

退耕还林区不同植被类型土壤动物多样性特征研究

刘 姣¹, 曹四平², 高 荣¹, 宗巧鱼¹, 郝宝宝¹, 刘长海^{1*}

(1. 延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 71600; 2. 石泉县环保局, 陕西 安康 725200)

摘 要: 为了解退耕还林区土壤动物群落组成及结构, 阐明不同植被类型下土壤动物多样性特征, 选取吴起县大吉沟流域不同植被类型样地进行土壤动物调查。结果表明: 1) 研究区共捕获土壤动物 271 头, 隶属于 2 门 7 纲 15 目, 其中优势类群为鞘翅目(Coleoptera)、半翅目(Hemiptera)、膜翅目(Hymenoptera)及革翅目(Dermaptera); 2) 不同植被类型下土壤动物类群数、个体数及多样性指数均存在显著差异($P < 0.05$); 土壤动物个体数量和多样性指数除个别植被类型外, 均表现为混交林大于单一植被林; 3) 各样地相似性系数分析表明, 不同植被类型优势类群个体数量受林地植被复杂程度的影响, 同时土壤动物结构与类群正在向复杂与稳定发展。研究结果表明, 不同植被类型土壤动物群落组成和多样性有所差异, 同时, 会形成与其相适应的土壤动物类群。

关键词: 不同植被类型; 土壤动物群落; 多样性指数

中图分类号: S154.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2022)01-0060-07

Diversity Characteristics of Soil Animals in Different Vegetation Types in the Area of Returning Farmland to Forest

LIU Jiao¹, CAO Si-ping², GAO Rong¹, ZONG Qiao-yu¹, HAO Bao-bao¹, LIU Chang-hai^{1*}

(1. College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an 71600, Shaanxi, China;

2. Shiquan County Environmental Protection Bureau, Ankang 725200, Shaanxi, China)

Abstract: In order to understand the composition and structure of soil fauna communities in the area of converting farmland to forest, and to clarify the characteristics of soil fauna diversity under different vegetation types, sample plots with different vegetation types in the Dajigou watershed in the Wuqi County were selected to conduct soil fauna surveys. The following results were obtained. 1) A total of 271 soil fauna were captured in the study area, belonging to 2 phyla, 7 classes and 15 orders; the dominant groups were Coleoptera, Hemiptera, Hymenoptera and Dermaptera. 2) There were significant differences in the number of soil animal groups, individuals and diversity index under different vegetation types ($P < 0.05$); generally, the number of individuals and the diversity index of soil fauna in the mixed forest were higher than those of single forest with very few exceptions. 3) The analysis of the similarity coefficients of various plots showed that the number of individuals in the dominant groups of different vegetation types was affected by the complexity of the forest vegetation; and the structure and groups of soil fauna were developing complex and stable. The results of the study demonstrated that the composition and diversity of soil fauna communities of different vegetation types were different, and at the same time, suitable soil fauna groups would be formed.

Key words: different vegetation type; soil fauna community; diversity index

收稿日期: 2020-12-15 修回日期: 2021-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(32060297, 31370541); 国家重点研发计划课题(2016YFC0501705); 研究生教育创新计划项目(YCX201932); 国家级大学生创新训练计划项目(201910719054)。

第一作者: 刘 姣。研究方向: 动物生态学及修复生态。E-mail: 1528078108@qq.com

* 通信作者: 刘长海, 博士, 教授。研究方向: 动物生态学及修复生态。E-mail: yadxlch@yau.edu.cn

退耕还林(草)工程自 1999 年实施以来,地表植被发生巨大变化,植被覆盖率显著提升,对我国的生态系统结构和服务功能产生了重大的影响^[1]。吴起县作为“退耕还林第一县”自 1998 年实施封山禁牧、退耕还林(草),林草覆盖率从造林前的 19.2%增加至 62.9%^[2],退耕还林(草)使得土壤的结构与功能发生改变,土壤动物群落也因此受到影响^[3-4]。李涛等^[5]指出,土壤动物不仅能够敏感地反映环境的变化,还可以通过摄食等活动对土壤理化性质造成影响,进而改变植被-土壤生态系统的物质循环进程^[6-7]。

土壤动物可以促进凋落物和有机质分解,加速物质循环,改变土壤结构等,在维持食物网结构、生态系统结构与功能和生态服务功能等方面起着十分关键的作用^[8-11]。

同时,土壤质量与土壤动物也息息相关,土壤动物已成为土壤和土地质量评价的一个重要指标^[12]。目前,国内外关于土壤动物的研究热点是蚯蚓、线虫等土壤动物及其对农田生态系统的影响^[7]。国内研究区主要位于青藏高原^[12-16]、华东^[17]、华北^[18]、东北^[19]、西南^[20-22]、西北(宁夏)^[23-24]等地区,但有关陕北土壤动物群落的研究内容较少;人工植被群落恢复对土壤动物群落组成及多样性影响的认知尚不明确^[25]。因此,本研究以陕北黄土区典型退耕林地的大、中型土壤动物为对象,旨在丰富退耕还林(草)区土壤动物群落的研究内容,揭示其恢复进程与机理,为该地区林地管理与利用、生物多样性保护、生态系统结构与功能恢复提供理论与实践依据。

1 研究区概况

选择延安市吴起县大吉沟流域为研究区。吴起位于延安市西北角(107°38′57″—108°32′49″E,36°33′33″—37°24′27″N),近 40 a,累年极端最低气温出

现在 12 月,累年年均气温 8.2℃,相对湿度 60%,无霜期 120~155 d,年均降水量 442.6 mm。地处西北农牧交错带,位于黄土高原西北部,属中温带半湿润、半干旱区,为暖温带大陆性干旱季风气候。该地区原生植被已基本消失,近年来由于人工生态恢复措施的介入,草原植被逐渐向灌丛森林过渡,形成了大面积的灌木林和乔灌混交林。其中退耕还林(草)采用了纯林和混交林 2 种方式,纯林树种主要为柠条(*Caragana koshinskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等,混交林为沙棘×山杏、刺槐×沙棘等^[1]。

2 研究方法

2.1 样地设置

先对大吉沟进行了实际踏地,随后选取了 10 个 10 m×10 m 的样方进行研究。植被分别为柠条、油松、刺槐、小叶杨(*Populus simonii*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)、山桃×油松混交林、刺槐×沙棘混交林、沙棘×油松混交林、刺槐×油松混交林和山杏×油松混交林(表 1)。

2.2 野外采样

根据实地踏查结果,选取 10 个不同植被类型作为采样区。选择土壤动物活动频繁的时间段,且天气晴好时前往采样区进行土壤动物采样。在采样区内随机划分大小为 10 m×10 m 的样方,每个取样点按照“品”字型设置 3 重复采样,每个小样方的大小为 50 cm×50 cm,按照土层垂直 0~10 cm 和 10~20 cm 2 个层次分层采集每层内全部土壤动物。主要利用手捡分离法采集,较小的用吸虫器收集,对各样地采集的标本用 75%的酒精固定装瓶并标记,带回实验室进行分类鉴定。

表 1 采样地点信息
Table 1 Information of sampling locations

样地	植被	林下植被
1	柠条(NT)	铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)、萎陵菜(<i>Potentilla chinensis</i>)、野菊(<i>Dendranthema indicum</i>)、白蒿(<i>Artemisia sieversiana</i>)
2	油松(YS)	茅草(<i>Cymbopogon citratus</i>)、棘豆(<i>Oxytropis ochrantha</i>)
3	刺槐(CH)	天门冬(<i>Asparagus cochinchinensis</i>)、补血草(<i>Limonium</i>)、青杞(<i>Solanum septemlobum</i>)、铁杆蒿、棘豆
4	小叶杨(YYY)	披针叶黄华(<i>Thermopsis lanceolata</i>)、铁杆蒿、萎陵菜、茅草
5	山桃(ST)	大戟(<i>Euphorbia pekinensis</i>)、白蒿、铁杆蒿
6	山桃×油松混交林(TY)	冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)、铁杆蒿
7	刺槐×沙棘混交林(CS)	芦苇(<i>Phragmites communis</i>)、铁杆蒿、棘豆、茜草(<i>Rubia cordifolia</i>)、萝藦(<i>Metaplexis japonica</i>)、婆婆针(<i>Bidens pilosa</i>)、枸杞(<i>Lycium chinense</i>)、冰草
8	沙棘×油松混交林(SY)	星宿菜(<i>Lysimachia fortunei</i>)、白莲蒿(<i>A. sacrorum</i>)、地丁草(<i>Corydalis bungeana</i>)、枸杞、芦苇
9	刺槐×油松混交林(CY)	芦苇为主,铁杆蒿、青桐、茜草
10	山杏×油松混交林(XY)	茅草、野菊、铁杆蒿

2.3 土壤动物鉴定

土壤动物采用大类别分类法,将采集回来的土壤动物标本先分离出来,再用连续变倍体视显微镜和数码体视显微镜进行初步的分类鉴定,主要依据《中国亚热带土壤动物》^[26]、《中国土壤动物检索图鉴》^[27]、《昆虫分类学》^[28]等工具书以及参照宋志顺^[29]的研究进行鉴定分类,记录每个样方的土壤动物的类群数和个体总数,同时分别记录成虫与幼虫的数量(表2)。

2.4 数据处理

群落多样性特征及相似性系数计算公式如下。

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

Pielou 均匀性指数:

$$E = H / \ln S \quad (2)$$

Simpson 优势度指数:

$$C = \sum (n_i / N)^2 \quad (3)$$

Margalef 丰富度指数:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

Jaccard 相似性系数:

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

Morisita-Horn 相似性系数:

$$C_{MH} = 2 \sum (a_i \cdot b_i) / (\sum a_i^2 / N_a^2 + \sum b_i^2 / N_b^2) \cdot N_a N_b \quad (6)$$

式中: P_i 为某类群中*i*占群落中总个体数的比例, $P_i = n_i / N$; n_i 为该样地内第*i*个类群的个体数量;

N 为样地内类群的个体数量; c 为*A*和*B*2种生境共有的类群数; a 为*A*生境总类群数; b 为*B*生境总类群数; N_a 为*A*生境物种数量; N_b 为*B*生境物种数量; a_i 和 b_i 分别为*A*和*B*生境中第*i*类群个体数目。

土壤动物个体数和总类群数通过 Excel 2016 统计整理,个体数、总类群数和群落多样性指数采用 SPSS 21.0 单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的显著差异,作图采用 Origin 2018 和 Bioinformatics & Evolutionary Genomics(生物信息学和进化基因组学)网站。

3 结果与分析

3.1 土壤动物群落组成

在大吉沟流域共采集 271 头动物,隶属 2 门 7 纲 15 目 24 科。其中鞘翅目(Coleoptera)、半翅目(Hemiptera)、膜翅目(Hymenoptera)及革翅目(Dermaptera)为优势类群;蜘蛛目(Araneae)、地蜈蚣目(Geophilomorpha)、柄眼目(Stylomatophora)、鳞翅目(Lepidoptera)、毛马陆目(Polydesmida)及等足目(Isopoda)为常见类群;直翅目(Orthoptera)、石蜈蚣目(Lithobiomorpha)、弹尾目(Collembola)、蚰蜒目(Scutigromorpha)及伪蝎目(Pseudoscorpiones)为稀有类群(表2)。类群划分个体数量占全部捕获量大于 10% 的为优势类群,1%~10% 为常见类群,0.1%~1% 为稀有类群^[30]。

表2 不同植被类型下土壤动物群落组成

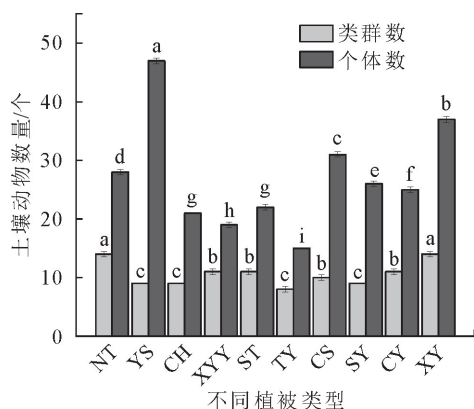
Table 2 Composition of soil fauna communities in different vegetation types

类群	不同植被类型																		总计	
	NT		YS		CH		XYY		ST		TY		CS		SY		CY		XY	
	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%	个体数	百分比/%
鞘翅目	7	25.00	14	29.79	6	28.57	3	15.79	9	40.91	2	13.33	2	6.45	2	7.69	5	20.00	5	13.51
鳞翅目	0	0.00	1	2.13	0	0.00	1	5.26	1	4.55	2	13.33	1	3.23	0	0.00	1	4.00	1	2.70
膜翅目	4	14.29	5	10.64	0	0.00	1	5.26	0	0.00	1	6.67	9	29.03	6	23.08	3	12.00	5	13.51
直翅目	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	4.55	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	2.70
半翅目	4	14.29	11	23.40	2	9.52	0	0.00	7	31.82	0	0.00	8	25.81	13	50.00	0	0.00	9	24.32
革翅目	4	14.29	14	29.79	0	0.00	5	26.32	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	7.69	7	28.00	0	0.00
弹尾纲	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	6.45	0	0.00	0	0.00	0	0.00
蜘蛛目	0	0.00	1	2.13	2	9.52	1	5.26	1	4.55	1	6.67	4	12.90	0	0.00	4	16.00	5	13.51
伪蝎目	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	2.70
蜈蚣目	0	0.00	0	0.00	2	10.53	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
地蜈蚣目	3	10.71	1	2.13	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	13.33	0	0.00	1	3.85	2	8.00	1	2.70
石蜈蚣目	1	3.57	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	3.85	0	0.00	0	0.00
毛马陆目	1	3.57	0	0.00	0	0.00	2	10.53	0	0.00	0	0.00	1	3.23	0	0.00	0	0.00	4	10.81
等足目	0	0.00	0	0.00	6	28.57	1	5.26	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
柄眼目	0	0.00	0	0.00	1	4.76	0	0.00	0	0.00	1	6.67	3	9.68	1	3.85	2	8.00	1	2.70
A 虫	4	14.29	0	0.00	4	19.05	3	15.79	3	13.64	6	40.00	1	3.23	0	0.00	1	4.00	4	10.81
合计	28	100.00	47	100.00	21	100.00	19	100.00	22	100.00	15	100.00	31	100.00	26	100.00	25	100.00	37	100.00

注:NT-柠条;YS-油松;CH-刺槐;XYY-小叶杨;ST-山桃;TY-山桃×油松混交林;CS-刺槐×沙棘混交林;SY-沙棘×油松混交林;CY-刺槐×油松混交林;XY-山杏×油松混交林。

3.2 不同植被类型土壤动物差异性

结果表明,土壤动物类群数、个体数在不同植被类型之间存在显著差异($P < 0.05$)(图 1)。不同植被类型下山桃×油松混交林的个体数量和类群数量为最少,个体数量最多的为油松林,个体数量均表现为混交林大于纯林(除山桃×油松混交林、油松林与柠条林这 3 个植被林外);类群数量最多为柠条林和山杏×油松混交林,其余各林地由大到小顺序为:山桃林、刺槐×油松混交林、刺槐×沙棘混交林、油松林、刺槐林和沙棘×油松混交林。



注:不同字母表示不同植被类型间差异显著($P < 0.05$),下同。

图 1 不同植被类型土壤动物个体数量与类群数变化规律

Fig. 1 Number of individuals sand groups of soil fauna in different vegetation types

3.3 不同植被类型土壤动物群落多样性

土壤动物多样性指数 H 、优势度指数 C 、丰富度指数 D 和均匀性指数 E 在不同植被类型之间存在显著差异($P < 0.05$)(图 2)。山杏×油松混交林的 H 、 D 都为最高,但 C 、 E 为最低; H 最低为山桃

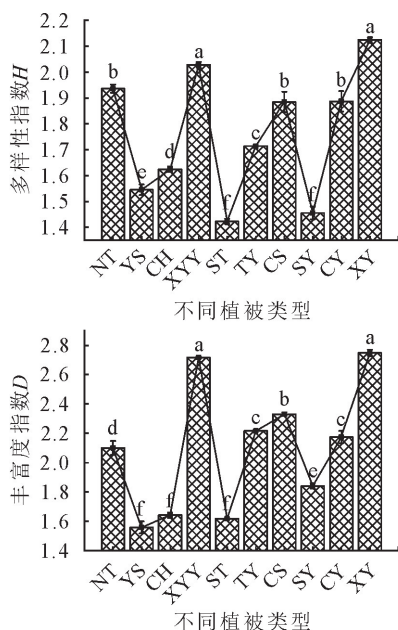


图 2 不同植被类型下土壤动物群落多样性指数

Fig. 2 Diversity index of soil fauna communities in different vegetation types

林, D 最低油松林, C 最高值为沙棘×油松混交林, E 最高值为柠条林。 H 和 D 除小叶杨林和柠条林外,混交林均大于纯林,由此可以得出土壤动物多样性指数和丰富度指数为混交林均大于纯林。

通过对 5 种植被类型下土壤动物目分类水平的进一步探究,由图 3 看出,土壤动物类群不仅数量存在差异而且在类群上也发生了变化。刺槐、山桃、油松林、山桃×油松混交林和刺槐×油松混交林样地共有土壤动物类群比例为 6.25%,山桃、油松林和山桃×油松混交林样地共有土壤动物类群比例为 12.5%,刺槐、油松林和刺槐×油松混交林样地共有土壤动物类群比例为 12.5%,油松林、山桃×油松混交林和刺槐×油松混交林样地共有土壤动物类群比例为 25%,刺槐、油松林样地共有土壤动物类群比例为 18.75%,山桃、油松林样地共有土壤动物类群比例为 25%,山桃×油松混交林和刺槐×油松混交林样地共有土壤动物类群比例为 37.5%,油松林、山桃×油松混交林样地共有土壤动物类群比例为 25%,油松林、刺槐×油松混交林样地共有土壤动物类群比例为 25%,刺槐、山桃、油松林、山桃×油松混交林和刺槐×油松混交林样地不共有土壤动物种类比例依次为 6.25%、6.25%、0%、0% 和 6.25%。

3.4 不同植被类型土壤动物群落相似性分析

不同植被类型下土壤动物群落 Morisita-Horn 相似系数为 0.097~0.944(图 4),相似指数值涵盖全部相似等级,表明不同植被类型间土壤动物群落的相似性等级跨度较大。其中山桃×油松混交林和沙棘×油松混交林土壤动物群落 Morisita-Horn 相

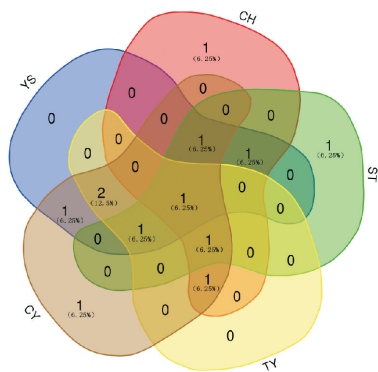


图3 各植被土壤动物目水平 Venn 图

Fig. 3 Venn diagram of soil fauna in the soil samples from different vegetation types

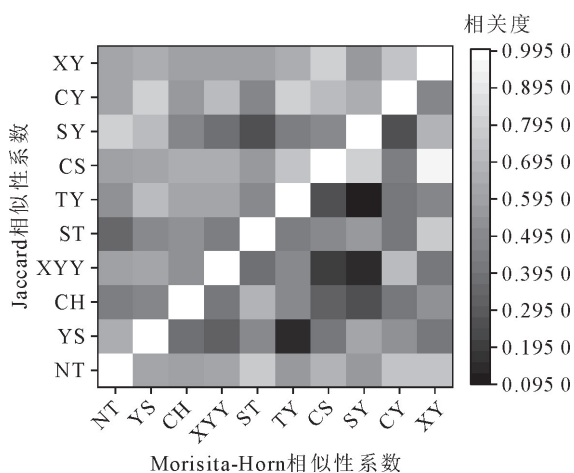


图4 不同植被类型下土壤动物群落相似性

Fig. 4 Similarity indexes among the soil fauna communities at different vegetation types

似系数最小(0.097),刺槐×沙棘混交林与山杏×油松混交林土壤动物群落 Morisita-Horn 相似系数最高(0.944)。随着植被类型的复杂程度,各样地之间土壤动物群落 Morisita-Horn 相似系数呈上升趋势。这表明不同群落中优势类群相对个体数量会受到林地植被类型的影响,且会因复杂而增加,简单而降低。纯林间和纯林与混交林间土壤动物群落 Morisita-Horn 相似系数大于混交林间的。

不同植被类型下土壤动物群落 Jaccard 相似指数值为 0.143~0.667(图 4);基本处于中等相似与中等不相似程度。仅个别处于极不相似程度,分别为山桃林与柠条林之间、沙棘×油松混交林与小叶杨林之间和沙棘×油松混交林与山桃林之间;其中沙棘×油松混交林与山桃林之间土壤动物群落 Jaccard 相似系数最小(0.143),表明这二者植被类型间土壤动物群落的相似性程度很低。

4 结论与讨论

4.1 结论

在吴起县大吉沟流域共采集土壤动物 271 头,隶属 2 门 15 目。其中优势类群有鞘翅目、半翅目、膜翅目及革翅目;常见类群为蜘蛛目、地蜈蚣目、柄眼目、鳞翅目、毛马陆目及等足目;直翅目、石蜈蚣目、弹尾目、蛭蚓目及伪蝎目为稀有类群。在不同植被类型下土壤动物类群数、个体数及多样性指数差异显著($P < 0.05$)。

土壤动物个体数和多样性指数 H 和丰富度指数 D 除个别植被类型外,混交林均大于单一植被林;土壤动物类群不仅数量存在差异而且在类群上也发生了变化。

Morisita-Horn 相似系数不同群落中优势类群相对个体数量会受到林地植被类型复杂程度的影响,且会因复杂而增加,简单而降低;Jaccard 相似系数可以体现出土壤动物结构与类群正在往复杂与稳定发展,为提高退耕后林地的生物多样性可适度增加造林的植被类型。

4.2 讨论

植被在演替过程中,植物群落组成和结构的变化直接或间接影响着土壤动物的结构和功能^[8]。本研究通过对 10 个不同样地大型土壤动物群落的调查表明,吴起县大吉沟流域优势类群为鞘翅目、半翅目、膜翅目和革翅目;常见类群为蜘蛛目、地蜈蚣目、柄眼目、鳞翅目、毛马陆目和等足目,表现出了其对环境的普遍适应性,这些类群构成吴起大吉沟流域退耕后土壤动物的主要组成部分。郝宝宝等^[31]的研究表明,鞘翅目、半翅目、膜翅目和双翅目为优势类群,与本研究结果不尽一致,这说明吴起县退耕还林(草)区内不同地区的土壤动物群落组成存在差异。刘长海等^[32]研究得出膜翅目、鞘翅目、蜘蛛目是延安新区北区的 3 个优势类群;可见,膜翅目和鞘翅目这 2 个类群对延安的气候环境适应性较强。有研究表明弹尾目是退耕还林地的常见类群^[33],但本研究中仅在刺槐×沙棘混交林存在弹尾目且为稀有类群与其结果不同;这可能是由于该类群集中分布在凋落物层^[20],而本研究区中其余各植被类型林下所形成的小环境不满足弹尾目生境。

土壤动物类群数、个体数和多样性指数是反映土壤动物群落结构、功能和水平分布差异性的重要指标^[34-36]。本研究采用 Shannon-Wiener 多样性指数 H 、Margalef 丰富度指数 D 、Pielou 均匀性指数 E 和 Simpson 优势度指数 C ,得出多样性指数与丰富度指数和均匀度指数呈正相关,与优势度指数呈

负相关,均匀度指数与优势度指数亦呈负相关,这与李晓东等^[37]得出相同的结论。同时,有研究表明丰富度指数与优势度指数呈现负相关^[20],是因为丰富度大类群数往往也多,个体一旦分散于更多类群,优势度指数便相应较低。其中,优势度指数 C 以柠条林最高,说明其土壤动物个体在种群中的分布较集中;而沙棘×油松混交林优势度指数最低,则说明其土壤动物个体在种群中的分布较分散。另外,丰富度指数 D 在山杏×油松混交林高于其他林分,说明其土壤动物类群多,多样性较高^[20]。朱新玉等^[38]得出土壤有机质含量与土壤动物丰富度关系密切且呈正相关;可见,山杏×油松混交林这一植被类型下土壤有机质含量最高。因此对于土壤动物与环境因子间的相互关系还需进一步研究。

相似性分析表明,沙棘×油松混交林与山桃林之间 Jaccard 相似性最低,由于 Jaccard 相似性指数是用类群数对群落相似性进行定性分析,因此说明这 2 种林地间的土壤动物类群相差较大。山桃×油松混交林和沙棘×油松混交林之间 Morisita-Horn 相似性最低,刺槐×沙棘混交林与山杏×油松混交林之间相似性最高,由于 Morisita-Horn 指数是用类群数及其个体数对群落相似性进行定量分析,因此说明前 2 种混交林地间的类群数、个体数相差较大,而后 2 种混交林地间的类群数、个体数相差较小。由此可知,为提高退耕后林地的生物多样性需栽种不同类型的植被。

参考文献:

- [1] 邓元杰,侯孟阳,谢怡凡,等.退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J].生态学报,2020,40(18):6597-6612.
DENG Y J, HOU M Y, XIE Y F, *et al.* Impact of the grain for green project on the temporal and spatial evolution of ecosystem service value in northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6597-6612. (in Chinese)
- [2] 马少薇,郭建英,蓝登明,等.吴起县不同退耕还林地群落恢复特征研究[J].水土保持研究,2016,23(6):204-209.
MA S W, GUO J Y, LAN D M, *et al.* Study on community restoration characteristics of different conversions of croplands to forestlands in Wuqi County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 204-209. (in Chinese)
- [3] 刘苑秋,王芳,柯国庆,等.江西瑞昌石灰岩山区退耕还林对土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):885-890.
- [4] 张丹丹.吉林省西部沙地固定沙丘土壤动物群落动态研究[D].长春:东北师范大学,2012.
- [5] 李涛,刘苑秋,郭圣茂,等.瑞昌石灰岩红壤区退耕还林土壤动物群落特征[J].应用生态学报,2012,23(4):910-916.
LI T, LIU Y Q, GUO S M, *et al.* Community traits of soil fauna in forestlands converted from cultivated lands in limestone red soil region of Ruichang, Jiangxi Province of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 910-916. (in Chinese)
- [6] 殷秀琴,陶岩,王海霞,等.我国东北森林土壤动物生态学研究现状与展望[J].生物多样性,2018,26(10):1083-1090.
YIN X Q, TAO Y, WANG H X, *et al.* Forest soil fauna ecology in northeast China: review and prospect[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(10): 1083-1090. (in Chinese)
- [7] 潘菲,张燕林,黄彩凤,等.森林土壤动物生态功能研究进展[J].世界林业研究,2020,33(2):37-42.
- [8] 李文,曹文侠,巍巍,等.培育措施对高寒草甸草原植物多样性和生产力的影响[J].草地学报,2015,23(3):457-462.
LI W, CAO W X, WEI W, *et al.* Effects of grassland cultivation measures on plant diversity and productivity in the alpine meadow-steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(3): 457-462. (in Chinese)
- [9] FU S, ZOU X, COLEMAN D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41: 868-876.
- [10] GARCIA P P, MAESTRE F T, KATTGE J, *et al.* Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes[J]. Ecology Letters, 2013, 16: 1045-1053.
- [11] 严珺,吴纪华.植物多样性对土壤动物影响的研究进展[J].土壤,2018,50(2):231-238.
YAN J, WU J H. Study advances in plant diversity effects on soil fauna[J]. Soils, 2018, 50(2): 231-238. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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[J].生态学杂志,2020,39(2):586-599.
ZHOU Y Z, WU P F. Diversity and spatiotemporal distribution of soil microarthropod communities in forests on the eastern slope of Gongga Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 586-599. (in Chinese)
- [14] 李萌,吴鹏飞,王永.贡嘎山东坡典型植被类型土壤动物群落特征[J].生态学报,2015,35(7):2295-2307.
LI M, WU P F, WANG Y. Vertical distributions of soil fauna communities on the eastern slope of Gongga Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2295-2307. (in Chinese)
- [15] 邱月,吴鹏飞,魏雪.三种人工草地小型土壤节肢动物群落多样性动态及其差异[J].草业学报,2020,29(5):21-32.
QIU Y, WU P F, WEI X. Differences among three artificial grasslands in dynamics and community diversity of soil microarthropods[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(5): 21-32. (in Chinese)
- [16] 臧建成,孙涛,杨小林,等.拉萨半干旱河谷砂生槐灌丛不同封育时间土壤动物多样性特征[J].核农学报,2017,31(7):1381-1387.
ZANG J C, SUN T, YANG X L, *et al.* Characterization of soil animals changes with vegetation restoration under different fencing time of sophora moorcroftiana shrublands in Lhasa Semi-arid Valley[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(7): 1381-1387. (in Chinese)
- [17] 蒋万祥,陈静,王洪凯,等.山东蒙山线蚓群落结构及其影响因

- 子研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(2): 203-208.
- [18] 扈梦梅, 田龙, 吴亚楠, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林间伐和混交改造对大型土壤动物群落结构的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(11): 153-162.
- HU M M, TIAN L, WU Y N, *et al.* Influences of thinning and mixed transformation of *Larix principis-rupprechtii* plantations on the community structure of soil macro fauna in Saihanba area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(11): 153-162. (in Chinese)
- [19] 寇新昌, 殷秀琴. 长白山地不同次生林土壤动物群落多样性特征及其分布格局[J]. 山地学报, 2017, 35(4): 429-436.
- KOU X C, YIN X Q, *et al.* Soil Fauna community diversity and distribution characteristics in different secondary forest of Changbai Mountains[J]. Mountain Research, 2017, 35(4): 429-436. (in Chinese)
- [20] 涂程伟, 肖玖金, 母晨君, 等. 川西龙门山 5 种典型林型的中小型干生土壤动物群落特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 44(6): 96-104.
- TU C W, XIAO J J, MU C J, *et al.* Characteristics of small and medium-sized soil fauna community in different forest types in Longmen Mountain of western Sichuan[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 44(6): 96-104. (in Chinese)
- [21] 杨大星, 叶婷, 杨文佳, 等. 撂荒地植被恢复过程中中小型土壤节肢动物群落动态[J]. 西南农业学报, 2020, 33(7): 1517-1527.
- YANG D X, YE T, YANG W J, *et al.* Variation of soil meso-micro arthropod communities during restoration progress of vegetation at abandoned farmland[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(7): 1517-1527. (in Chinese)
- [22] 徐艺逸. 云南省热带、亚热带和亚高山森林凋落物层中弹尾类群落组成的研究[J]. 绿色科技, 2020(12): 11-15.
- [23] 张安宁, 刘任涛, 刘佳楠, 等. 干旱风沙区柠条枯落物对土壤节肢动物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2383-2391.
- [24] 刘任涛, 朱凡, 柴永青. 干旱区不同年龄灌丛斑块地面节肢动物的聚集效应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 228-236.
- LIU R T, ZHU F, CHAI Y Q. Assemblage effect of ground arthropod community in desert steppe shrubs with different ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 228-236. (in Chinese)
- [25] 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.
- [26] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [27] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [28] 袁峰, 张雅林, 冯纪年, 等. 昆虫分类学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [29] 宋志顺. 中国蜈蚣目的分类研究(多足总纲: 唇足纲)[D]. 保定: 河北大学, 2004.
- [30] 《土壤动物研究方法手册》编写组. 土壤动物研究方法手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998: 20-61.
- [31] 郝宝宝, 曹四平, 李阳, 等. 吴起县不同年限退耕还林地大中型土壤动物时空变化[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 130-136.
- HAO B B, CAO S P, LI Y, *et al.* Temporal and spatial changes of soil animals in returning farmland to forestland in different years in Wuqi County[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(3): 130-136. (in Chinese)
- [32] 刘长海, 赵桂玲, 曹四平. 延安新区城市生态林中大型土壤动物多样性组成结构特征[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 198-202.
- LIU C H, ZHAO G L, CAO S P. Characteristics of the composition and structure of macro soil fauna diversity in the construction of urban ecological forests in Yan'an new district[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 198-202. (in Chinese)
- [33] SWIFT M, HEAL O, ANDERSON J. Decomposition in terrestrial ecosystems[M]. Berkeley: University of California Press, 1979.
- [34] 邵颖, 曹四平, 曹文文, 等. 南泥湾湿地退化与管理对土壤动物多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 634-643.
- SHAO Y, CAO S P, CAO W W, *et al.* Effects of degradation and management of Nanniwan wetland on soil fauna diversity[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 634-643. (in Chinese)
- [35] 舒碧川, 孙晓阳, 张彦东. 林分密度对杂种落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. 森林工程, 2020, 36(5): 1-7.
- SHU B C, SUN X Y, ZHANG Y D. Effects of stand density on soil respiration in hybrid larch plantations[J]. Forest Engineering, 2020, 36(5): 1-7. (in Chinese)
- [36] 李岳泰, 满秀玲, 喻武, 等. 不同地形樟子松天然林土壤呼吸特征及其影响因素[J]. 森林工程, 2020, 36(1): 1-9, 24.
- LI Y T, MAN X L, YU W, *et al.* Soil respiration characteristics and influencing factors of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* natural forest under different terrain[J]. Forest Engineering, 2020, 36(1): 1-9, 24. (in Chinese)
- [37] 李晓东, 史沉鱼, 覃国乐, 等. 濒危植物单性木兰林区土壤动物群落结构与季节动态[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(4): 20-26.
- LI X D, SHI C Y, QIN G L, *et al.* Community composition and seasonal dynamics of soil fauna in endangered plant *Kmeria septentrionalis* forest[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(4): 20-26. (in Chinese)
- [38] 朱新玉, 高宝嘉, 胡云川. 内蒙古东部过渡带大型土壤节肢动物多样性调查[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(5): 129-134.
- ZHU X Y, GAO B J, HU Y C. Community structure and diversity of soil macro-arthropod in the forest-steppe ecotone[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 129-134. (in Chinese)