+++)
	枝奥甲螨属(<i>Ramusella</i>)	5(++)	2(+)	8(+++)	15(++)
	单奥甲螨属(<i>Phauloppia</i>)	1(+)		3(++)	4(+)
	奥甲螨属(<i>Oppia</i>)		2(+)		2(+)
丽甲螨科(Liacaridae)	丽甲螨属(<i>Liacarus</i>)	6(++)		6(+++)	12(++)
剑甲螨科(Gustaviidae)	剑甲螨属(<i>Gustavia</i>)	3(+)		3(++)	6(+)
步甲螨科(Carabodidae)	步甲螨属(<i>Carabodes</i>)	1(+)			1(+)
耳头甲螨科(Otocepheidae)	隐甲螨属(<i>Dolicheremaeus</i>)	1(+)			1(+)
盾珠甲螨科(Suctobelbidae)	盾珠甲螨属(<i>Suctobelba</i>)	3(+)	4(++)	3(++)	10(++)
	等盾珠甲螨属(<i>Parisuctobelba</i>)	2(+)			2(+)
盖头甲螨科(Tectocephidae)	盖头甲螨属(<i>Tectocephus</i>)	19(+++)	53(+++)	21(+++)	93(+++)
赫甲螨科(Hennainiidae)	赫甲螨属(<i>Hermannia</i>)	3(+)			3(+)
前翼甲螨科(Peloppiidae)	角甲螨属(<i>Ceratoppia</i>)	6(++)			6(+)
小赫甲螨科(Hennainiellidae)	小赫甲螨属(<i>Hermanniella</i>)	1(+)	2(+)	3(++)	6(+)
矮赫甲螨科(Nanhermanniidae)	短汉甲螨属(<i>Crythermannia</i>)	4(++)	2(+)		6(+)
	矮赫甲螨属(<i>Nanhermannia</i>)	6(++)	4(++)	5(+++)	15(++)
裂板鳃甲螨科(Plasmobatidae)	裂板鳃甲螨属(<i>Plasmobates</i>)	2(+)			2(+)
沙珠足甲螨科(Eremobelbidae)	沙珠足甲螨属(<i>Eremobelba</i>)	3(+)	5(+++)		8(++)
沙足甲螨科(Eremobelbidae)	沙足甲螨属(<i>Eremobelba</i>)		2(+)		2(+)
珠甲螨科(Damaeidae)	珠甲螨属(<i>Damaeus</i>)		3(++)		3(+)
垂盾甲螨科(Scutoverticidae)	垂盾甲螨属(<i>Scutovertex</i>)	6(++)		2(++)	8(++)
大翼甲螨科(Galumnidae)	大翼甲螨属(<i>Galumna</i>)	1(+)	14(+++)	10(+++)	25(+++)
	毛大翼甲螨属(<i>Trichogalumna</i>)	17(+++)	47(+++)	43(+++)	107(+++)
	全大翼甲螨属(<i>Pergalumna</i>)	4(++)	6(+++)	5(+++)	15(++)
	原大翼甲螨属(<i>Protokalumna</i>)	8(+++)	1(+)	4(+++)	13(++)
单翼甲螨科(Haplozetidae)	全单翼甲螨属(<i>Perxylobates</i>)	2(+)			2(+)
	威单翼甲螨属(<i>Vilhenabates</i>)	10(+++)	13(+++)	3(++)	26(+++)
	圆单翼甲螨属(<i>Peloribates</i>)	18(+++)	28(+++)	14(+++)	60(+++)
	针单翼甲螨属(<i>Setoxylobates</i>)	5(++)	18(+++)	6(+++)	29(+++)
	角单翼甲螨属(<i>Rostrozetes</i>)	5(++)		2(++)	7(+)
	副单翼甲螨属(<i>Paraxylobates</i>)		1(+)		1(+)
	细若甲螨属(<i>Incabates</i>)		9(+++)	2(++)	11(++)
副大翼甲螨科(Parakalumiidae)	新肋甲螨属(<i>Neoribates</i>)	1(+)	15(+++)	9(+++)	25(+++)
杆棱甲螨科(Mochlozetidae)	杆棱甲螨属(<i>Mochlozetes</i>)	1(+)			1(+)
尖棱甲螨科(Ceratozetidae)	尖棱甲螨属(<i>Ceratozetes</i>)	17(+++)	2(+)	17(+++)	36(+++)
菌甲螨科(Scheloribatidae)	菌甲螨属(<i>Scheloribates</i>)	14(+++)	9(+++)	15(+++)	38(+++)
	全菌甲螨属(<i>Perscheloribates</i>)	70(+++)	54(+++)	41(+++)	165(+++)
木单翼甲螨科(Xylobatidae)	木单翼甲螨属(<i>Xylobates</i>)	13(+++)	12(+++)		25(+++)
长单翼甲螨科(Protoribatidae)	长单翼甲螨属(<i>Protoribates</i>)	11(+++)	7(+++)	5(+++)	23(+++)
薄口螨科(Histiostomatidae)	薄口螨属(<i>Histiotoma</i>)	2(+)		2(++)	4(+)
合计		660	522	381	1 563

EBF1、EBF2、EBF3 样地基本信息见表 1。+++ 表示优势类群；++ 表示常见类群；+ 表示稀有类群；+ 表示极稀有类群。

2.2 土壤螨类群落多样性与相似性

土壤螨类群落 Shannon 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数变化见图 2。从水平

方向来看,多样性指数、丰富度指数由高到低依次为 EBF1、EBF2、EBF3 样地,而均匀度指数在 3 个样地间不存在显著性差异。

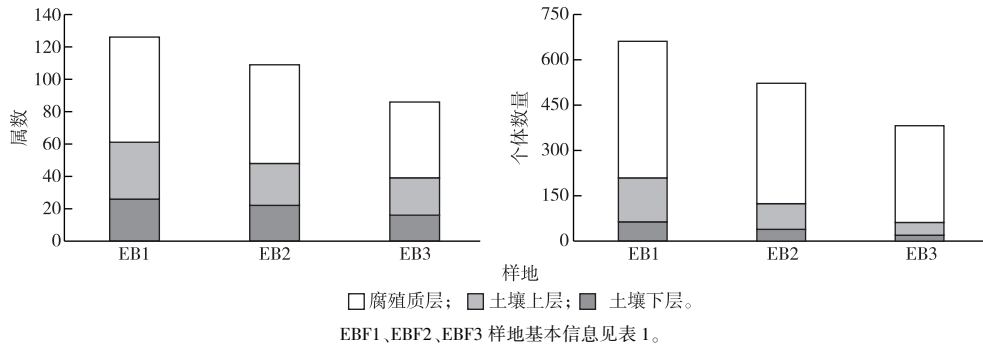
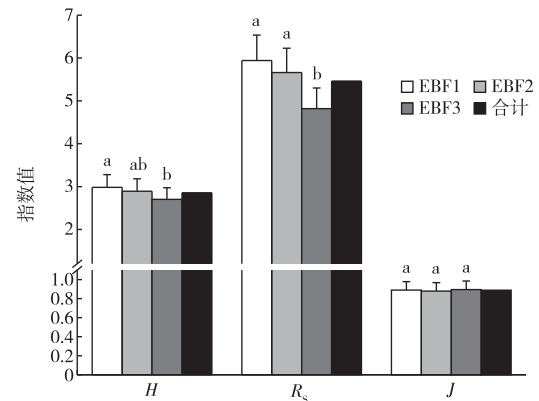


图1 研究区土壤螨类属数和个体数量的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of genus and individual numbers of soil mites in the study area

从垂直方向来看,3个样地腐殖质层的多样性指数和丰富度指数数值均高于土壤层,且EBF3与其他2个样地间存在显著性差异($P < 0.05$),EBF2和EBF3均匀度指数表现为腐殖质层略低于土壤层;多样性指数在腐殖质层和土壤层呈现出一致的变化规律,具体表现为EBF1>EBF2>EBF3;丰富度指数在腐殖质层表现为EBF2>EBF1>EBF3,土壤层出现和多样性指数一致的变化情形;各样地均匀度指数在腐殖质层不存在显著性差异,但在EBF1和EBF2样地的土壤层存在显著性差异($P < 0.05$,图3)。

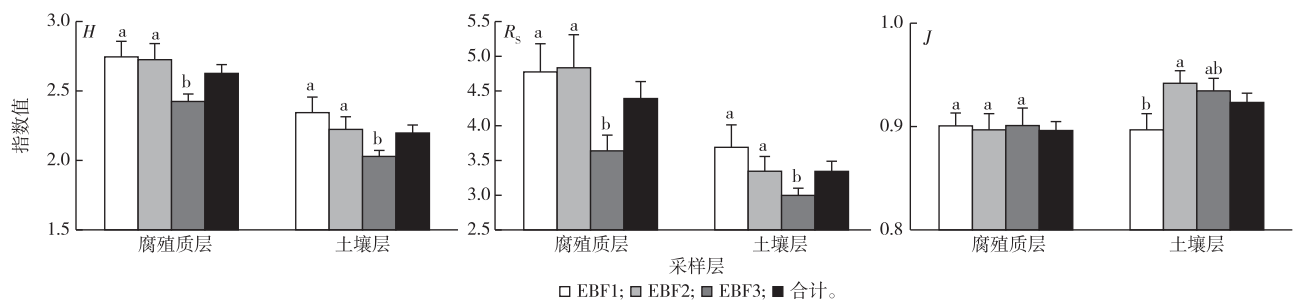
3个常绿阔叶林样地土壤螨类群落的相似性分析结果显示,EBF1分别与EBF2和EBF3之间为中等相似,相似性指数分别为0.653和0.756;EBF2与EBF3之间为极相似,相似性指数为0.865,表明遗产地常绿阔叶林存在微生境异质性的特点。



EBF1、EBF2、EBF3样地基本信息见表1。同一组直方柱上方小写字母不同表示不同生境间某指标差异显著($P < 0.05$)。

图2 研究区土壤螨类多样性指数(H)、丰富度指数(R_s)和均匀度指数(J)的水平变化

Fig. 2 Horizontal distribution of soil mite diversity index (H), richness index (R_s) and evenness index (J) in the study area



EBF1、EBF2、EBF3样地基本信息见表1。同一幅图中同一组直方柱上方小写字母不同表示不同生境间某指标差异显著($P < 0.05$)。

图3 研究区土壤螨类多样性指数(H)、丰富度指数(R_s)和均匀度指数(J)的垂直变化

Fig. 3 Vertical distribution of soil mite diversity index (H), richness index (R_s) and evenness index (J) in the study area

2.3 甲螨群落结构特征

MGP分析结果(表3)显示,在类群数百分比上,3个生境均为O型,其中EBF1以无翅坚背类群(G群)占比最大,EBF2和EBF3以有翅孔背类群(P群)占比最大。在个体数百分比上,EBF1属于O

型,其中以有翅孔背类群(P群)占比最大;EBF2和EBF3均属于P型。因此,遗产地常绿阔叶林甲螨生态类群以O选择型有翅孔背甲螨群(P群)为主要类群。

表 3 不同样地甲螨群落结构

Table 3 Community structure of soil mites (Oribatida) at different sample areas

样地名称	类群数占比/%			群落类型	个体数占比/%			群落类型
	M群	G群	P群		M群	G群	P群	
EBF1	28.85	38.46	32.69	O	36.73	20.17	43.1	O
EBF2	25.64	35.9	38.46	O	18.47	23.4	58.13	P
EBF3	27.03	32.43	40.54	O	12.32	25	62.68	P

EBF1、EBF2、EBF3 样地基本信息见表 1。

2.4 中气门螨类群落结构特征

采用 MI 指数研究遗产地常绿阔叶林的土壤中气门亚目螨类结构差异,捕食性螨类的 K 值和 r 值见表 4,MI 指数计算结果见表 5。总体而言,遗产地常绿阔叶林捕食性土壤革螨成熟度指数以 r 选择为主。其中,EBF1 和 EBF2 以 r 选择型为主,EBF3 以 K 选择型为主;腐殖质层以 r 选择型为主,土壤层以 K 或 r 选择型为主。就各样地不同土层而言,EBF1 腐殖质层和土壤层分别为 r 选择型和 K 选择型,EBF2 呈现出与 EBF1 相异的情形,而 EBF3 均以 r 选择型为主。

2.5 螨类群落与环境因子的相关性

各生境土壤理化因子见表 6。结果显示,常绿阔叶林不同植被类型下土壤环境因子数据仅在土壤有机质、孔隙度、容重、饱和含水量间存在显著或

极显著差异($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),其余各环境因子间均不存在显著性差异。其中 EBF1 生境下拥有更高的土壤有机质和水解氮含量,EBF2 生境下土壤孔隙度、饱和含水量、自然含水量较大,而 EBF3 生境下土壤 pH 值和土壤容重较高。

表 4 捕食性土壤革螨(中气门亚目螨类)的 K 值和 r 值

Table 4 K or r values of predatory soil mites (Mesostigmata: Gamasina)

科	K 值	科	r 值
表刻螨科(Epicriidae)	3	寄螨科(Parasitidae)	4
美绥螨科(Ameroseiidae)	3	足角螨科(Podocinidae)	1
派伦螨科(Parholaspididae)	2	土革螨科(Ologainasidae)	1
维螨科(Veigaiidae)	2	蠊螨科(Blattisociidae)	2
胭螨科(Rliodacaridae)	2	囊螨科(Ascidae)	1
厚厉螨科(Pachylaelapidae)	1	厉螨科(Laelapidae)	1

表 5 捕食性土壤革螨(中气门亚目螨类)的成熟度指数(MI)

Table 5 MI values of predatory soil mites (Mesostigmata: Gamasina)

采样层	EBF1		EBF2		EBF3		合计	
	MI	类群	MI	类群	MI	类群	MI	类群
腐殖质层	0.417 6	r	0.585 9	K	0.474 1	r	0.454 9	r
土壤层	0.666 7	K	0.441 2	r	0.290 3	r	0.534 2	K
总计	0.468 9	r	0.491 8	r	0.510 1	K	0.484 7	r

EBF1、EBF2、EBF3 样地基本信息见表 1。

表 6 土壤环境因子数据

Table 6 Content of environmental factors

样地	pH 值	$w/(g \cdot kg^{-1})$				$w/(mg \cdot kg^{-1})$			孔隙度/%	容重/ ($g \cdot m^{-3}$)	$w/\%$	
		有机质	全氮	全磷	全钾	水解氮	速效磷	速效钾			饱和含水量	自然含水量
EBF1	7.5±0.3 ^a	145.8±18.7 ^a	4.1±1.7 ^a	0.5±0.1 ^a	4.3±2.1 ^a	0.4±0.2 ^a	8.1±2.8 ^a	92.3±16.0 ^a	58.3±0.6 ^a	1.1±0.0 ^b	44.4±4.4 ^a	0.4±2.5 ^{ab}
EBF2	7.5±0.4 ^a	55.5±5.5 ^a	2.8±0.1 ^a	0.8±0.2 ^a	3.9±1.3 ^a	0.3±0.0 ^a	8.2±4.2 ^a	83.9±9.2 ^a	58.8±0.4 ^a	1.1±0.0 ^b	49.1±2.8 ^a	32.8±2.3 ^a
EBF3	7.9±0.1 ^a	46.1±8.8 ^b	2.1±0.3 ^a	0.6±0.0 ^a	4.5±0.9 ^a	0.2±0.0 ^a	8.5±3.6 ^a	86.4±7.6 ^a	49.1±1.3 ^b	1.4±0.0 ^a	31.0±1.7 ^b	24.8±1.2 ^b
F 值	0.59	19.89	0.98	1.85	0.05	0.97	0	0.14	42.76	42.76	8.84	3.89
P 值	0.59	<0.01	0.43	0.24	0.96	0.43	1	0.87	<0.01	<0.01	<0.05	0.08

数据为平均值±标准误差。同一列数据后小写字母不同表示不同生境间某指标差异显著($P < 0.05$)。

由图 4 可知,土壤孔隙度和土壤饱和含水量分别与螨类属数、个体数量、多样性指数、丰富度指数呈现显著或极显著正相关关系($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。土壤自然含水量分别与螨类个体数量和多样性指数呈现显著正相关关系($P < 0.05$)。土壤有机质含量分别与螨类属数、个体数量和丰富度指数呈显著正相关关系($P < 0.05$)。螨类均匀度指数与土壤全磷含量呈显著负相关关系($P < 0.05$),而与土壤 pH 值表现相反。相关性分析结果表明,土壤孔隙度、饱和含水量和有机质含量是影响土壤螨类群落各参数的主要环境因子。

RDA 排序图展示了环境变量(包括样地和土壤理化性质)对土壤螨类群落个体数量分布的响应(图 5),排序分析反映前 2 个排序轴累计解释了 49.83% 的土壤螨类群落组成变异,其中第 1 排序轴和第 2 排序轴的解释率分别为 28.85% 和 20.98%。结果显示,土壤有机质、速效氮、全氮含量和孔隙度沿着第 1 排序轴方向逐渐增大,与第 1 排序轴呈正相关,其中第 1 轴与有机质含量具有显著正相关性($P < 0.01$),解释了 25.60% 的螨类数据;而容重和 pH 值沿着第 1 排序轴方向逐渐减小,与第 1 排序轴呈负相关;第 2 轴与土壤饱和含水量、自然含水量和

速效磷含量相关性较高。

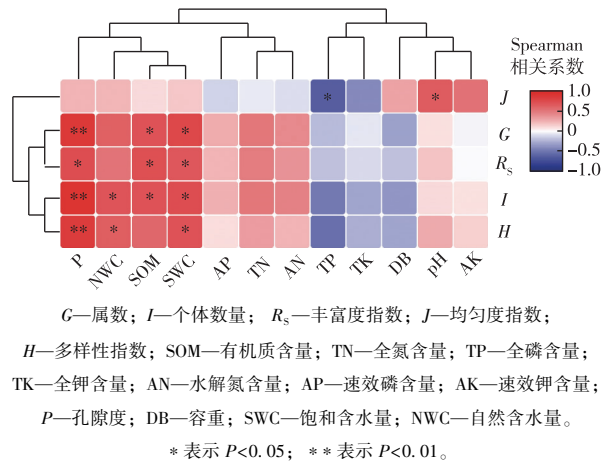


图 4 土壤螨类群落各参数与土壤环境因子的相关性

Fig. 4 Correlation coefficients between each parameter of the soil mite community and soil environmental factors

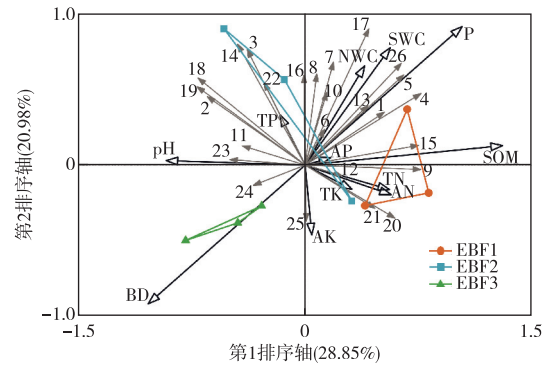
由图 5 还可知,各样方相对分散分布于不同的象限,而同一植被类型下不同采样点之间的螨类群落组成也存在较大差异,其中 EBF2 各样点间差异最为明显,表明土壤环境异质性高,不同植被类型间的土壤螨类群落组成差异明显。土壤环境因子对不同样地中土壤螨类群落的响应存在差异,在 EBF1 生境下螨类主要与土壤有机质、速效氮、全氮含量呈正相关,在 EBF3 生境下螨类主要与土壤容重呈正相关。

3 讨论

3.1 不同生境土壤螨类群落结构的差异

世界自然遗产地是生物多样性研究的热点地区之一,该研究捕获的土壤螨类隶属于 55 科 91 属,与亚热带常绿阔叶林世界遗产地梵净山(55 科 101 属)的调查结果相近^[27],表明施秉喀斯特世界自然遗产地拥有丰富的土壤螨类资源。土壤螨类作为森林生态系统的重要组成部分,其群落组成和分布特征对森林植被群落类型的变化有不同的响应^[9,28],而优势类群对群落结构和群落环境的形成有明显控制作用^[29]。该研究中全菌甲螨属(*Perscheloribates*) 在 3 种不同植被类型样地中占比均很高,为绝对优势类群,与张燕等^[14]对施秉喀斯特世界自然遗产地的研究结果一致,该属螨类的数量多且分布范围广,表明其对空间资源的利用能力较强,对常绿森林植被环境适应能力强,表现出对不同微生境的普适性,可以作为遗产地森林生态系统的指示螨类物种。此外,盖头甲螨属(*Tectocepheus*)

和毛大翼甲螨属(*Trichogalumna*) 分别为 EBF2 和 EBF3 生境下的另一优势类群,可能由于螨类不同类群的繁殖方式、适应环境的机制与定殖潜力存在差异^[30],造成不同螨类优势类群对不同植被群落类型产生差异性响应。



- 1—全菌甲螨属(*Perscheloribates*); 2—毛大翼甲螨属(*Trichogalumna*);
- 3—盖头甲螨属(*Tectocepheus*); 4—三皱甲螨属(*Rhysotritia*);
- 5—派伦螨属(*Parholaspulus*); 6—厚厉螨属(*Pachylaelaps*);
- 7—圆单翼甲螨属(*Peloribates*); 8—直卷毛甲螨属(*Hoplophthiracarus*);
- 9—丘疹甲螨属(*Papillacarus*); 10—菌甲螨属(*Scheloribates*);
- 11—寄螨属(*Parasitus*); 12—尖棱甲螨属(*Ceratozetes*);
- 13—殖厉螨属(*Geolaelaps*); 14—小奥甲螨属(*Oppiella*);
- 15—威单翼甲螨属(*Vilhenabates*); 16—针单翼甲螨属(*Setoxylobates*);
- 17—木单翼甲螨属(*Xylobates*); 18—内特螨属(*Nenteria*);
- 19—巨螯螨属(*Macrocheles*); 20—新肋甲螨属(*Neoribates*);
- 21—大翼甲螨属(*Galumna*); 22—新革螨属(*Neogamasus*);
- 23—长单翼甲螨属(*Protoribates*); 24—东缝甲螨属(*Eohypochthonius*);
- 25—礼服甲螨属(*Thrypochthonius*); 26—卡盾螨属(*Krantzholaspis*).

图 5 土壤螨类与环境因子的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of soil mites and environmental factors

土壤螨类属数、个体数量和群落多样性各指标存在空间上的差异性,一方面在多样地间呈现 EBF1>EBF2>EBF3 的变化情形。森林生态系统中不同植被群落组成的复杂程度会对土壤动物产生影响,一般而言,植物群落组成越复杂,其能给土壤动物提供的小生境就越多,类群数也会有所提高^[31]。笔者对样地植被调查发现,EBF3 生境下土层较薄且多砂石,土壤板结导致容重较大,灌木层和草本层植物种类较少,在土壤层所捕获的土壤螨类个体数量较少,一定程度上可以说明群落组成复杂程度和多样性对土壤动物群落具有积极影响。另一方面在土壤垂直剖面上呈现出腐殖质层远大于土壤层的情形,且两者存在显著差异,即螨类垂直分布存在明显的表聚性,这与其他学者的研究结果一致^[32]。其主要原因可能与不同土壤剖面层微

生境间资源数量与质量差异有关。研究表明,腐殖质层具有一定的保温保湿效果,能够维持和提高土壤肥力,改善土壤的通气性及蓄水性,提升土壤微生物活性,同时对植物生长有促进作用^[33],为菌食性〔丽甲螨属(*Liacarus*)、盖头甲螨属(*Tectocephus*)、角单翼甲螨属(*Rostrozetes*)等〕、植食性〔沙珠足甲螨(*Eremobelba*)、杆棱甲螨属(*Mochlozetes*)、尖棱甲螨属(*Ceratozetes*)等〕和杂食性〔懒甲螨属(*Nothrus*)、小奥甲螨属(*Oppiella*)、盾珠甲螨属(*Suctobelba*)等〕土壤螨类提供了直接的食物来源和更多可利用的优质资源^[3],从而更加有利于土壤螨类的生长繁殖。此外,随着土层的加深,土壤孔隙度、含水量变小,土壤容重增加,不利于土壤螨类的下移与富集^[34]。对土壤物理性质的监测发现,土壤上层孔隙度、含水量均大于下层,而容重则相反。相关性分析也明确显示,土壤物理环境因子与土壤螨类群落组成有显著相关性。综上所述,土壤螨类群落具有垂直分布的特点,其主要受土壤环境因子和营养状况的制约。

3.2 森林土壤螨类的指示性作用

革螨(*Mesostigmata*)和甲螨(*Oribatida*)是土壤环境中的两大主要类群,捕食性革螨和甲螨的生态策略类型常被用作评价生态环境质量优良与稳定与否的重要指标。甲螨的群落组成已被证明对栖息地和土地利用的变化反应强烈,物种丰度、物种分布和群落结构在不同的层次上表现出空间变异。研究区的常绿阔叶林以全菌甲螨属(*Perschloribates*)、菌甲螨属(*Scheloribates*)等构成的菌甲螨科为优势科。在与研究区相邻的梵净山常绿阔叶林内,以角单翼角螨属(*Rostrozetes*)、针单翼甲螨属(*Setoxylobates*)构成的单翼甲螨科和混居甲螨属(*Mixacarus*)、裂甲螨属(*Meristacarus*)等构成的洛甲螨科为优势科,两者表现出了一定的差异^[27]。在欧洲不同类型森林环境中,尖棱甲螨属(*Ceratozetes*)、盾珠甲螨属(*Suctobelba*)、暗卷甲螨属(*Atropacarus*)等为主要的优势属^[35];墨西哥格鲁吉亚米特拉国家公园的森林群落则以缙板颚甲螨属(*Chamobates*)为优势类群^[36]。尽管类群有差异,但是它们在土壤养分的分解过程中都起着直接和间接的作用,被认为是陆地生态系统的生物指示器。在研究区常绿阔叶林土壤甲螨结构组成中,少数属的种群数量占个体总数的绝大部分,甲螨群落以少数属为主,属更替率高,这是不稳定生态系统的典型模式^[30],说明遗产地的常绿阔叶林具有不稳定性脆弱性的特点。

土壤中的革螨很大一部分是捕食性,它们以捕食者的身份影响着其他土壤生物的种群生长,是土壤生态系统成长和稳定的重要影响因素。根据革螨的生长特点,可将其分为 K 选择类群和 r 选择类群,通常认为 K 选择型比例越高,环境所受扰动就越小,因此可以根据两者的比例变化来反映捕食性革螨的群落结构特征,从而评价环境变化^[26]。研究区的捕食性革螨 r 选择型所占比例较大,说明遗产地的常绿阔叶林在一定程度上受到了干扰,这可能是因为遗产地的常绿阔叶林带多分布在山体较为陡峭的地区,土壤较为贫瘠且易受到水土流失的影响,因此环境的稳定性较差。

研究区的土壤螨类存在 r 选择和 O 型生态类群占优势的情形,这在一定程度上反映了螨类生态类群分布与生境梯度的不一致性和不协调性,该研究结果与陈浒等^[30]的研究相似,这有待对遗产地山地森林环境的土壤螨类进行进一步探究。

3.3 土壤螨类群落对土壤环境因子的响应

土壤环境因子与土壤螨类的群落组成和分布有着密切的关系,一方面土壤理化因子是土壤螨类的生存条件,制约着其种群分布;另一方面土壤螨类通过其生命活动改变土壤环境,因此环境变化与土壤螨类之间存在协同适应关系,不同类群土壤螨群落多样性对环境因子有不同的响应^[17,32,34]。该研究中土壤螨类群落各参数(属数、个体数量、多样性指数和丰富度指数)分别与土壤孔隙度、含水量和有机质含量存在显著正相关性($P < 0.05$),与全磷、全钾含量和土壤容重呈现负相关关系。这种变化情形与笔者对各样地土壤螨类群落和土壤环境因子的监测相互印证,EBF1和EBF2生境下土壤孔隙度、有机质含量、含水量均高于EBF3生境,土壤全钾含量和容重则呈现相异的变化,与之对应的是在EBF1和EBF2生境下捕获的螨类个体数量、属数以及群落多样性参数都比EBF3生境下大,表明土壤螨类对土壤环境因子变化的响应具有敏感性。

此外,土壤螨类各类群与环境因子的冗余分析进一步揭示了有机质对土壤螨类组成和分布有着显著影响($P < 0.05$)。其可能原因是土壤有机碳含量的增加会提高灌草层植被物种多样性,为土壤螨类提供丰富多样的食物资源和适宜的栖息环境,进而促使对环境因子偏好的螨类数量和多样性增加。有研究表明,降低土壤容重、改善土壤孔隙度和通气状况、提高土壤有机质含量有利于多种土壤螨类的生存和繁殖^[37],同时也有研究发现土壤养分减少可能导致土壤动物群落密度降低^[38]。相关研究表

明,土壤容重、含水量以及有机碳含量等土壤理化指标受植被群落盖度、地上生物量以及物种多样性的影响^[39]。由于此次研究没有对地上植被多样性、生物量以及凋落物等进行分析,今后还需要进一步开展更全面与深入的研究,来明晰土壤螨类在喀斯特森林生态系统的适应与响应机制。

4 结论

施秉喀斯特世界自然遗产地的常绿阔叶林生态系统中土壤螨类资源丰富,且具有一定的独特性。研究期间共捕获土壤螨类 1 563 头,隶属于 3 目 55 科 91 属,全菌甲螨属(*Perscheloribates*)为不同植被群落下的共同优势类群,对区域内不同微生境具有广泛的适应性,可以作为遗产地森林生态系统的指示螨类物种。土壤螨类群落结构在不同植被群落间存在差异性,垂直分布上有明显的表聚性,其主要受土壤环境因子和营养状况的制约。遗产地常绿阔叶林土壤螨类结构组成中,少数属的种群数量占个体总数的绝大部分,说明遗产地的常绿阔叶林生境具有不稳定性 and 脆弱性的特点。土壤螨类群落结构及多样性的空间分布主要受土壤孔隙度、含水量和有机质含量的影响。

参考文献:

- [1] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, *et al.* Ecological Linkages between Aboveground and Belowground Biota[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1629–1633.
- [2] DECAËNS T, JIMÉNEZ J J, GIOIA C, *et al.* The Values of Soil Animals for Conservation Biology [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: 23–38.
- [3] SCHNEIDER K, MIGGE S, NORTON R A, *et al.* Trophic Niche Differentiation in Soil Microarthropods (Oribatida, Acari): Evidence from Stable Isotope Ratios (¹⁵N/¹⁴N) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1769–1774.
- [4] LENOIR L, PERSSON T, BENGTSOON J, *et al.* Bottom-up or Top-down Control in Forest Soil Microcosms? Effects of Soil Fauna on Fungal Biomass and C/N Mineralisation [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(3): 281–294.
- [5] KORBOULEWSKY N, PEREZ G, CHAUVAT M. How Tree Diversity Affects Soil Fauna Diversity? A Review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 94: 94–106.
- [6] DE GROOT G A, JAGERS O A G A J M, DIMMERS W J, *et al.* Biomass and Diversity of Soil Mite Functional Groups Respond to Intensification of Land Management, Potentially Affecting Soil Ecosystem Services [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2016, 4: 15.
- [7] 罗鼎晖, 李翔, 骆蓓菁, 等. 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 [J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(3): 349–357. [LUO Ding-hui, LI Xiang, LUO Bei-jing, *et al.* Soil Meso- and Micro-Fauna Characteristics in Evergreen Broad-leaved Forest and Deciduous Broad-leaved Forest in Dajinshan Island, China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(3): 349–357.]
- [8] 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 Xiu-qin, SONG Bo, DONG Wei-hua, *et al.* A Review on the Eco-Geography of Soil Fauna in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 91–102.]
- [9] WISSUWA J, SALAMON J A, FRANK T. Effects of Habitat Age and Plant Species on Predatory Mites (Acari, Mesostigmata) in Grassy Arable Fallows in Eastern Austria [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 50: 96–107.
- [10] SABINE A. Factors Influencing the Distribution and Abundance of Earthworm Communities in Pure and Converted Scots Pine Stands [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33(1): 10–21.
- [11] EISENHAUER N. The Action of an Animal Ecosystem Engineer: Identification of the Main Mechanisms of Earthworm Impacts on Soil Microarthropods [J]. *Pedobiologia*, 2010, 53(6): 343–352.
- [12] 李晓娜, 熊康宁, 陈浒, 等. 黔东南施秉白云岩喀斯特地区生物多样性与世界遗产价值 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(3): 13–18. [LI Xiao-na, XIONG Kang-ning, CHEN Hu, *et al.* Biodiversity and World Heritage Values of Shibing Dolomite Karst Area in Qiongdongnan [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2010, 28(3): 13–18.]
- [13] 李高聪, 熊康宁, 肖时珍, 等. 施秉喀斯特地貌世界遗产价值研究 [J]. *热带地理*, 2013, 33(5): 562–569. [LI Gao-cong, XIONG Kang-ning, XIAO Shi-zhen, *et al.* Research on World Heritage Geomorphologic Value of the Shibing Karst [J]. *Tropical Geography*, 2013, 33(5): 562–569.]
- [14] 张燕, 金道超, 周玉凤, 等. 贵州施秉喀斯特地区林地土壤甲螨的群落组成及多样性 [J]. *昆虫学报*, 2015, 58(7): 791–799. [ZHANG Y, JIN D C, ZHOU Y F, *et al.* Community Composition and Diversity of Soil Oribatid Mites (Acari; Oribatida) in Karst Forests in Shibing, Guizhou, Southwestern China [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2015, 58(7): 791–799.]
- [15] 王帅, 高尔刚, 罗小菊, 等. 施秉典型常绿阔叶林森林群落特征 [J]. *分子植物育种*, 2019, 17(10): 3432–3441. [WANG Shuai, GAO Er-gang, LUO Xiao-ju, *et al.* Characteristics of Forest Communities of Typical Evergreen Broad-leaved Forest in Shibing [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(10): 3432–3441.]
- [16] 李隆术, 李云瑞. 螨类学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [17] KRANTZ G W, WALTER D E. A Manual of Acarology [M]. 3rd ed. Texas, USA: Texas Tech University Press, 2009.
- [18] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 163–242.
- [19] 殷绥公, 贝纳新, 陈万鹏. 中国东北土壤革螨 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 22–339.
- [20] 鲍士坦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1–114.
- [21] 郑祥, 鲍毅新, 孔军苗, 等. 金华北山阔叶林大型土壤动物群落的初步研究 [J]. *土壤*, 2005, 37(5): 545–550. [ZHENG Xiang, BAO Yi-xin, KONG Jun-miao, *et al.* Soil Macrofauna in Broadleaf

- Forest in Mountain Bei of Jinhua [J]. Soils, 2005, 37 (5): 545-550.]
- [22] YEATES G W. Nematode Diversity in Agroecosystems [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1999, 74 (1/2/3): 113-135.
- [23] AOKI J I, KARASAWA S. A New Species of the Genus *fenestrella* (Acari: Oribatida) from Okinawa, Japan [J]. Journal of the Acarological Society of Japan, 2007, 16 (1): 5-9.
- [24] 谢桂林, 傅荣恕, 刘建丽, 等. 菏泽牡丹园土壤甲螨群落特点研究 [J]. 生态学报, 2004, 24 (4): 693-699. [XIE Gui-lin, FU Rong-shu, LIU Jian-li, et al. The Community Distribution of Soil Oribatida in Heze Peony Garden [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (4): 693-699.]
- [25] 傅荣恕, 尹文英. 伏牛山地区土壤动物群落的初步研究 [J]. 动物学研究, 1999, 20 (5): 396-398. [FU Rong-shu, YIN Wen-ying. The primitivestudy of soil Animals in Funiu Mountain Area, Henan province [J]. Zoological Research, 1999, 20 (5): 396-398.]
- [26] ANDREA R. A Maturity Index for Predatory Soil Mites (Mesostigmata: Gamasina) as an Indicator of Environmental Impacts of Pollution on Forest Soils [J]. Applied Soil Ecology, 1998, 9 (1/2/3): 447-452.
- [27] 王鹏举, 陈浒, 周政, 等. 梵净山常绿落叶阔叶混交林土壤螨类群落结构研究 [J]. 土壤, 2018, 50 (4): 687-695. [WANG Peng-ju, CHEN Hu, ZHOU Zheng, et al. Soil Mite Community Structure in Mixed Evergreen and Deciduous Broad-leaved Forest of Fanjingshan [J]. Soils, 2018, 50 (4): 687-695.]
- [28] ZHOU Y Y, WEI Q, XIAO N J, et al. Characteristics of Soil Mites Communities Structure under Vegetation Vertical Gradient in the Shibing World Natural Heritage Property, China [J]. Forests, 2022, 13 (4): 598.
- [29] 王壮壮, 李天顺, 朱时应, 等. 热振森林大型土壤动物群落特征及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2022, 42 (7): 3392-3402. [WANG Zhuang-zhuang, LI Tian-shun, ZHU Shi-ying, et al. Community Characteristics of Soil Macrofauna and Its Influencing Factors at Rating Forest [J]. China Environmental Science, 2022, 42 (7): 3392-3402.]
- [30] 陈浒, 金道超, 文正红. 不同石漠化类型喀斯特地区土壤螨类群落结构的差异 [J]. 应用昆虫学报, 2018, 55 (4): 711-724. [CHEN Hu, JIN Dao-chao, WEN Zheng-hong. Differences in Soil Mite Communities in Karst Areas with Different Degrees of Rocky Desertification [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2018, 55 (4): 711-724.]
- [31] 杨光蓉, 豆鹏鹏, 马瑜, 等. 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 [J]. 生态学报, 2020, 40 (21): 7602-7610. [YANG Guang-rong, DOU Peng-peng, MA Yu, et al. Characteristics and Influencing Factors of Surface Soil Fauna Community in a Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest of Jinfo Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (21): 7602-7610.]
- [32] 陈浒, 金道超, 张燕. 喀斯特小流域栓皮栎林土壤螨类群落结构特征 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (5): 1667-1676. [CHEN Hu, JIN Dao-chao, ZHANG Yan. Community Structure of Soil Mites under Quercus Variabilis Forests in Small Watershed of Karst Area, Guizhou, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (5): 1667-1676.]
- [33] 卫芯宇, 倪祥银, 谌亚, 等. 三种不同类型亚高山森林凋落物输入对土壤腐殖化的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41 (20): 8266-8275. [WEI Xin-yu, NI Xiang-yin, SHEN Ya, et al. Effects of Litterfall on Soil Humification in Three Subalpine Forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (20): 8266-8275.]
- [34] 排孜丽耶·合力力, 吾玛尔·阿布力孜, 阿丽亚·司地克. 新疆天山森林公园土壤螨类群落多样性与环境因子的相关性 [J]. 生态学报, 2019, 39 (5): 1639-1652. [Pazliya HELIL, Omar ABLIZ, Aliya SIDIK. Correlation between the Diversity of Soil Mite Communities and Environmental Factors in Tianshan Forest Park in Xinjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (5): 1639-1652.]
- [35] ERDMANN G, SCHEU S, MARAUN M. Regional Factors rather than Forest Type Drive the Community Structure of Soil Living Oribatid Mites (Acari, Oribatida) [J]. Experimental and Applied Acarology, 2012, 57 (2): 157-169.
- [36] MURVANIDZE M, MUMLADZE L, ARABULI T, et al. Oribatida Diversity in Different Microhabitats of Mtirala National Park [J]. Journal of the Acarological Society of Japan, 2016, 25 (Suppl. 1): 35-49.
- [37] 阿加尔·恰肯, 吾玛尔·阿布力孜, 排孜力耶·合力力. 新疆玛纳斯河流域土壤螨类群落多样性 [J]. 生态学报, 2017, 37 (24): 8385-8396. [Ajar QAKEN, Omar ABLIZ, Fazliya HELIL. Community Diversity of Soil Mites in the Manas River Basin, Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (24): 8385-8396.]
- [38] HEMERIK L, BRUSSAARD L. Diversity of Soil Macroinvertebrates in Grasslands under Restoration Succession [J]. European Journal of Soil Biology, 2002, 38 (2): 145-150.
- [39] VIKETOFT M. Effects of Six Grassland Plant Species on Soil Nematodes: A Glasshouse Experiment [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40 (4): 906-915.

作者简介: 周园园 (1997—), 女, 安徽合肥人, 主要研究方向为喀斯特生态建设与区域经济。E-mail: 1181559954@qq.com

(责任编辑: 许素)