

退化喀斯特生态恢复过程对土壤微节肢动物群落多样性的影响

李宜蓉, 龙健, 李娟, 刘灵飞, 廖洪凯, 王显, 杨睿

引用本文:

李宜蓉, 龙健, 李娟, 等. 退化喀斯特生态恢复过程对土壤微节肢动物群落多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 310-318.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0728>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田对黑土农田土壤甲螨群落结构的影响

连旭, 隋玉柱, 武海涛, 刘冬, 郝敏, 管强

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 134-142 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0911>

西藏山坡流动沙地物种多样性恢复及影响因素

李海东, 林乃峰, 廖承锐, 方颖

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1762-1770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1605>

(微)塑料污染对土壤生态系统的影响:进展与思考

朱永官, 朱冬, 许通, 马军

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 1-6 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1427>

土壤微塑料污染及生态效应研究进展

任欣伟, 唐景春, 于宸, 何娟

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1045-1058 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1409>

土壤跳虫对转EPSPS基因抗除草剂玉米CC-2种植的响应

范春苗, 王柏凤, 周蕾, 尹俊琦, 宋新元

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1203-1210 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1423>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李宜蓉, 龙健, 李娟, 等. 退化喀斯特生态恢复过程对土壤微节肢动物群落多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 310–318.

LI Yi-rong, LONG Jian, LI Juan, et al. Effects of the process of restoring degraded Karst on soil micro-arthropod community diversity[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(2): 310–318.



开放科学 OSID

退化喀斯特生态恢复过程对土壤微节肢动物群落多样性的影响

李宜蓉¹, 龙健^{1*}, 李娟², 刘灵飞¹, 廖洪凯¹, 王显¹, 杨睿¹

(1. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要:为研究退化喀斯特生态恢复演替过程中土壤微节肢动物的变化特征,采用空间代替时间的方法,选取茂兰自然保护区内的草地、灌木丛、灌木林和原森林4种不同演替过程的典型样地,采集土壤样品并分离鉴定土壤动物,分析退化喀斯特生态环境的恢复过程中土壤微节肢动物群落特征及其与土壤性状的关系。结果表明:共获得土壤微节肢动物121只,隶属2纲3目9科,土壤微节肢动物群落丰富,其中隐气门亚目螨、捕食性螨在不同的恢复阶段处于优势群落的地位。Pearson相关性分析表明,铵态氮、易氧化碳对土壤微节肢动物营养功能群落结构和多样性(除均匀度指数)的影响较为显著。研究表明,退化喀斯特生态环境恢复过程对土壤微节肢动物的多样性、丰富度和均匀性均产生了极显著影响($P \leq 0.01$),对于土壤微节肢动物微食物网的形成起到积极的作用。

关键词:喀斯特地区;土壤微节肢动物;土壤养分;多样性;生态恢复

中图分类号:S154 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2021)02-0310-09 doi:10.11654/jaes.2020-0728

Effects of the process of restoring degraded Karst on soil micro-arthropod community diversity

LI Yi-rong¹, LONG Jian^{1*}, LI Juan², LIU Ling-fei¹, LIAO Hong-kai¹, WANG Xian¹, YANG Rui¹

(1. Guizhou Provincial Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Department of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Four plots of representing succession in grassland, bush, shrubbery and original forest in Maolan Nature Reserve were selected, via the space-time replacement method, to study the impact on soil micro-arthropods of the restoration of a degraded Karst ecosystem. The characteristics of soil micro-arthropod communities and their relationship with the physicochemical factor of soil were analyzed during the process. The results recognized the presence of total of 121 soil micro-arthropods, belonging to two classes, three orders, and nine families, and that the community of soil micro-arthropods was rich, among which cryploglimatic and predatory mites were the dominant community at different stages. Pearson analysis showed that ammonium nitrogen and easily oxidizable carbon had significant effects on the structure

收稿日期:2020-06-28 录用日期:2020-10-19

作者简介:李宜蓉(1996—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为土壤食物网的结构与功能。E-mail:liyirongaa@yeah.net

*通信作者:龙健 E-mail:longjian22@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41661045);贵州省科技厅科技平台及人才团队计划项目(黔科合平台人才[2018]5609);贵州省百层次创新人才项目(黔科合平台人才[2020]6010);贵州省科技厅科学技术基金项目(黔科合基础[2020]1Z036);贵州师范大学2017年度学术新苗培养及创新探索项目(黔科合平台人才[2017]5726-55);贵州省喀斯特生态环境保护与治理人才基地项目

Project supported: National Natural Science Foundation of China (41661045); Guizhou Science and Technology Department Science and Technology Platform and Talent Team Plan Project ([2018]5609); Guizhou Hundred Level Innovative Talents Project ([2020]6010); Guizhou Science and Technology Department Science and Technology ([2020]1Z036); Guizhou Normal University 2017 Academic Seedling Training and Innovation Exploration Special Project ([2017]5726-55); Guizhou Karst Ecological Environment Protection and Governance Talent Base Project

and diversity of soils micro-arthropod communities in terms of their nutrient function (except for the Pielou index). The restoration of degraded Karst ecosystem has a very significant impact on the diversity, richness and uniformity of soil micro-arthropods, and plays a positive role in forming soil micro-arthropod communities.

Keywords: Karst regions; soil micro-arthropods; soil nutrition; biological diversity; ecological restoration

喀斯特地貌在世界各地的可溶性岩石地区的总面积约5.1亿 km^2 ,占地球陆地总面积的10%^[1],而我国西南地区有着世界上最大的喀斯特连片分布区,面积达55万 km^2 ,为中国四大生态环境脆弱区之一^[2]。不合理的人为活动,使茂兰自然保护区内部分地区生态严重退化乃至丧失,地表呈现出类似于荒漠化景观的演变过程或结果,这对于生物多样性、生态环境演化以及可持续发展等产生了极其明显的影响^[3-5]。目前关于喀斯特地区生态系统恢复与治理等问题受到了国内外学者们的高度关注。

土壤动物作为喀斯特生态系统中较为重要的分解者,在凋落物分解、土壤有机质形成、土壤结构改善以及植物演替影响中都扮演着十分重要的角色^[6-8]。另外土壤动物物种丰富,数量较多,对于外界环境反应较为敏感,其中土壤微节肢动物在生态系统中的功能尤为突出^[9],常被作为表征环境变化的重要因子,为土壤的健康状况提供指示作用^[10-11]。土壤微节肢动物是地下生态系统中的重要组成部分,在地下生态系统中所占比重较大,它们积极参与凋落物等有机物质的分解,促进其中碳(C)、氮(N)等营养元素的矿化,对于地下生态系统中的物质循环与能量流动具有重要意义^[12]。根据取食偏好将土壤微节肢动物归纳为食细菌螨、隐气门亚目螨、杂食性非隐气门亚目螨、食线虫螨、捕食性螨、杂食性弹尾目以及捕食性弹尾目7种营养功能群,从而使研究方向更具有针对性,也使得土壤微节肢动物在土壤食物网内的物质循环与能量流动更加清晰^[13]。

近年来,随着学者们对土壤微节肢动物的深入研究,各种小生境对土壤微节肢动物的影响受到了较多的关注。如余广彬等^[14]研究了热带森林不同演替阶段对土壤节肢动物群落结构特征的影响,李晓晶等^[15]研究了缙云山森林演替对土壤节肢动物群落组成与结构的影响,杨大星等^[16]研究了喀斯特地区马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段对中小型土壤节肢动物多样性的影响。虽然对不同生境、不同演替阶段下土壤微节肢动物的组成和结构特征有一定的研究,但是对于退化喀斯特地区生态恢复下的不同演替阶段对土壤微节肢动物影响的研究还鲜有报道。本研究在

贵州茂兰喀斯特地区选择了4个地类(草地、灌木丛、灌木林、原森林)来表征退化喀斯特生态恢复进程的初期阶段、中期阶段、过渡阶段、晚期阶段,分析不同恢复阶段下土壤微节肢动物的营养功能群结构与多样性特征,旨在了解退化喀斯特地区生态恢复对土壤微节肢动物的影响及其作用机制,从土壤微节肢动物的角度,为退化喀斯特地区土壤微节肢动物的保护和生态系统的恢复提供一定的数据支持和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省南部荔波县茂兰自然保护区内(107°52'10"~108°05'40"E, 25°09'20"~25°20'50"N)。该区为典型的喀斯特峰丛地貌,其海拔为430~1 078.6 m,平均海拔在800 m左右,年平均气温18.3℃,年均降水量为1 320.5 mm,集中分布在4—10月,相对湿度80%,属于中亚热带湿润季风气候。保护区内成土母岩主要以白云岩、石灰岩等碳酸岩石为主,土壤浅薄不连续,岩石裸露率高达80%。

经过实地调查研究,在研究区选取草地(Grassland)、灌木丛(Bushes)、灌木林(Shrubbery)和原森林(Forest)作为研究样地。

草地:早期阶段草地样地,位于茂兰自然保护区核心区边缘,周边无高大植物遮挡,地上无厚重凋落物,地表植物群落主要为阳性、耐旱的草本层,如求米草(*Oplismenus undulatifolius*)、金丝草(*Pogonatherum crinitum*)、三毛草(*Trisetum bifidum*)等。

灌木丛:中期阶段低矮灌木丛样地,位置与草地相邻,研究样地面积>1 hm^2 ,群落高度约2~5 m,盖度为60%左右,分为2层(灌木和草本),地表植物主要是腊莲绣球(*Hydrangea strigosa*)、青篱柴(*Tirpitzia sinensis*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)等。

灌木林:过渡期阶段的灌木林样地,位置与灌木丛相邻,研究样地面积>1 hm^2 ,群落高度约15~20 m,盖度为80%左右,分为3层(乔木、灌木和草本),地表植物主要是算盘子(*Glochidion puberum*)、轮叶木姜子(*Litsea verticillata* Hance)、巴东荚蒾(*Viburnum henryi*

Hemsl)、樟叶槭(*Acer cinnamomifolium*)、皱叶海桐(*Pittosporum crispulum*)等。

原森林:晚期阶段郁闭度较高的原森林样地,选取当地典型的中亚热带常绿落叶阔叶混交林,研究样地面积>1 hm²,森林面积大且连续,群落高度约40 m左右,盖度为95%左右,分为4层(乔木两层、灌木层和草本层),主要是树冠较大的青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、革叶铁榄(*Sinosideroxylon wightianum*)等和喜阴湿的柳叶蕨(*Cyrtogonellum fraxinellum*)、翠云草(*Selaginella uncinata*)、楼梯草(*Elatostema stewardii*)等,藤本及附生植物丰富。

1.2 试验设计与方法

选取贵州茂兰喀斯特原始森林典型峰丛地貌为主要研究区域,于2019年4月,在控制海拔、坡向等基本环境条件一致的前提下,采用空间代替时间的方法,选择草地、低矮灌木丛、灌木林、郁闭度较高的原森林4种同一空间下的样地来表征时间上退化喀斯特生态恢复的演替进程。分别在4种样地内设置3个50 cm×50 cm的随机重复样方,样方间距30~50 m,在每个重复样方内采用S型多点混合取样法采取表层原状土壤样品(50 cm×50 cm×5 cm)。4种样地共12个采样点(4种类型样地×3个重复样区)。

微节肢动物:利用环刀法,采用直径5 cm、高5 cm的环刀进行采样。将环刀带回实验室利用改良后的Tullgren漏斗法分离,然后根据《中国亚热带土壤动物》^[17]、《中国土壤动物》^[18]、《应用螨学》^[19]等参考书对其进行鉴定至目或科,之后按照节肢动物的取食偏好分为食细菌螨、隐气门亚目螨、杂食性非隐气门亚目螨、食线虫螨、捕食性螨、杂食性弹尾目以及捕食性弹尾目,并以营养功能群为基础对不同样地土壤动物的特征进行研究。

土壤性状:参考《土壤农化分析》^[20]进行测定。采用烘干法测土壤湿度(WC),采用重铬酸钾容量法-外加热法测土壤有机质含量(SOM),使用PHS-3B酸度计测土壤pH值,采用KMnO₄氧化法测易氧化有机碳(ROC),采用2 mol·L⁻¹ KCl溶液浸提法测铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N),温度用土壤温湿度计直接野外测量。

1.3 数据处理与分析

将所有样点的微节肢动物筛选鉴定之后再进行分析,根据以下公式计算土壤微节肢动物营养功能群落多样性和相似性指标^[21]。

(1) Density-Group 密度-类群指数

$$DG = (g/G) \sum_{i=1}^g (D_i \times C_i / D_{\max} \times C)$$

式中: g 是群落 i 的实有类群数; G 为总类群数; D_i 为群落 i 的个体数; C_i 为群落 i 在总群落中的呈现次数; $D_{\max}$ 为群落 i 在总群落中呈现个数的最大值; C 为总群落数。

(2) Shannon-Wiener 多样性指数

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

式中: P_i 为 N_i/N ; N_i 是群落 i 的个体数; N 是群落中所有类群的总个体数。

(3) Simpson 优势度指数

$$C = \sum P_i^2$$

式中: P_i 为 N_i/N ; N_i 为群落 i 的个体数; N 为群落中所有类群的总个体数。

(4) Pielou 均匀度指数

$$J = H / \ln S$$

式中: H 为Shannon-Wiener多样性指数; S 为总类群数。

(5) Margalef 丰富度指数

$$D = (S - 1) / \ln N$$

式中: S 为总类群数; N 为群落中所有类群的总个体数。

(6) Sørensen 相似性指数

$$S_1 = 2j / (a + b)$$

式中: j 为两个群落中共有的类群数; a 是样点 A 的类群数; b 是样地 B 的类群数。 $0 < S_1 < 0.25$,极为不相似; $0.25 < S_1 < 0.5$,中等不相似; $0.5 < S_1 < 0.75$,中等相似; $0.75 < S_1 < 1$,极为相似。

(7) Whittaker 相似性指数

$$S_2 = 1 - 0.5 \left(\sum |a_i - b_i| \right)$$

式中: a_i 是类群 i 的个体数在群落 A 中所占的比例; b_i 是类群 i 的个体数在群落 B 中所占的比例。

数据统计分析在R和SPSS 19.0软件下处理,利用最小显著差异法(LSD)检验土壤性状以及多样性指数在不同演替阶段下的差异情况,用Pearson相关性分析研究土壤性状及土壤微节肢动物的结构与多样性特征的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤性状

土壤性状分析结果见表1,SOM、ROC、WC的变

化较为显著,土壤温度、pH、NO₃-N在不同演替过程中的变化不显著。土壤温度灌木丛样地最高,原森林样地最低,整体呈现为灌木丛>灌木林>草地>原森林。灌木林样地的pH值最大(7.34),草地的pH值最小(6.90),pH值的整体变化较小,均表现为中性。SOM、WC、ROC含量随着演替进行向原森林阶段逐渐增加,原森林的SOM最高,并且在演替进程中其变化极为显著。这可能是因为随着演替的进行地表覆盖植被多样性、丰富性增加,土壤表层凋落物的多样性、厚度增加^[22]。而NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的含量在原森林、灌木丛处较高,灌木林、草地处较低,整体表现为原森林>灌木丛>草地>灌木林。土壤性状间相关性如表2所示,WC与SOM的相关性极显著,NH₄⁺-N与SOM和WC的相关性显著,ROC与SOM、WC、NH₄⁺-N的相关性极显著。在喀斯特原始复杂环境综合因素影响下,由于土壤性状的差异使土壤微节肢动物在不同生境条件下存在差异;另外植被类型的差异也是影响土壤节肢动物群落特征的主要因素^[23]。

2.2 不同演替阶段土壤微节肢动物营养功能群落分析

2.2.1 营养功能群落结构特征

不同演替阶段土壤微节肢动物营养功能群落结构见表3,4个研究样地共获得121只土壤动物,其中

弹尾目18只,蜉蝣目103只。弹尾目占总个体数的14.88%,主要存在于灌木林样地和原森林样地中;蜉蝣目在所有样地中均有存在,其数量占总个体数的85.12%,远大于弹尾目。根据取食偏好将土壤微节肢动物划分为7个营养功能群:食细菌螨、隐气门亚目螨、杂食性非隐气门亚目螨、食线虫螨、捕食性螨、杂食性弹尾目以及捕食性弹尾目。捕食性螨、隐气门螨占总个体数比例较大,捕食性弹尾目、食细菌螨、食线虫螨、食真菌弹尾目、杂食性非隐气门螨所占总个体数均在10%以下,其中杂食性非隐气门螨仅占总个体数的0.82%。草地样地中有隐气门螨和捕食性螨,分别占该样地的70.73%和29.63%。灌木丛样地中有食线虫螨、隐气门螨、食细菌螨、捕食性螨分别占该样地总数目的9.52%、9.52%、33.33%、47.62%,其中捕食性螨所占比例最高,食细菌螨次之。灌木林样地中无杂食性非隐气门螨,且捕食性螨所占的比例最高,为54.29%。原森林样地中包含所有功能群,其中捕食性螨所占比例最高为39.47%,食真菌弹尾目和隐气门螨次之,均为13.16%,杂食性非隐气门螨和食细菌螨所占比例最低均为2.63%。以上分析表明,隐气门亚目螨和捕食性螨在不同的样地中所占比重较大,即在演替的不同阶段和不同生境下其均为优势功

表1 各采样点的土壤主要性状(平均值±标准误差)
Table 1 Soil properties in the different sites(Mean±SE)

样点 Sites	温度 T/℃	pH(1:2.5H ₂ O)	土壤有机质 SOM/(mg·kg ⁻¹)	含水率 WC/%	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	易氧化碳 ROC/(mg·kg ⁻¹)
草地	22.73±1.46a	6.90±0.32a	42.69±1.51c	28.09±0.70c	6.16±0.73b	0.48±0.02a	7.94±1.66c
灌木丛	23.97±2.07a	7.15±0.24a	46.10±0.19bc	28.90±0.21c	12.96±0.31a	0.57±0.03a	9.75±0.13bc
灌木林	23.00±1.90a	7.34±0.23a	67.84±0.58ab	39.37±1.10b	5.02±0.35b	0.46±0.12a	13.18±0.02ab
原森林	22.17±0.90a	6.95±0.19a	81.35±16.43a	46.41±1.29a	15.28±3.63a	0.63±0.12a	25.93±3.06a

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.01)。下同。
Note:The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at P<0.01. The same below.

表2 土壤性状的相关性分析
Table 2 Correlation analysis between soil properties

土壤性状 Soil properties	温度 T	pH(1:2.5H ₂ O)	土壤有机质 SOM	含水率 WC	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	易氧化碳 ROC
T	1						
pH(1:2.5H ₂ O)	-0.162	1					
SOM	-0.254	0.064	1				
WC	-0.240	-0.011	0.853**	1			
NH ₄ ⁺ -N	0.243	-0.270	0.682*	0.647*	1		
NO ₃ ⁻ -N	0.157	-0.652*	0.254	0.060	0.462	1	
ROC	0.041	0.070	0.932**	0.806**	0.813**	0.352	1

注:*在0.05水平(双侧)上显著相关。**在0.01水平(双侧)上显著相关。下同。
Note:* and ** mean significant differences among treatments at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively. The same below.

能群。

2.2.2 营养功能群落多样性

不同演替阶段土壤微节肢动物群落多样性指数见表4,可知土壤微节肢动物功能群落的各项指数在演替过程中均无显著差异。Density-Group指数可以很好地描述动物群落的发展过程,其数值越大表示群落内各个类群间干扰性越小,彼此之间独立。灌木林和原森林的Density-Group指数分别为0.12和0.11,而草地则低至0.02,但均无显著差异。Shannon-Wiener指数排序:原森林>灌木丛>灌木林>草地,其中原森林的Shannon-Wiener为1.19。原森林的Margalef指数最大(1.33),而草地最小(0.5)。草地的Simpson指数最高为0.63,Simpson指数排序:草地>灌木林>灌木丛>原森林。原森林、灌木林、灌木丛的Pielou指数分别为0.48、0.47、0.47,而草地的Pielou指数较低为0.28。表明土壤微节肢动物营养功能群的多样性随着演替的进行有所增加。

2.2.3 营养功能群落相似性

通过Whittaker指数(W)和Sørensen指数(S)来表征不同演替过程下土壤微节肢动物群落之间的功能群组成及各功能群相对数量组成的相似度。若两功能群之间的指数越低,则相似度越小。由表5可知,就功能群的相对数量而言,原森林和灌木林的相似度最高(W=0.85),灌木丛和草地的相似度最低(W=0.39),其他样地之间相似度无较大变化,相似度系数在0.50~0.70之间分布较为均匀。从各功能群的组成

来看,原森林和灌木林的相似度最大(S=0.92),两不同样地的功能群组成极为相似,灌木林和灌木丛次之(S=0.80),两不同样地的功能群组成也是极为相似,原森林和草地相似度最低(S=0.44),两不同样地的功能群组成成为中等不相似,其他不同样地的功能群之间的相似系数在0.50~0.75之间,为中等相似。

2.3 不同演替阶段土壤微节肢动物营养功能群落与土壤性状的关系

2.3.1 营养功能群落结构与土壤性状的关系

通过土壤微节肢动物的个体数、物种数以及生物量来表征不同演替阶段土壤微节肢动物群落的结构。由表6可知,土壤微节肢动物的物种数与SOM、WC呈显著正相关关系,与NH₄⁺-N、ROC呈极显著正相关;土壤微节肢动物的生物量与NH₄⁺-N、ROC呈显著正相关关系;其他无显著相关性。表明在土壤性状中,NH₄⁺-N、ROC对于土壤微节肢动物的结构影响较大。

2.3.2 营养功能群落多样性与土壤性状的关系

利用Density-Group指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数、Pielou指数和Margalef指数来表征土壤微节肢动物群落多样性,以此来探讨不同演替进程土壤微节肢动物群落的变化情况。由表7可知,土壤微节肢动物Density-Group指数与NH₄⁺-N和ROC易氧化碳呈显著正相关;Shannon指数与WC呈显著正相关,与NH₄⁺-N和ROC存在极显著相关关系;Simpson指数与温度、NH₄⁺-N、ROC存在显著负相关关系;Margalef指数与WC、ROC存在显著相关性,与NH₄⁺-N存

表3 不同演替过程土壤动物各群落功能群结构

Table 3 Function structure of soil arthropod communities in different successional tropical forests

样点 Sites	捕食性弹尾目 Predaceous Collembolans		食线虫螨 Nematophagous mites		食真菌弹尾目 Collembolans		隐气门亚目螨 Cryptosligmatic mites		杂食性非隐气门螨 Non-Cryptosligmatic mite		食细菌螨 Bacterivorous mites		捕食性螨 Predaceous mites	
	数量/只	占比/%	数量/只	占比/%	数量/只	占比/%	数量/只	占比/%	数量/只	占比/%	数量/只	占比/%	数量/只	占比/%
草地	0	0	0	0	0	0	19	70.37	0	0	0	0	8	29.63
灌木丛	0	0	2	9.52	0	0	2	9.52	0	0	7	33.33	10	47.62
灌木林	2	5.71	3	8.57	3	8.57	7	20.00	0	0	1	2.86	19	54.29
原森林	8	5.26	3	7.89	5	13.16	5	13.16	1	2.63	1	2.63	15	39.47
比例/%	8.26		6.61		6.61		27.27		0.82		7.43		42.97	

表4 不同演替阶段土壤微节肢动物群落多样性指数

Table 4 Diversity index of soil arthropod communities in different successional tropical forests

样点 Sites	密度-类群指数 Density-Group	多样性指数 Shannon-Wiener	优势度指数 Simpson	均匀度指数 Pielou	丰富度指数 Margalef
草地	0.02±0.01a	0.53±0.25a	0.63±0.21a	0.28±0.10a	0.50±0.12a
灌木丛	0.04±0.03a	0.88±0.38a	0.45±0.15a	0.47±0.24a	0.90±0.67a
灌木林	0.12±0.18a	0.87±0.47a	0.50±0.17a	0.47±0.10a	1.04±0.41a
原森林	0.11±0.06a	1.19±0.17a	0.38±0.09a	0.48±0.03a	1.33±0.07a

在极显著正相关关系;其他相关性均不显著。分析表明,NH₄⁺-N和ROC对土壤微节肢动物营养功能群落多样性指数(除Pielou指数)的影响较大。

3 讨论

3.1 不同恢复阶段对土壤微节肢动物功能群落多样性的影响

退化喀斯特生态恢复的不同演替阶段会对土壤微节肢动物营养功能群落多样性产生影响,演替的进行提高了土壤微节肢动物营养功能群的丰富度、均匀度、多样性,降低了其优势度,使得土壤微节肢动物功能群落的分布更加平均,优势群落不突出,这与赵哈林等^[24]研究结果相似。土壤微节肢动物营养功能群落的Density-Group指数、Shannon-Wiener指数、Margalef指数等对退化喀斯特生态环境不同的恢复阶段具有一定的指示作用^[25]。在本研究中,土壤微节肢动物类群的Margalef指数的大小表现为原森林>灌木林>灌木丛>草地,这可能与地表凋落物的厚度和地表植物的盖度有关^[8]。根据我们的野外调查,草地样地、

灌木丛样地、灌木林样地、原森林样地的地表凋落物覆盖和地上植被盖度均逐渐增加,避免了阳光的直射并为地表微节肢动物提供了生活空间。而Simpson指数恰好相反,草地样地最高,原森林样地最低,Density-Group指数在灌木林和原森林恢复阶段相差较小,甚至有减小的趋势,这可能是由于土壤微节肢动物的密度和类群数目在灌木林处达到了较为稳定的状态或最大值状态^[26]。退化喀斯特生态环境的不同恢复阶段对各功能群的组成以及相对数量会产生一定的差异性影响^[27],这有助于了解土壤微节肢动物对不同恢复阶段的响应,可为如何利用土壤微节肢动物功能群落来指示退化喀斯特生态环境的恢复阶段提供数据参考^[28-29]。

Sørensen指数表征群落物种的相似性,Whittaker指数表征群落间种群组成的相似性,原森林与灌木丛、草地之间的土壤微节肢动物群落相似性较低,灌木林与草地之间和灌木丛与草地之间的土壤微节肢动物群落的相似性均较低,而原森林与灌木林、灌木林与灌木丛、灌木丛与草地在演替过程相邻的两个阶

表5 不同演替阶段土壤微节肢动物群落相似性系数

Table 5 Similarity index of soil arthropod communities in different successional tropical forests

指数 Index	样点 Sites	草地 Grassland	灌木丛 Bushes	灌木林 Shrubbery	原森林 Forest	样点 Sites	指数 Index
Whittaker	草地 G		0.67	0.50	0.44	草地 G	Sørensen
	灌木丛 B	0.39		0.80	0.73	灌木丛 B	
	灌木林 S	0.50	0.69		0.92	灌木林 S	
	原森林 F	0.51	0.67	0.85		原森林 F	

注:表的左下部是Whittaker指数的内容;右上部是Sørensen指数的内容。
Note: The lower left part in table is Whittaker; The upper part in table is Sørensen.

表6 土壤微节肢动物群落结构与土壤性状的相关性

Table 6 Correlation analysis between structure of soil arthropod communities and soil properties

指标 Index	温度 T	pH(1:2.5H ₂ O)	土壤有机质 SOM	含水率 WC	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	易氧化碳 ROC
个体数	0.137	-0.071	0.387	0.419	0.479	0.180	0.508
物种数	0.364	-0.172	0.585*	0.693*	0.782**	0.306	0.758**
生物量	0.188	-0.152	0.513	0.559	0.578*	0.262	0.626*

表7 土壤微节肢动物群落多样性与土壤性状的相关性

Table 7 Correlation analysis between diversity of soil arthropod communities and soil properties

指数 Index	温度 T	pH (1:2.5H ₂ O)	土壤有机质 SOM	含水率 WC	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	易氧化碳 ROC
Density-Group 指数	0.370	-0.037	0.467	0.524	0.606*	0.229	0.660*
Shannon-wiener 指数	0.534	-0.191	0.558	0.615*	0.794**	0.398	0.759**
Simpson 指数	-0.619*	0.223	-0.445	-0.462	-0.674*	-0.450	-0.646*
Pielou 指数	0.546	-0.029	0.250	0.314	0.402	0.127	0.407
Margalef 度指数	0.447	-0.087	0.508	0.657*	0.728**	0.208	0.689*

段群落的相似性较高。说明随着演替阶段的进行,土壤微节肢动物营养功能群落的变化是具有一定连续性的。

3.2 不同恢复阶段对土壤微节肢动物功能群落组成和功能结构的影响

随着退化喀斯特环境的生态恢复,群落结构更加复杂和稳定,所形成的土壤环境可以适应和容纳更多种类的螨类和弹尾目,使得土壤微节肢动物营养功能群数量和种类更加丰富和多样化^[30-31]。草地样地土壤微节肢动物营养功能群落中隐气门亚目螨所占密度比重较大,而捕食性螨所占密度比重较小。原森林样地土壤微节肢动物营养功能群落中捕食性螨所占密度比重较大,隐气门亚目螨和食真菌弹尾目次之,其他营养功能群均存在,这表明随着恢复的进行营养功能群种类的丰富性增加,结构趋于复杂化,说明演替的进行为土壤微节肢动物提供了更加适宜的生存环境^[32-33],如地表凋落物的增加、地表植被树冠对阳光的遮挡等。隐气门亚目螨和捕食性螨在退化喀斯特生态环境的恢复过程中均存在,并且在恢复过程中所占比例变化相似(除草地样地),这可能是因为两者的生存环境具有一定的联系或者这两种功能群落对外界环境的适应能力较强。而捕食性螨在不同地类中的比重趋于最大,隐气门亚目螨次之,但在草地中隐气门亚目螨所占比重最大,捕食性螨次之,这可能是因为隐气门亚目螨的生存阈值更高,对WC等环境因素容忍度更高^[34]。因而隐气门亚目螨和捕食性螨或可用来表征退化喀斯特生态恢复过程中土壤环境的差异性,为人为干扰促进退化生态环境的恢复提供一定的依据^[35-36],在今后的研究中值得关注。

3.3 不同恢复阶段对土壤微节肢动物群落影响的成因分析

土壤微节肢动物群落的多样性与结构是受多种环境因子综合作用的结果,外界环境条件的变化对于土壤微节肢动物具有影响性和选择性^[37]。在受人为干扰较小的喀斯特自然保护区内,退化喀斯特生态恢复过程不同阶段土壤温度、pH值、 NO_3^- -N的差异性并不显著,故而对土壤微节肢动物群落的影响较小。与李伟等^[38]研究的太湖岸带湿地、许还等^[39]研究的长白山地典型农田生态系统等其他地方的土壤相比,茂兰自然保护区内SOC和WC比较高,所以尽管不同演替阶段SOC和WC的差异显著,但是其对土壤微节肢动物的丰富性和多样性没有特别显著的影响,这与杨大星等^[40]研究pH值和SOC等对黔南喀斯特土壤螨类影

响的结果一致。在土壤性状的相关性分析中显示,SOC和WC含水量与 NH_4^+ -N和ROC存在显著正相关关系,表明SOC和WC会影响 NH_4^+ -N和ROC的含量。这可能是因为SOC和WC较高,促进了土壤的矿化和硝化^[41],但是土壤反硝化和磷酸盐淋溶增加,导致 NH_4^+ -N成为湿润生境的主要无机氮形态^[41]。

在退化喀斯特森林生态恢复过程中,土壤环境的变化对土壤微节肢动物群落特征产生了较为明显的影响,可能是因为三个方面:一是在不同的恢复阶段下,土壤的地表植被种类、覆盖度以及地表覆盖的凋落物均会有一定的差异,地表植被覆盖密集、隐蔽度大的区域土壤能够为土壤微节肢动物提供更加多样化的生存环境和更丰富的食物类型,从而有利于土壤微节肢动物丰富性和多样性的增加^[42]。二是土壤微节肢动物本身对环境的适应力,当土壤生态环境发生退化,大多数土壤微节肢动物被环境淘汰,耐力强、适应能力强的类群才得以续存^[40],如隐气门亚目螨、捕食性螨。三是土壤环境因子的变化对土壤微节肢动物的影响,尤其是土壤内的 NH_4^+ -N和ROC,其他土壤因子也会产生一定的影响但是并不显著^[5]。

4 结论

(1)退化喀斯特生态恢复过程中,土壤动物各群落间形成一个较为稳定的状态,表现为丰富度指数增加,群落多样化、均匀化增加,优势度减小。

(2)隐气门亚目螨和捕食性螨在不同演替阶段均为优势种群,该特征可用来表征退化喀斯特生态恢复的阶段过程。

(3)地表覆盖的凋落物和覆被植物的盖度对土壤微节肢动物的生存产生直接或间接影响;在SOC含量较高、水分充足的土壤中,土壤 NH_4^+ -N和ROC直接影响土壤微节肢动物的生存,成为限制土壤微节肢动物结构和多样性的主要因子之一。

参考文献:

- [1] 龙健,江新荣,邓启琼,等.贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J].土壤学报,2005,42(3):419-427. LONG Jian, JIANG Xin-rong, DENG Qi-qiong, et al. Characteristics of soil rocky desertification in the Karst region of Guizhou Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3):419-427.
- [2] 郑度.中国生态地理区域系统研究[M].北京:商务印书馆,2008. ZHENG Du. Study on regional systems of ecological geography in China[M]. Beijing: The Commercial Press, 2008.
- [3] 熊康宁,陈永华,陈洪.点石成金——贵州石漠化治理技术与模式[M].贵阳:贵州科技出版社,2011:42-70. XIONG Kang-ning,

- CHEN Yong-bi, CHEN Hu. Golden touch: Manage of technology and model of Karst in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2011: 42-70.
- [4] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279. ZHANG Xin-bao, WANG Shi-jie, CAO Jian-hua, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on Karst rocky desertification in southwest China Karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 274-279.
- [5] 韩慧莹, 殷秀琴, 寇新昌. 长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2197-2205. HAN Hui-ying, YIN Xiu-qin, KOU Xin-chang. Community characteristics of soil fauna in the low-mountain of the Changbai Mountains and its respond to the change of environmental factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2197-2205.
- [6] 王雅雅, 饶鑫, 童升洪, 等. 西沙永兴岛抗风桐与海岸桐群落凋落叶分解及中型土壤动物的贡献[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8805-8815. WANG Ya-ya, RAO Xin, TONG Sheng-hong, et al. Leaf litter decomposition and soil mesofauna contribution in *Pisonia grandis* and *Guettarda speciosa* plant communities in the Yongxing Island of South China Sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8805-8815.
- [7] 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 (Suppl): 23-38.
- [8] 龙健, 张明江, 赵畅, 等. 土壤动物对茂兰喀斯特森林凋落物分解过程中元素释放的作用[J]. 生态学报, 2019, 38(9): 2671-2682. LONG Jian, ZHANG Ming-jiang, ZHAO Chang, et al. Effects of soil fauna on element release during litter decomposition in Maolan Karst forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(9): 2671-2682.
- [9] 刘长海. 陕北枣林土壤动物群落的结构及其季节动态[D]. 北京: 北京林业大学, 2008. LIU Chang-hai. Community structure of soil fauna and its seasonal dynamic of jujube forest in northern region of Shaanxi[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [10] 徐演鹏. 外源碳、氮对土壤节肢动物群落的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014. XU Yan-peng. Effects of exogenous carbon and nitrogen on soil arthropod community[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [11] 吴克华, 熊康宁, 容丽, 等. 不同等级石漠化综合治理的植被恢复过程特征——以贵州省花江峡谷为例[J]. 地球与环境, 2007, 35(4): 327-335. WU Ke-hua, XIONG Kang-ning, RONG Li, et al. Characteristics of the process of vegetation restoration under different rocky desertification degrees by comprehensive treatment: A case study of the Huajiang gorge area, Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(4): 327-335.
- [12] 张文文, 肖晗冉, 杨宝玲, 等. 不同土地利用类型土壤动物对土壤氮矿化季节变化的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 20-26. ZHANG Wen-wen, XIAO Han-ran, YANG Bao-ling, et al. Effects of soil fauna on seasonal variations of soil N mineralization under different land use type[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2016, 40(6): 20-26.
- [13] 张文文. 苏北沿海不同土地利用类型土壤动物对土壤氮矿化的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2016. ZHANG Wen-wen. Effects of soil fauna on soil N mineralization under different land use in a coastal area of northern Jiangsu, China[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.
- [14] 余广彬, 杨效东. 不同演替阶段热带森林地表凋落物和土壤节肢动物群落特征[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 188-198. YU Guang-bin, YANG Xiao-dong. Characteristics of litter and soil arthropod communities at different successional stages of tropical forests[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 188-198.
- [15] 李晓晶, 刘玉安, 李春辉, 等. 缙云山森林演替对节肢动物多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(10): 35-38. LI Xiao-jing, LIU Yu-an, LI Chun-hui, et al. Effect of forest succession on arthropod diversity in Jinyun Mountain, Chongqing[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(10): 35-38.
- [16] 杨大星, 杨茂发, 徐进, 等. 马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段中小型土壤节肢动物多样性[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2531-2544. YANG Da-xing, YANG Mao-fa, XU Jin, et al. Soil meso-and micro-arthropod community diversity in the burned areas of *Pinus massoniana* plantation at different restoration stages[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2531-2544.
- [17] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 北京科学出版社, 1992. YIN Wen-ying. Subtropical soil animals of China[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1992.
- [18] 尹文英. 中国土壤动物[M]. 北京: 北京科学出版社, 2000. YIN Wen-ying. Soil animals of China[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2000.
- [19] 忻介六. 应用蜱螨学[M]. 北京: 科学出版社, 2000. XIN Jie-liu. Applied acarology[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO Shi-dan. Soil chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [21] 叶涛. 物种多样性综合指数研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014. YE Tao. The research on species diversity composite index[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [22] 宋理洪, 王可洪, 闫修民. 基于Meta分析的中国西南喀斯特地区土壤动物群落特征研究[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 984-990. SONG Li-hong, WANG Ke-hong, YAN Xiu-min. Characteristics of soil fauna communities in the Karst region southwest China based on Meta-analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 984-990.
- [23] 樊云龙, 熊康宁, 苏孝良, 等. 喀斯特高原不同植被演替阶段土壤动物群落特征[J]. 山地学报, 2010, 28(2): 226-233. FAN Yun-long, XIONG Kang-ning, SU Xiao-liang, et al. Research on soil fauna community characteristics at different vegetation successions in the Karst plateau of Guizhou Province[J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(2): 226-233.
- [24] 赵哈林, 刘任涛, 周瑞莲. 科尔沁沙地土地利用变化对大型土壤节肢动物群落影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 413-418. ZHAO Ha-lin, LIU Ren-tao, ZHOU Rui-lian. Effects of changes in land use on soil macro-arthropod communities in Horqin sand land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 413-418.

- [25] 丁程成. 退化红壤植被恢复对土壤节肢动物群落的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2007. DING Cheng-cheng. Influences of vegetation restoration on soil arthropods in degraded red soil[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [26] 戚琳, 韩承辉, 宋修超, 等. 线虫对土壤重金属污染的生物指示作用研究进展[J]. 绿色科技, 2017(12): 12-14, 19. QI Lin, HAN Cheng-hui, SONG Xiu-chao, et al. Advances in biological instructions of nematode on soil heavy metal pollution[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017(12): 12-14, 19.
- [27] 罗金明, 尹雄锐, 叶雅杰, 等. 大中型土壤动物对内陆盐沼沿退化序列环境的指示研究[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 287-295. LUO Jin-ming, YIN Xiong-rui, YE Ya-jie, et al. Response of soil large- and mesofauna to edaphic characterization along vegetation second succession sequence of inland saline marsh[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 287-295.
- [28] 叶岳, 姜玉霞, 赵则海. 大型土壤动物作为指示生物研究的现状与展望[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(17): 9320-9322. YE Yue, JIANG Yu-xia, ZHAO Ze-hai. Research status and prospect of soil macrofauna as indicator organism[J]. *Journal of Anhui Agriculture Sciences*, 2012, 40(17): 9320-9322.
- [29] 杨旭, 卢琦, 黄苛. 杉木人工林采伐撂荒后土壤动物的恢复特征[J]. 应用与环境生物学, 2020, 26(1): 55-62. YANG Xu, LU Qi, HUANG Ke. Characteristics of soil fauna restoration after fallow in clear-cut gaps of Chinese fir plantations[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(1): 55-62.
- [30] 陈浒. 石漠化及其生态治理区土壤螨类群落结构研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017. CHEN Hu. Study on the community structure of soil mites in the rocky desertification areas without and with ecological management[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.
- [31] 刘青山. 石漠化综合治理区农林景观边缘土壤螨类群落响应研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019. LIU Qing-shan. Response of soil fauna community at the edge of agroforestry landscape in rocky desertification comprehensive management area[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2019.
- [32] 王仙攀, 陈浒, 熊康宁, 等. 喀斯特石漠化地区土壤动物功能类群及培育研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 191-195. WANG Xian-pan, CHEN Hu, XIONG Kang-ning, et al. Research on the function groups of soil fauna in Karst stone desertification area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(12): 191-195.
- [33] 张婷, 孔云, 李刚, 等. 不同秸秆还田量对华北小麦-玉米体系土壤中小型节肢动物的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 70-75. ZHANG Ting, KONG Yun, LI Gang, et al. Effects of straw returning on soil meso- and micro-arthropod community diversity in wheat-maize fields in north China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(1): 70-75.
- [34] 杨大星, 杨茂发, 徐进. 生态恢复方式对喀斯特土壤节肢动物群落特征的影响[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(2): 91-94. YANG Da-xing, YANG Mao-fa, XU Jin. Effects of ecological recovery practices on the characteristics of soil arthropod community in Karst region[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2013, 41(2): 91-94.
- [35] 卢萍. 黑土区土壤弹尾虫群落多样性及其对外源C、N干扰的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014. LU Ping. The diversity of soil collembolan community and its responses to disturbance from exogenous carbon and nitrogen in black soil area[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [36] 邢树文, 王桔红, 梁秀霞, 等. 钨尾矿生态恢复中桉树林地表节肢动物群落特征及影响因子研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(4): 840-849. XING Shu-wen, WANG Ju-hong, LIANG Xiu-xia, et al. Study on community characteristics and influencing factors of surface arthropod in Eucalyptus forest during the process of ecological recovery of tungsten tailings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(4): 840-849.
- [37] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 等. 人工固沙植被恢复对地表节肢动物群落组成及多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1357-1365. LIU Ji-liang, ZHAO Wen-zhi, LI Feng-rui, et al. Effects of introduced sand-fixing vegetation on community structure and diversity in ground-dwelling arthropods[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1357-1365.
- [38] 李伟, 崔丽娟, 王小文, 等. 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与土壤理化性质的关系[J]. 林业科学, 2013, 49(7): 106-113. LI Wei, CUI Li-juan, WANG Xiao-wen, et al. Relationship between soil animal community structure and soil physical and chemical properties in lake Taihu lakeshore, China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(7): 106-113.
- [39] 许还, 殷秀琴, 马辰. 长白山地典型农田生态系统土壤跳虫群落结构及其生态分布特征[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 8005-8014. XU Huan, YIN Xiu-qin, MA Chen. Community structure and ecological distribution of soil collembola from typical farmland ecosystems in the Changbai Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 8005-8014.
- [40] 杨大星, 杨茂发. 黔南不同撂荒地土壤节肢动物群落特征[J]. 贵州农业科学, 2016, 44(6): 149-154. YANG Da-xing, YANG Mao-fa. Community characteristics of soil arthropod in different abandoned lands in south Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2016, 44(6): 149-154.
- [41] 孙建坤. 土壤微生物和环境因子对长白山不同海拔生境土壤氮转化的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. SUN Jian-kun. Effects of soil microbes and environmental factors on soil nitrogen cycling in habitats of different altitudes on Changbai Mountain[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [42] 赵畅. 茂林喀斯特森林凋落物-土壤系统的养分动态变化及其相互影响机制[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2018. ZHAO Chang. Dynamic changes and mutual effects of litter-soil system in Maolan Karst forest[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2018.