

DOI: 10.20103/j.stxb.202312292862

南正正, 艾宁, 闫慧玲, 赖善梅, 王思艺, 苑彩霞, 刘长海. 黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛群落特征及生态位分析. 生态学报, 2025, 45(1): 239-251.
Nan Z Z, Ai N, Yan H L, Lai S M, Wang S Y, Yuan C X, Liu C H. Characteristics and ecological niche analysis of ground-dwelling spider communities in the loess hilly area of returning farmland to forest. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 239-251.

黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛群落特征及生态位分析

南正正, 艾宁, 闫慧玲, 赖善梅, 王思艺, 苑彩霞, 刘长海*

延安大学生命科学学院, 延安 716000

摘要: 为深入了解黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛群落特征、主要种群的生态位特征及其与环境因子的关系, 研究选取黄土丘陵区退耕还林(草)后形成的典型植被群落(油松林、山杏林、沙棘林、刺槐林、小叶杨林及农田)为研究样地, 于 2022 年 8—11 月在每个样地采用陷阱法进行地表蜘蛛采集, 并对采集的蜘蛛进行形态学鉴定。结果表明: (1) 共采集到地表蜘蛛标本 2463 头, 隶属 18 科 36 属 49 种, 其中 13 个为主要物种。退耕还林对地表蜘蛛群落的均匀度指数和优势度指数产生显著影响 ($P < 0.05$), 而对丰富度指数和多样性指数均无显著影响; 地表蜘蛛群落均匀度指数最高的是山杏林和农田, 均匀度指数为 0.82; 均匀度指数最低的是小叶杨林, 均匀度指数为 0.49。地表蜘蛛群落优势度指数最高的是山杏林, 优势度指数为 7.38; 优势度指数最低的是小叶杨林, 优势度指数为 2.13。研究区绝大多数植被间 Jaccard 相似性指数介于 0.4—0.5 之间, 地表蜘蛛群落组成整体呈现中等不相似。(2) 主要地表蜘蛛生态位宽度最大的是鞍形花蟹蛛, 生态位宽度为 5.30; 生态位宽度最小的是申氏豹蛛, 生态位宽度为 1.54。主要地表蜘蛛生态位重叠值分布范围为 [0.06, 1], 生态位高度重叠占总对数的 23.08%, 中度重叠占总对数的 28.21%, 低度重叠占总对数的 48.72%。研究区 13 个主要地表蜘蛛生态响应速率之和为负值, 表明主要地表蜘蛛处于衰退阶段。(3) 冗余分析(RDA)结果显示, 草本盖度、枯落物厚度、速效钾、电导率、有机质是影响主要地表蜘蛛分布与生态位特征的关键驱动因子。因此, 本研究表明, 人工林的种植有利于当地地表蜘蛛多样性的恢复和保护; 退耕还林区主要地表蜘蛛之间以及主要物种与环境之间尚未达到相对的动态平衡。

关键词: 退耕还林区; 地表蜘蛛; 群落结构; 生态位特征; 环境因子

Characteristics and ecological niche analysis of ground-dwelling spider communities in the loess hilly area of returning farmland to forest

NAN Zhengzheng, AI Ning, YAN Huiling, LAI Shanmei, WANG Siyi, YUAN Caixia, LIU Changhai*

College of Life Science, Yanan University, Yan'an 716000, China

Abstract: In order to gain a deeper understanding of the characteristics of ground-dwelling spider communities, the ecological niche characteristics of the main populations, and their relationship with environmental factors in the loess hilly area of China, this study selected typical vegetation communities (*Pinus tabulaeformis* forest, *Prunus sibirica* forest, *Hippophae rhamnoides* forest, *Robinia pseudoacacia* forest, *Populus simonii* forest and farmland) formed after the conversion of farmland to forest (grassland) in the loess hilly area as the research site. From August to November 2022, the trap method was used to collect ground-dwelling spiders in each site, and the collected spiders were morphological identified. The results showed that: (1) A total of 2463 ground-dwelling spider specimens were collected, belonging to 18 families, 36 genera, and 49 species, including 13 main species. Returning farmland to forest has had a significant impact on the evenness index and dominance index of ground-dwelling spiders ($P < 0.05$), but had no significant impact on the richness

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060297, 31370541); 省级大学生创新训练计划项目(S202310719077); 延安大学十四五中长期重大科研项目(2021ZCQ009)

收稿日期: 2023-12-29; **网络出版日期:** 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yadxlch@yau.edu.cn

index and diversity index. The highest evenness index of ground-dwelling spiders was found in *Prunus sibirica* forest and farmland, with a evenness index of 0.82. The lowest evenness index was in the *Populus simonii* forest, with a evenness index of 0.49. The highest dominance index of ground-dwelling spiders was *Prunus sibirica* forest, with a dominance index of 7.38, while the lowest dominance index was *Populus simonii* forest, with a dominance index of 2.13. The Jaccard similarity index between most vegetation in the study area ranged from 0.4 to 0.5, and the overall composition of ground-dwelling spider communities showed moderate dissimilarity. (2) The largest ecological niche width of the main ground-dwelling spider was the *Xysticus ephippiafus*, with an ecological niche width of 5.30; The *Pardosa schenkeli* had the smallest niche width, with a niche width of 1.54. The distribution range of ecological niche overlap values of the main ground-dwelling spiders was $[0.06, 1]$, with high niche overlap accounting for 23.08% of the total logarithm, moderate overlap accounting for 28.21% of the total logarithm, and low niche overlap accounting for 48.72% of the total logarithm. The sum of the ecological response rates of the 13 main ground-dwelling spiders in the study area was negative, indicating that the main ground-dwelling spiders were in a declining stage. (3) The redundancy analysis (RDA) results showed that herbaceous coverage, litter thickness, available potassium, electrical conductivity, and organic matter were key driving factors affecting the distribution and niche characteristics of major ground-dwelling spiders. Therefore, this study indicated that the cultivation of artificial forests is beneficial for the restoration and protection of local ground-dwelling spider diversity. The main ground-dwelling spiders in the area of returning farmland to forest, as well as the main species and the environment, have not yet reached a relative dynamic balance.

Key Words: returning farmland to forest areas; ground-dwelling spider; community structure; niche characteristics; environmental factor

黄土丘陵区吴起县自 1998 年率先实施退耕还林(草)工程以来,林草覆盖率得到显著提升,生态环境也得到明显改善,被誉为“全国退耕还林第一县”^[1]。研究表明退耕还林可以有效促进区域退化土地恢复、改善土壤环境、提升土地生产力^[2-3]。不同退耕方式下,植被恢复状况、土壤恢复过程等均存在较大差异,从而影响到与植被、土壤密切相关的土壤动物群落结构与分布^[4]。蜘蛛是一类种类丰富、数量庞大、分布范围广的捕食性天敌,对农林害虫的防控和生态系统的稳定起着非常关键的调控作用^[5-6]。蜘蛛作为森林生态系统中的主要消费者,直接或间接影响森林生态系统的多种服务,且对环境因子的改变高度敏感,可以作为研究生境变化对生态系统造成影响的指示生物^[7-8]。Tscharntke 等^[9]研究发现枯落物和草本盖度是一个地区蜘蛛丰富度最重要的解释因素;郑国等^[10]通过对西双版纳地区 6 种林型蜘蛛多样性的对比研究,得出植被群落结构和枯落物厚度是影响蜘蛛多样性的主要因素。陈曦等^[11]在太行山不同农业景观区对蜘蛛多样性的研究得出,人工林建植是对当地天然森林的一种有效补充,对当地蜘蛛物种的恢复与保护具有重要意义。从以上研究可知,蜘蛛对森林和农业生态系统具有重大的生态重要性,也证明了影响它们存在的环境因子,能为监测大多数陆地生态系统的环境变化提供有用的信息。因此,在黄土丘陵退耕还林区,以地表蜘蛛为研究对象,分析退耕还林后典型植被类型地表蜘蛛群落多样性变化规律,能够有效地促进退化生态系统结构与功能的恢复。

生态位作为反映种群在群落中的地位、作用及重要性的指标^[12-13],其特征指数可以解释物种在丰度、分布等方面的差异,可以用来探究物种对空间资源的利用程度与物种间的竞争能力,还可以比较不同物种对生境的适应能力^[14]。近年来,生态位理论已经被广泛运用于解释土壤动物群落维持和变化的机制,如王壮壮等^[15]对拉萨河流域亏祖山土壤纤毛虫进行研究,发现土壤纤毛虫优势种之间及优势种与环境之间尚未达到动态平衡,且总氮是影响优势种分布和生态位的主要驱动因素;林英华等^[16]对大兴安岭典型森林沼泽地中土壤动物进行研究,发现火干扰后的沼泽地土壤动物因可利用资源减少而导致生态位重叠值下降。杨静等^[17]通过研究土壤动物与农田施用不同改良剂的关系,发现施用改良剂后土壤动物生态位重叠值变高,共有资源增加。但是,目前对退耕还林区的地表蜘蛛资源利用情况和种间关系尚不清楚。

因此,本文根据黄土丘陵退耕还林区吴起县广泛分布的油松林、山杏林、沙棘林、刺槐林、小叶杨林及农田 6 种典型植被类型,利用陷阱诱捕法,对不同生境分布的地表蜘蛛进行了采样、鉴定与分析;同时分析了 6 种生境中主要地表蜘蛛生态位宽度、生态位重叠值、可利用资源的变化以及与环境因子的关系;旨在深入了解并掌握黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛群落的多样性、群落特征以及各种群间的竞争关系和空间资源利用情况,尝试从土壤动物生态学方面为退耕还林可持续健康发展提供新的认识视角。

1 材料与方法

1.1 研究区基本概况

研究区位于陕西省延安市吴起县金佛坪流域,地理坐标为 $108^{\circ}12'0''$ — $108^{\circ}16'30''$ E, $36^{\circ}48'0''$ — $36^{\circ}52'30''$ N, 海拔在 1233—1809 m 之间,地处北洛河上游,属半干旱温带大陆性季风气候。年平均气温 8.5°C , 年均降雨量为 478.3 mm,降水多集中于 7—9 月,占全年降水量的 60.9%,年平均无霜期 175 d。地貌属黄土高原梁状丘陵沟壑区,土壤类型以黄绵土为主。研究区主要乔木有油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Prunus sibirica*)、小叶杨(*Populus simonii*)等,主要灌木有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,主要草本有阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。研究区采样地具体位置的分布见图 1。

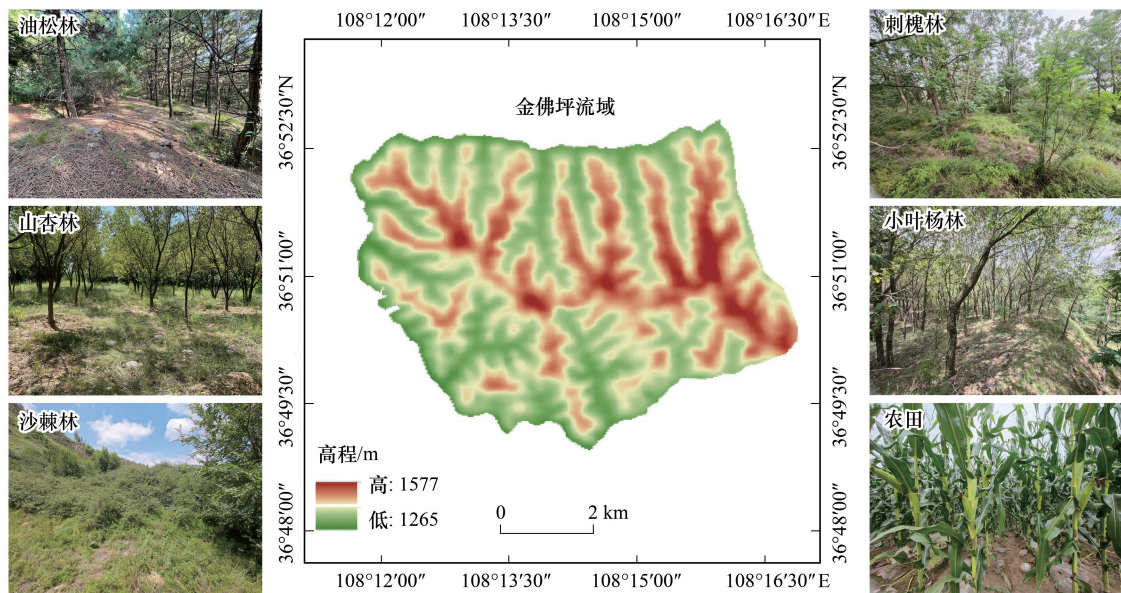


图 1 研究区位置示意及植被实景图

Fig.1 Schematic diagram of the location of the research area and actual vegetation map

1.2 实验设计

实验于 2022 年 8—11 月在吴起县退耕还林区进行,通过前期对吴起县退耕还林区的调研与实地考察,选取典型退耕还林区内立地类型一致的油松林(18 a)、山杏林(18 a)、沙棘林(23 a)、刺槐林(19 a)、小叶杨林(23 a)为研究样地,并以农田(玉米地)作为对照,共设置 6 个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的标准样地进行调查。在每个样地内设置 9 组陷阱,按 3×3 的布局均匀排布在样地内,每组陷阱由 4 个单独的陷阱杯排列在 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方内。并根据研究区特定的地理环境以及样方植被分布特点,以土壤、植被为出发点,选取了土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、含水量、pH、电导率、草本盖度、枯落物厚度 9 个指标为环境因子。

1.3 地表蜘蛛取样与鉴定

对地表蜘蛛的调查采用陷阱法,将两个一次性塑料杯(口径为 8.3 cm,深 10.3 cm,容积为 300 mL)相嵌埋

入地下,塑料杯杯口与地面持平,然后向陷阱杯内倒入占陷阱杯大约 1/2 左右的陷阱溶液,每个陷阱上方都有用铁丝固定的塑料盖(直径为 15 cm)作为顶棚以遮挡雨水。陷阱溶液配方为每 1000 mL 4% 的福尔马林液加 5 mL 甘油和几滴洗衣粉溶液。

每隔 8—10 d 取样 1 次,共取样 8 次,将每次收集到的蜘蛛储存到 75% 的酒精中,然后带回实验室根据相关资料^[18-19]进行鉴定,成蛛鉴定到种,幼蛛鉴定到属。统计其种类与数量。

1.4 土壤样品采集与分析

在每个调查样地,利用环刀采集剖面土壤用来测定土壤含水量(0—15 cm)。然后,使用 5 点法在陷阱杯附近采集 0—15 cm 的混合土样 1 个,装入塑封袋,带回实验室自然风干,过筛后用于土壤理化性质测定。

土壤含水量采用烘干法测定。土壤 pH 和电导率分别使用 PHS-320 高精度智能酸度计(水土比例 2.5:1)和 DDS-608 多功能电导率仪(水土比例 5:1)进行测定。土壤有机质采用重铬酸钾氧化法-外加热法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼蓝比色法测定;土壤速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。

1.5 数据处理

1.5.1 群落多样性

采用 Excel 2021 对数据进行整理,并计算环境因子指标、地表蜘蛛个体数和特征指数。使用 SPSS 26.0 对分析数据进行正态检验,并采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和非参数独立样本 Kruskal-Wallis 检验比较不同数据组间的差异性(当数据满足正态分布时对数据进行单因素方差检验,当数据不符合正态分布时,使用非参数独立样本 Kruskal-Wallis 检验,显著性标准为 $P < 0.05$)。采用 Origin 2021 作图。采用多样性指标^[20]和 Jaccard 相似性指数^[21]比较不同植被类型地表蜘蛛的群落多样性和群落间相似性,其中多样性指标包括 Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数。相关计算公式如下:

$$\text{Shannon 多样性指数: } H = - \sum \frac{n_i}{N} \times \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (1)$$

$$\text{Simpson 优势度指数: } D = 1 - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J = H / \ln S \quad (3)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数: } M = (S - 1) / \ln N \quad (4)$$

$$\text{Jaccard 相似性指数: } J = \frac{c}{a + b - c} \quad (5)$$

式中, n_i 为第 i 个种群的个体数; N 为总个体数; S 为种群数; a 和 b 分别为样点 a 和 b 的种群数, c 为两个样点间共同拥有的种群数。

1.5.2 生态位特征

采用 R.4.3.1(spaa 包)计算主要地表蜘蛛种群的 Levins 生态位宽度指数(B_i)^[22]和 Pinaka 生态位重叠值(O_{ik})^[23]。并采用 R.4.3.1(pheatmap 包)绘制研究区主要地表蜘蛛的重叠值图。通过对 6 种植被类型地表蜘蛛进行去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA),计算出排序轴的梯度长度(Lengths of gradient, LGA), $LGA = 2.35 < 4$,故采用线性模型的冗余分析(Redundancy analysis, RDA)来确定地表蜘蛛个体数分布与环境因子间的关系。同时,采用偏 RDA 分析(Partial RDA)和蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo permutation test),定量评价每个因子对地表蜘蛛群落分布的贡献率(即独立解释量)。在偏 RDA 分析的基础上,绘制地表蜘蛛种群分布与解释变量关系的二维排序图(Biplot)。应用排序软件 CANOCO 5 进行分析运算。为降低各因子之间的异质性,对数据进行标准化处理 $\log(x+1)$ 。生态位特征相关计算公式如下:

$$\text{Levins 生态位宽度指数: } B_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2} \quad (6)$$

$$\text{Pinaka 生态位重叠值: } O_{lik} = \frac{\sum_{j=1}^r (P_{ij} \times P_{kj})}{\sqrt{j = \sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{ik}^2}} \quad (7)$$

$$\text{生态响应速率: } R = \frac{B_i}{\Delta O_{ik}} \quad (8)$$

$$\text{相对资源占用量: } \Delta O_{ik} = \sum_{k=1} O_{lik} - \sum_{i=1} O_{lik} \quad (9)$$

式中, B_i 为第 i 种地表蜘蛛的生态位宽度指数, $P_{ij} = n_{ij}/N_i$, 表示第 i 种地表蜘蛛在资源 j 中的个体数占该种群在各资源状态下总个体数的比例, r 指采样数。 O_{lik} 的取值范围为 $[0, 1]$, $\sum_{k=1} O_{lik}$ 表示物种 i 占用其他物种的总资源量, $\sum_{i=1} O_{lik}$ 表示物种 k 被其他物种侵占的总资源量, ΔO_{ik} 是相对资源占用量, 当 $i = k$ 时, $\Delta O_{ik} > 0$, 表明该物种处于发展期, $\Delta O_{ik} = 0$, 该物种处于中性, $\Delta O_{ik} < 0$, 该物种处于衰退期。 R 表示生态响应速率, 即利用速率来衡量一个种群对生境的生态响应。

2 结果与分析

2.1 环境特征

由表 1 可知, 不同植被类型间环境因子均存在显著差异 ($P < 0.05$)。土壤有机质表现为山杏林最高, 沙棘林、刺槐林、小叶杨林和农田次之, 油松林最低。土壤碱解氮表现为山杏林、沙棘林和刺槐林显著高于农田、小叶杨林和油松林 ($P < 0.05$)。土壤速效磷表现为农田最高, 沙棘林、山杏林和小叶杨林次之, 刺槐林和油松林最低。土壤速效钾表现为山杏林、小叶杨林和农田最高, 刺槐林和油松林次之, 沙棘林最低。土壤含水量表现为山杏林最高, 农田、油松林、沙棘林和小叶杨林次之, 刺槐林最低。pH 表现为小叶杨林和油松林最高, 沙棘林、农田和刺槐林次之, 山杏林最低。土壤电导率表现为山杏林最高, 农田、刺槐林、油松林和沙棘林次之, 小叶杨林最低。草本盖度表现为刺槐林最高, 山杏林、沙棘林、小叶杨林次之, 油松林和农田最低。枯落物厚度表现为小叶杨林最高, 刺槐林、油松林和山杏林次之, 沙棘林最低。

表 1 不同植被类型环境因子指标 (均值±标准误)

Table 1 Environmental factor indicators for different vegetation types (Mean±SE)

植被类型 Vegetational type	SOM/ (g/kg)	AN/ (mg/kg)	AP/ (mg/kg)	AK/ (mg/kg)	SMC/%	pH	EC/ (μS/cm)	HC/%	LT/%
油松林 <i>Pinus</i>	4.69±0.09e	14.06±1.62b	1.32±0.54d	86.00±1.15bc	6.23±0.18c	8.22±0.03a	56.07±2.24cd	7.50±1.44e	3.50±0.29b
山杏林 <i>Prunus</i>	17.15±0.17a	88.14±6.86a	6.27±0.93bc	174.33±17.25a	12.61±0.03a	8.07±0.04b	75.63±1.59a	80.00±2.89b	3.50±0.29b
沙棘林 <i>Hippophae</i>	13.72±0.19b	79.68±4.70a	9.12±0.97b	65.33±0.88c	6.11±1.02c	8.17±0.01ab	55.67±2.14cd	55.00±2.89c	1.50±0.29c
刺槐林 <i>Robinia</i>	9.25±0.12c	68.60±16.69a	2.31±0.69d	106.00±7.51b	4.44±0.26d	8.12±0.02ab	58.80±0.32c	92.50±1.44a	4.25±0.43b
小叶杨林 <i>Populus</i>	5.96±0.04d	23.10±0.51b	4.05±0.22cd	151.00±4.51a	5.43±0.14cd	8.24±0.01a	53.37±1.58d	25.00±2.89d	6.50±0.29a
农田 <i>Farmland</i>	5.69±0.19d	29.23±0.51b	19.64±2.11a	149.67±2.19a	10.55±0.07b	8.14±0.09ab	68.07±0.33b	4.00±0.58e	—

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; AN: 碱解氮 Available nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; SMC: 土壤含水量 Soil moisture content; EC: 电导率 Electrical conductivity; HC: 草本盖度 Herbal coverage; LT: 枯落物厚度 Litter thickness; 同列不同字母表示显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 不同植被类型中地表蜘蛛群落结构

2.2.1 不同植被类型中地表蜘蛛群落组成

在黄土丘陵退耕还林区 6 种不同植被类型样地内共采集到蜘蛛标本 2463 头, 经鉴定, 分别隶属于 18 科 37 属 49 种。优势种是蒙古田野蛛 (*Agroeca mongolica*) 和申氏豹蛛 (*Pardosa schenkeli*), 占总捕获量的 52.62%; 常见种有 11 种, 占总捕获量的 40.56%, 分别为龙隙蛛属未定种 (*Draconarius* sp.)、长足狂蛛 (*Zelotes longipes*)、利氏舞蛛 (*Alopecosa licenti*)、白纹舞蛛 (*Alopecosa albostrata*)、丽亚蛛 (*Asianellus festivus*)、佐贺平腹蛛 (*Gnaphosa kompirensis*)、星豹蛛 (*Pardosa astrigera*)、鞍形花蟹蛛 (*Xysticus ephippiafus*)、中华雷文蛛 (*Raveniola sinensis*)、隙蛛属未定种 (*Coelotes* sp.) 以及尖突拟管蛛 (*Paratrachelas acuminus*)。稀有种占地表蜘蛛总捕获量

的 6.82%。本文将优势种和常见种归为主要种群。各植被类型样地内采集到的地表蜘蛛的种类和数量见表 2。

表 2 不同植被类型中地表蜘蛛物种组成

Table 2 Species composition of ground-dwelling spiders in different vegetation types

序号 No.	种 Species	油松林 <i>Pinus</i>	山杏林 <i>Prunus</i>	沙棘林 <i>Hippophae</i>	刺槐林 <i>Robinia</i>	小叶杨林 <i>Populus</i>	农田 Cropland	总计 Total	百分比 Percentage/%
1	蒙古田野蛛 <i>Agroeca mongolica</i>	72	74	215	132	451	6	950	38.57
2	申氏豹蛛 <i>Pardosa schenkeli</i>	3	44	275	10	12	2	346	14.05
3	龙隙蛛属 <i>Draconarius</i> sp.	21	37	56	60	53	0	227	9.22
4	长足狂蛛 <i>Zelotes longipes</i>	6	39	94	38	24	1	202	8.20
5	利氏舞蛛 <i>Alopecosa licenti</i>	1	30	98	22	0	0	151	6.13
6	白纹舞蛛 <i>Alopecosa albostrata</i>	2	10	73	8	0	1	94	3.82
7	丽亚蛛 <i>Asianellus festivus</i>	1	10	31	26	3	0	71	2.88
8	佐贺平腹蛛 <i>Gnaphosa kompirensis</i>	21	6	1	1	36	0	65	2.64
9	星豹蛛 <i>Pardosa astrigera</i>	5	14	3	0	0	26	48	1.95
10	鞍形花蟹蛛 <i>Xysticus ephippiafus</i>	11	6	8	8	4	4	41	1.66
11	中华雷文蛛 <i>Raveniola sinensis</i>	0	0	14	6	19	0	39	1.58
12	隙蛛属 <i>Coelotes</i> sp.	4	2	2	7	10	11	36	1.46
13	尖突拟管蛛 <i>Paratrachelas acuminus</i>	1	5	0	3	16	0	25	1.02
14	异羽蛛 <i>Ozyptila inaequalis</i>	0	4	6	12	2	0	24	0.97
15	中华平腹蛛 <i>Gnaphosa sinensis</i>	2	0	3	2	12	0	19	0.77
16	刺瓣拟隙蛛 <i>Pireneitega spinivulva</i>	4	5	1	0	6	0	16	0.65
17	角拉土蛛 <i>Latouchia cornuta</i>	0	1	10	0	5	0	16	0.65
18	小狼逍遥蛛 <i>Thanatus miniaecus</i>	0	2	8	0	0	0	10	0.41
19	朝鲜突腹蛛 <i>Ero koreana</i>	0	0	5	2	2	0	9	0.37
20	异隐石蛛 <i>Titanoeca asimilis</i>	0	1	0	0	7	0	8	0.32
21	宋氏平腹蛛 <i>Gnaphosa songi</i>	0	2	5	0	0	0	7	0.28
22	巴里坤狂蛛 <i>Zelotes barkol</i>	1	1	2	1	1	0	6	0.24
23	多瓣豹蛛 <i>Pardosa multivaga</i>	0	5	0	0	1	0	6	0.24
24	白斑猎蛛 <i>Evarcha albaria</i>	1	0	0	1	2	0	4	0.16
25	蒙古旋蟹蛛 <i>Spiracme mongolica</i>	0	1	0	2	0	0	3	0.12
26	日本狼逍遥蛛 <i>Thanatus nipponicus</i>	0	0	0	3	0	0	3	0.12
27	细尖小类球蛛 <i>Nesticella apiculata</i>	0	0	2	1	0	0	3	0.12
28	利氏猫蛛 <i>Oxyopes licenti</i>	0	1	0	0	0	2	3	0.12
29	蚁形小蚁蛛 <i>Micaria formicaria</i>	0	0	0	0	0	3	3	0.12
30	贺兰狂蛛 <i>Zelotes helanshan</i>	0	0	1	0	0	1	2	0.08
31	袜昏蛛 <i>Phaeocedus braccatus</i>	0	0	1	0	1	0	2	0.08
32	平单蛛 <i>Haplodrassus pugnans</i>	0	0	2	0	0	0	2	0.08
33	静栖科林蛛 <i>Collinsia inerrans</i>	0	0	0	0	0	2	2	0.08
34	醒目盖蛛 <i>Neriere emphana</i>	1	0	1	0	0	0	2	0.08
35	三角皿蛛 <i>Linyphia triangularis</i>	1	0	1	0	0	0	2	0.08
36	双纹异漏斗蛛 <i>Allagelena bistriata</i>	0	0	2	0	0	0	2	0.08
37	三斑花蟹蛛 <i>Xysticus pseudoblutea</i>	0	2	0	0	0	0	2	0.08
38	沙勒花蟹蛛 <i>Xysticus sharlaa</i>	0	0	0	0	1	0	1	0.04
39	梅氏毛蟹蛛 <i>Heriaeus mellottei</i>	0	0	0	1	0	0	1	0.04
40	陆獾蛛 <i>Trochosa terricola</i>	1	0	0	0	0	0	1	0.04
41	奇异獾蛛 <i>Trochosa ruricola</i>	1	0	0	0	0	0	1	0.04
42	山西狼蛛 <i>Lycosa shansia</i>	0	0	0	0	0	1	1	0.04

续表

序号 No.	种 Species	油松林 <i>Pinus</i>	山杏林 <i>Prunus</i>	沙棘林 <i>Hippophae</i>	刺槐林 <i>Robinia</i>	小叶杨林 <i>Populus</i>	农田 Cropland	总计 Total	百分比 Percentage/%
43	土耳其拟赛蛛 <i>Parasyrisca turkenica</i>	0	0	0	0	1	0	1	0.04
44	凹近狂蛛 <i>Drassyllus excavatus</i>	0	0	1	0	0	0	1	0.04
45	森林佐蛛 <i>Zora nemoralis</i>	0	0	0	0	1	0	1	0.04
46	十字园蛛 <i>Araneus diadematus</i>	0	1	0	0	0	0	1	0.04
47	哈氏盖蛛 <i>Neriene hammeni</i>	0	0	0	0	0	1	1	0.04
48	指蛛属 <i>Bathypantes</i> sp.	0	0	1	0	0	0	1	0.04
49	隐希蛛属 <i>Cryptachaea</i> sp.	1	0	0	0	0	0	1	0.04
总个体数 Total number of individuals		161	303	922	346	670	61	2463	100
总物种数 Total number of species		21	24	29	21	23	13	—	—

捕获量占总数量的 10% 以上为优势种, 1%—10% 为常见种, 1% 以下为稀有种, 本文将优势种和常见种归为主要种群

2.2.2 不同植被类型中地表蜘蛛群落多样性分析

分别对六种不同植被类型样地内采集到的地表蜘蛛群落的丰富度指数、多样性指数、均匀度指数、优势度指数进行比较, 结果显示: 各植被类型样地地表蜘蛛群落的丰富度指数和多样性指数均不存在显著差异。地表蜘蛛群落均匀度指数最高的是山杏林和农田, 均匀度指数为 0.82; 均匀度指数最低的是小叶杨林, 均匀度指数为 0.49。对均匀度指数进行比较, 山杏林地地表蜘蛛群落的均匀度极显著高于小叶杨林 ($P < 0.01$), 显著高于沙棘林 ($P < 0.05$)。沙棘林和油松林地地表蜘蛛群落的均匀度显著高于小叶杨林 ($P < 0.05$)。地表蜘蛛群落优势度指数最高的是山杏林, 优势度指数为 7.38; 优势度指数最低的是小叶杨林, 优势度指数为 2.13。沙棘林地地表蜘蛛群落的优势度指数显著高于小叶杨林 ($P < 0.05$) (图 2)。

2.2.3 不同植被类型中地表蜘蛛群落相似性分析

由表 3 可知, 研究区绝大多数植被间 Jaccard 相似性指数介于 0.4—0.5 之间, 地表蜘蛛群落组成整体呈现中等不相似。表现为刺槐林与山杏林、沙棘林、油松林、小叶杨林间地表蜘蛛群落相似性最高, 介于 0.45—0.52 之间, 而农田与其他五种植被类型样地间地表蜘蛛群落相似性最低, 介于 0.16—0.28 之间。

表 3 不同植被类型中地表蜘蛛的群落相似性

Table 3 Community similarity of ground-dwelling spiders in different vegetation types

植被类型 Vegetational type	油松林 <i>Pinus</i>	山杏林 <i>Prunus</i>	沙棘林 <i>Hippophae</i>	刺槐林 <i>Robinia</i>	小叶杨林 <i>Populus</i>	农田 Cropland
油松林 <i>Pinus</i>		0.45	0.47	0.5	0.42	0.26
山杏林 <i>Prunus</i>	14		0.47	0.45	0.47	0.28
沙棘林 <i>Hippophae</i>	16	17		0.47	0.44	0.24
刺槐林 <i>Robinia</i>	14	14	16		0.52	0.21
小叶杨林 <i>Populus</i>	13	15	16	15		0.16
农田 Cropland	7	8	8	6	5	

左下角为共有种群数, 右上角为 Jaccard 值; Jaccard 值在 0—0.25 表示极不相似, 0.25—0.5 间表示中等不相似, 0.5—0.75 间中等相似, 0.75—1 间表示极相似

2.3 退耕还林区主要地表蜘蛛生态位

2.3.1 主要地表蜘蛛生态位宽度

生态位宽度可以直接反映出物种对环境资源利用程度的大小, 黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛生态位宽度位于 1.54—5.30 之间 (图 3), 生态位幅度变化较小, 其中生态位宽度最大的是鞍形花蟹蛛, 生态位宽度为 5.30; 其次为龙隙蛛属未定种、隙蛛属未定种, 生态位宽度分别为 4.54、4.41, 这 3 种蜘蛛分布范围较广, 对环境资源利用程度大, 表现出较强的生态适应性。而生态位宽度最小的是申氏豹蛛, 生态位宽度为 1.54, 该物种对环境有严格的要求, 生态适应性表现较差, 对环境资源利用程度小。

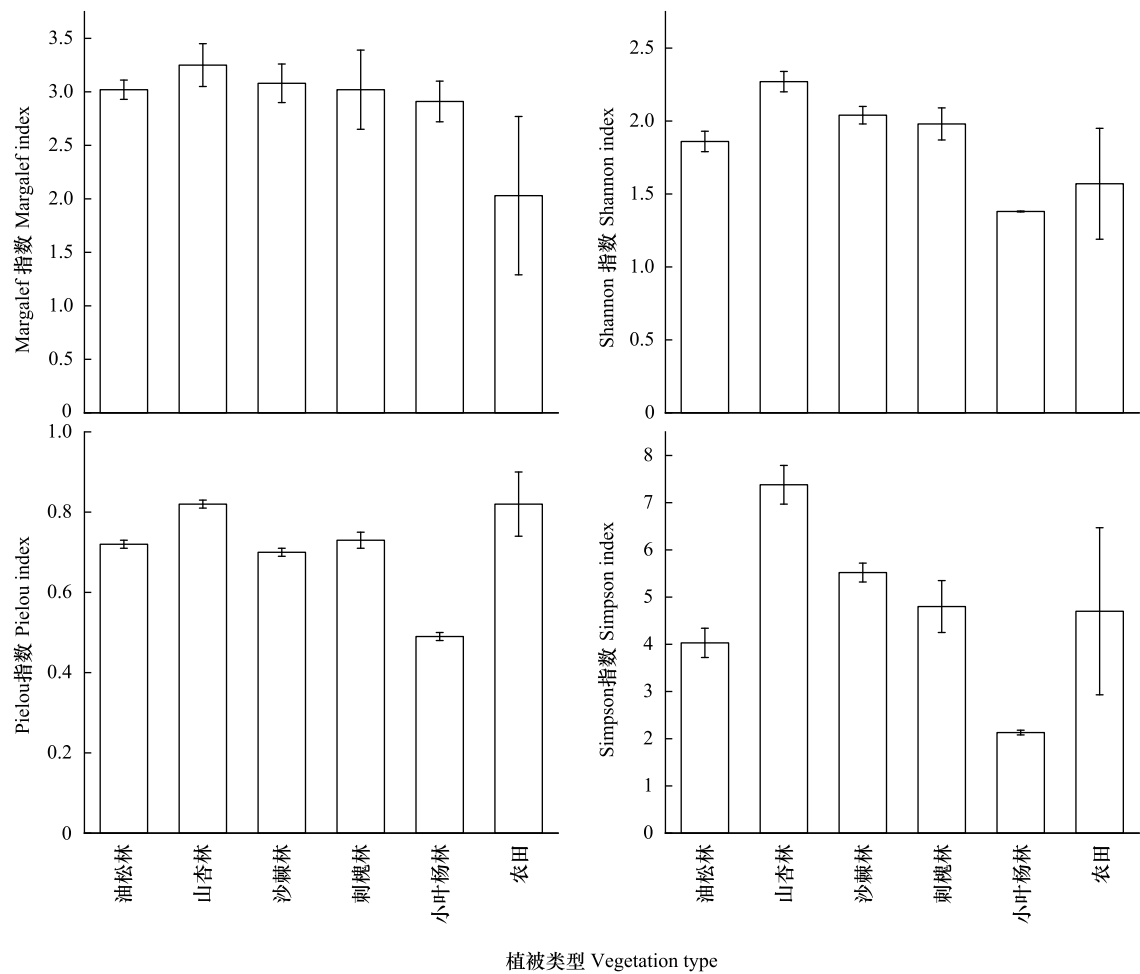


图 2 不同植被类型中地表蜘蛛群落多样性指数特征 (均值±标准误)
Fig.2 Diversity index characteristics of ground-dwelling spider communities in different vegetation types (Mean±SE)

2.3.2 主要地表蜘蛛生态位重叠值

6 种生境类型中,主要地表蜘蛛生态位重叠值(O_{ik})分布范围为[0.06,1],生态位高度重叠($O_{ik}>0.8$)的有 18 对,占总对数的 23.08%,中度重叠($0.6 < O_{ik} \leq 0.8$)有 22 对,约占总对数的 28.21%,低度重叠($O_{ik} \leq 0.6$)有 38 对,约占总对数的 48.72%,完全重叠($O_{ik}=1$)有 1 对,白纹舞蛛和申氏豹蛛。生态位重叠值最低的有 3 对,分别是佐贺平腹蛛和白纹舞蛛、中华雷文蛛和星豹蛛、尖突拟管蛛和白纹舞蛛($O_{ik}=0.06$)(图 4)。总的来说,黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛种群的生态位重叠较低。

2.3.3 主要地表蜘蛛生态响应速率

分析黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛相对资源占用量(ΔO_{ik})和生态响应速率(R)结果表明(表 4),星豹蛛的相对资源占用量的变化幅度(绝对值)最大,而申氏豹蛛的相对资源占用量的变化幅度最小。星豹蛛有最大的负 ΔO_{ik} ,表明其发展空间较小,呈衰退态势,申氏豹蛛呈衰退态势。龙隙蛛属未定种有最大的正 ΔO_{ik} ,发展空间较大,具备较强的资源利用竞争力,处于竞争优势地位。不同于其他主要地表蜘蛛,利氏舞蛛的发展空间略微受限。生态响应速率结果能够有效反映出各主要地表蜘蛛对生存环境的生态响应状况,其中白纹舞蛛的衰退趋势最为强烈($R = -0.904$),星豹蛛的衰退趋势较弱($R = -0.054$),利氏舞蛛的发展趋势最为强烈($R = 0.575$),长足狂蛛的发展趋势较弱($R = 0.168$)。从总体上来看,黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛在空间维度上的生态响应速率之和为负数(-0.587),说明主要地表蜘蛛处于衰退阶段。

2.4 黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛与环境因子的关系

地表蜘蛛在受到不同环境因子的影响时会发生生态位分化,借助排序方法分析物种与环境因子之间的关系,进而对生态位测度结果进行补充说明。首先对黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛 DCA 分析,结果显示排序轴长度小于 3,主要地表蜘蛛的分布可使用线性模型,共筛选 9 个环境因子 SOM、AN、AP、AK、SMC、pH、EC、HC、LT 进行 RDA 分析,应用蒙特卡洛置换检验对环境因子进行显著性检验。结果显示(图 5),HC、LT、AK、EC、SOM 是显著解释变量,对主要地表蜘蛛的解释率分别为 39.2%、20.0%、10.4%、6.5%、6.5%,是影响主要地表蜘蛛种群的主要环境因子。第 1 排序轴对主要地表蜘蛛方差的解释率为 54.42%,第 2 排序轴对主要地表蜘蛛方差的解释率为 22.76%,前两轴累计解释了 77.18%的物种变异,说明前两轴可以很好地反映主要地表蜘蛛与环境因子的关系,且主要由第 1 排序轴决定。AK 聚集在第 1 排序轴的正轴,与第 1 排序轴呈最大正相关,HC、SOM、AN 聚集在第 1 排序轴的负轴,与第 1 排序轴呈最大负相关;其中 Csp 聚集在第 1 排序轴的正轴,与 AK 呈明显正相关,表明 AK 是影响其分布的主要环境因子。LT 和 pH 聚集在第 2 排序轴的正轴,与第 2 排序轴呈最大正相关,Amon、Pacu 和 Gkom 与 LT 和 pH 呈正相关,说明 LT 和 pH 是影响其分布的因素。

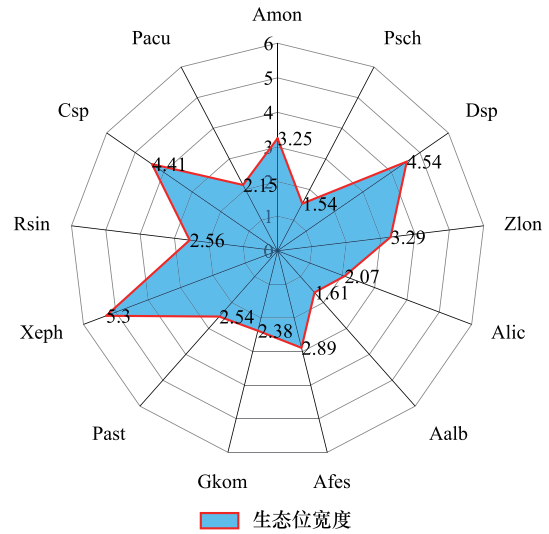


图 3 黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛生态位宽度
Fig. 3 The ecological niche width of main ground-dwelling spiders in the loess hilly area of returning farmland to forests
Amon: 蒙古田野蛛 *Agroeca mongolica*; Psch: 申氏豹蛛 *Pardosa schenkeli*; Dsp: 龙隙蛛属未定种 *Draconarius* sp.; Zlon: 长足狂蛛 *Zelotes longipes*; Alic: 利氏舞蛛 *Alopecosa licenti*; Aalb: 白纹舞蛛 *Alopecosa albostrata*; Afes: 丽亚蛛 *Asianellus festinus*; Gkom: 佐贺平腹蛛 *Gnaphosa kompirensis*; Past: 星豹蛛 *Pardosa astrigera*; Xeph: 鞍形花蟹蛛 *Xysticus ephippiafusus*; Rsin: 中华雷文蛛 *Raveniola sinensis*; Csp: 隙蛛属未定种 *Coelotes* sp.; Pacu: 尖突拟管蛛 *Paratrachela acuminus*

表 4 主要地表蜘蛛相对资源占用量(ΔO_{ik})和响应速率(R)

Table 4 Relative resource occupation (ΔO_{ik}) and response rate (R) of main ground-dwelling spiders

主要物种 Main species	ΔO_{ik}	R	状态 State	主要物种 Main species	ΔO_{ik}	R	状态 State
蒙古田野蛛 <i>Agroeca mongolica</i>	13.857	0.234	发展	佐贺平腹蛛 <i>Gnaphosa kompirensis</i>	-20.376	-0.117	衰退
申氏豹蛛 <i>Pardosa schenkeli</i>	-1.729	-0.890	衰退	星豹蛛 <i>Pardosa astrigera</i>	-47.353	-0.054	衰退
龙隙蛛属 <i>Draconarius</i> sp.	23.869	0.190	发展	鞍形花蟹蛛 <i>Xysticus ephippiafusus</i>	10.106	0.525	发展
长足狂蛛 <i>Zelotes longipes</i>	19.590	0.168	发展	中华雷文蛛 <i>Raveniola sinensis</i>	13.853	0.185	发展
利氏舞蛛 <i>Alopecosa licenti</i>	3.606	0.575	发展	隙蛛属 <i>Coelotes</i> sp.	-6.238	-0.707	衰退
白纹舞蛛 <i>Alopecosa albostrata</i>	-1.779	-0.904	衰退	尖突拟管蛛 <i>Paratrachela acuminus</i>	-15.883	-0.135	衰退
丽亚蛛 <i>Asianellus festinus</i>	8.478	0.340	发展				

3 讨论

3.1 黄土丘陵退耕还林对地表蜘蛛群落结构的影响

退耕还林措施对生境改变的同时,亦对栖息在其内的土壤动物分布产生显著影响^[24]。地表蜘蛛作为一种良好的环境指示生物,其群落结构特征可以用来反映环境变化。通过比较退耕还林以后不同植被类型中地表蜘蛛的分布,并以农田作为参照,发现油松林、山杏林、沙棘林、刺槐林、小叶杨林、农田地表蜘蛛的个体数之比为 2.64:4.97:15.11:5.67:10.98:1,物种数之比为 1.62:1.85:2.23:1.62:1.77:1,说明退耕还林后地表植被丰富,可以为更多的地表蜘蛛提供充足的食物和适宜的栖息环境,使得地表蜘蛛的种类数量增加^[25]。在地表蜘

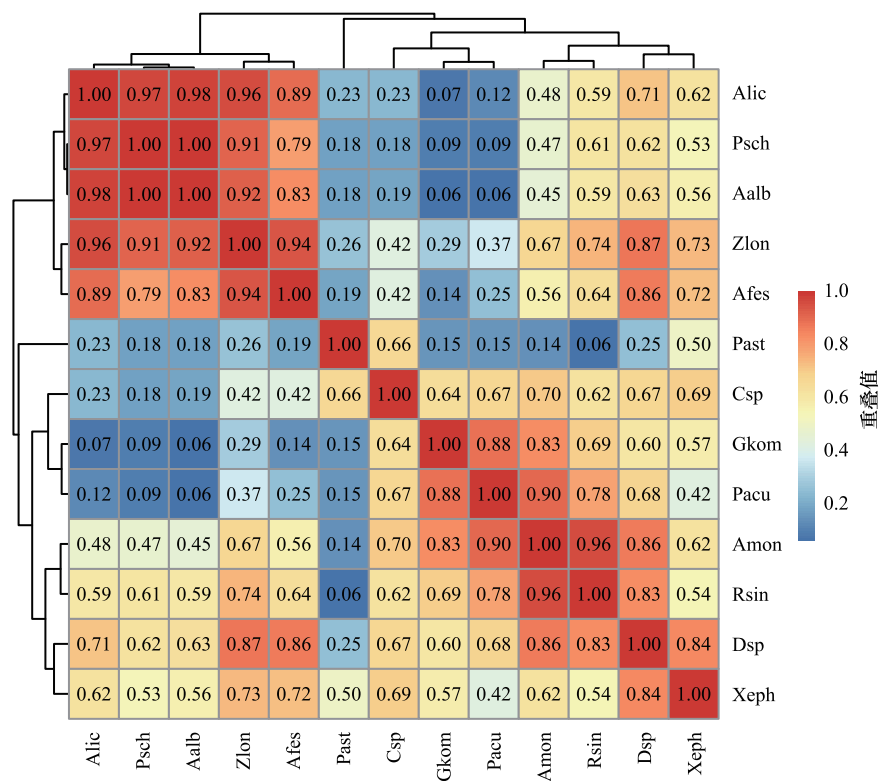


图4 黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛生态位重叠值

Fig.4 Overlapping values of main ground-dwelling spider ecological niches in the loess hilly area of returning farmland to forests

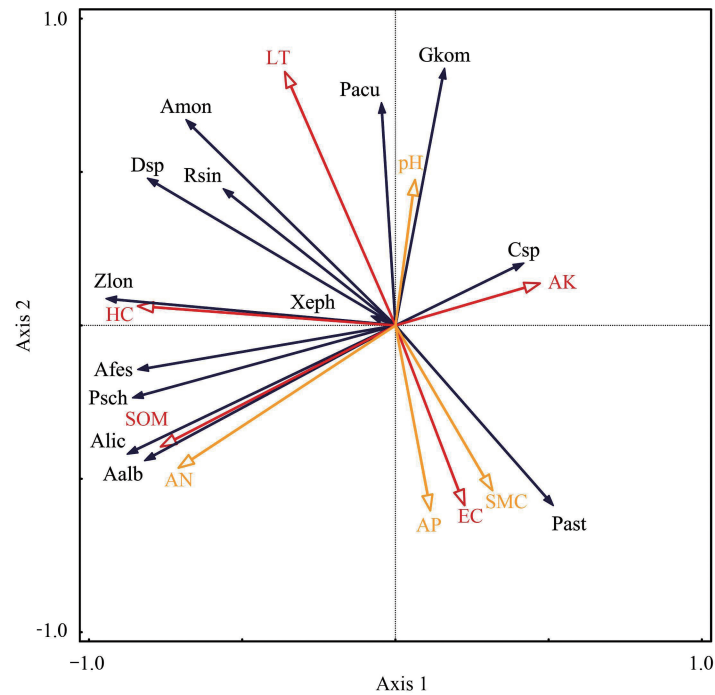


图5 黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛与环境因子的 RDA 分析

Fig.5 RDA analysis of the main ground-dwelling spiders and environmental factors in the loess hilly area of returning farmland to forests
SOM:土壤有机质 Soil organic matter; AN:碱解氮 Available nitrogen; AP:速效磷 Available phosphorus; AK:速效钾 Available potassium; SMC:土壤含水量 Soil moisture content; EC:电导率 Electrical conductivity; HC:草本盖度 Herbal coverage; LT:枯落物厚度 Litter thickness; 蓝色箭头表示主要地表蜘蛛; 红色箭头表示影响显著的环境因子; 黄色箭头表示影响不显著的环境因子

蛛群落多样性指数方面,山杏林、沙棘林、油松林地地表蜘蛛群落的均匀度均显著高于小叶杨林($P<0.05$),反映出小叶杨林地地表蜘蛛个体数目分配不均匀,原因可能与小叶杨林下枯落物太厚有关,枯落物太厚会导致生活于落叶层中的优势类群不断扩张,并且在数量上占据绝对主导地位,从而降低 Pielou 均匀度^[26]。从群落相似性指数来看,表现为刺槐林地和其他四种林地间地表蜘蛛群落相似性最高,介于 0.45—0.52 之间,而农田与其他五种林地间地表蜘蛛群落相似性最低,介于 0.16—0.28 之间。这表明在植被茂盛、人为干扰少的林地和草地中,地表蜘蛛群落的相似性指数高;当自然环境恶劣程度加剧、人为干扰程度增加时,地表蜘蛛群落的变异性会增大^[27]。总体来看,研究区 6 种生境样地间,地表蜘蛛群落相似性均较低,群落结构组成差异较大,表明不同植被条件能够影响地表蜘蛛群落的物种组成和各种群的数量分布^[28]。

3.2 黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛生态位

生态位宽度可以很好地反映出物种的生态适应性以及对环境资源的利用能力^[29]。地表蜘蛛群落组成出现差异,生态位宽度使地表蜘蛛出现可利用资源谱的变化^[16]。黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛生态位宽度最大的是鞍形花蟹蛛、龙隙蛛属未定种、隙蛛属未定种,说明其对环境适应能力强,广泛分布在不同的生境中,有较强的空间资源利用能力。生态位宽度最小的是白纹舞蛛和申氏豹蛛,说明它们对空间资源的占用较少,对环境有一定依赖,利用空间资源的能力较弱。黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛生态位宽度较大的物种之间竞争激烈且更趋向于生境特化,可作为土壤的指示物种,利用同一地表蜘蛛在不同营养状态下的生态位宽度变化特性,将其作为土壤指示种具有一定的意义。

生态位重叠是指生态位相似的物种生活在同一空间时竞争或分享共同资源的现象^[30],其在一定程度上可以解释物种对环境资源利用的差异性和竞争性,生态位重叠指数越大说明物种之间的生活习性越相近,对生境资源的生态需求越相近,物种之间竞争越激烈^[31]。黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛生态位重叠值低($O_{ik} \leq 0.6$),占总对数的 48.72%,表明主要蜘蛛间生态位分化程度较高,种间竞争较弱,群落结构在短期内不会发生明显变化。白纹舞蛛和申氏豹蛛的生态位重叠值最高,表明这两个物种在资源利用和环境适应方面具有较高的相似性,竞争相对激烈。生态位宽度与生态位重叠之间没有绝对的正相关,这一生态结论与求锦津等一致^[32]。总体而言,黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛群落间的生境适应能力相似性较小,主要物种对环境资源的利用共性较小,竞争态势相对均衡,种间关系稳定。

种群的发展或衰退趋势是各种群之间竞争的直接产物,它是生态系统中生物和非生物因素相互作用的生态响应^[33]。黄土丘陵退耕还林区地表蜘蛛生态位宽度较大的物种将占据更多相对资源,并具有更广泛的资源利用范围以及更广阔的发展空间,且大多数物种呈现发展趋势,如鞍形花蟹蛛、龙隙蛛属未定种属于发展型物种。而生态位宽度较小的物种,生态适应性较差,对环境的变化较为敏感,大多数属于衰退型种群,这与王壮壮等研究结果一致^[15],如白纹舞蛛和申氏豹蛛属于衰退型种群。从主要地表蜘蛛的生态响应速率来看,利氏舞蛛的生态响应速率最大,正处发展强盛时期,这些发展趋势较强的物种为了获得更多的资源,可能会通过增大生态位宽度来加强自身的生态适应能力和竞争力;而衰退趋势较强的地表蜘蛛,如白纹舞蛛等将会逐渐消亡。黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛之间以及主要物种与环境之间尚未达到相对的动态平衡,其主要物种正处衰退阶段。

3.3 黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛与环境因子的关系

地表蜘蛛在不同的环境因子影响下出现生态位分化,可以借助排序的方法来解释物种与环境因子之间的关系,进而对生态位测度结果进行补充说明。黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛与环境因子的冗余分析(RDA)结果显示,排序轴 1 和排序轴 2 可以很好地反映主要物种与环境因子的关系。轴 1 反映了速效钾、草本盖度、有机质、速效氮的变化;轴 2 反映了枯落物厚度、电导率、速效磷、土壤含水量、pH 的变化,对地表蜘蛛产生直接影响。因此,排序轴 1 是影响地表蜘蛛空间生态位分化的主要因子,轴 2 是影响其空间生态位分化的次要因子。由 RDA 图(图 5)可知,HC、LT、AK、EC、SOM 是显著性解释黄土丘陵退耕还林区空间生态位分化的变量,其中草本盖度和枯落物厚度是最主要的影响因子。本研究发现地上草本植物和枯落物可以为地表

蜘蛛提供栖息地和避难所,多数地表蜘蛛对草本盖度和枯落物厚度表现出明显的正向响应,这一结果与陈曦等研究一致^[11]。速效钾、电导率、有机质与地表蜘蛛群落组成具有显著的相关性,而其他理化因子非主要影响因素,一定量的土壤养分是地表蜘蛛所必须的,但含量过高则会产生负面影响^[34-35]。RDA 结果显示黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛受到多种环境因子的共同影响,主要地表蜘蛛已经形成与其生境相适应的机制,每种环境因子对地表蜘蛛产生了不同的作用,其共同影响导致不同植被类型主要地表蜘蛛的分布存在一定的差异^[36-37]。

4 结论

(1)在黄土丘陵退耕还林区,植被类型是影响地表蜘蛛群落多样性和群落结构的主要因素,不同植被类型地表蜘蛛群落存在显著差异,且人工林的种植有利于当地蜘蛛群落的恢复和保护。

(2)主要地表蜘蛛生态位重叠值低,种间竞争较弱。生态响应速率之和为负值,表明主要地表蜘蛛之间以及主要物种与环境之间尚未达到相对的动态平衡。鞍形花蟹蛛、龙隙蛛属未定种以及隙蛛属未定种三个主要物种的土壤环境适应能力较强,生态适应幅度较广;白纹舞蛛、申氏豹蛛对土壤环境的变化较为敏感,生态适应能力较弱。

(3)草本盖度、枯落物厚度、速效钾、电导率、有机质是影响黄土丘陵退耕还林区主要地表蜘蛛分布与生态位的主要驱动因子。

致谢:衷心感谢西南大学王露雨老师在标本鉴定过程中提供帮助。

参考文献 (References):

- [1] 谢怡凡,姚顺波,丁振民,侯孟阳,邓元杰,刘广全. 退耕还林和地理特征对土壤侵蚀的关联影响——以陕西省 107 个县区为例. 生态学报, 2022, 42(1): 301-312.
- [2] 张智勇,刘广全,艾宁,刘长海,宗巧鱼,郝宝宝,刘姣. 吴起县退耕还林后主要植被类型土壤质量评价. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 81-87.
- [3] 于艳华,乌兰图雅,阿拉腾图雅. 基于退耕还林还草的科尔沁沙地景观结构变化——以通辽市奈曼旗为例. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2007, 36(2): 212-216.
- [4] Zhao H L, Zhang T H, Liu R T. Effects of land cover changes on soil arthropod community in horqin sand land, China. Journal of Life Sciences and Technologies, 2013, 1(2): 112-117.
- [5] 申效诚,张保石,张锋,刘新涛. 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析. 生态学报, 2013, 33(21): 6795-6802.
- [6] Riechert S E, Bishop L. Prey control by an assemblage of generalist predators: spiders in garden test systems. Ecology, 1990, 71(4): 1441-1450.
- [7] Wise D H. Wandering spiders limit densities of a major microbi-detritivore in the forest-floor food web. Pedobiologia, 2004, 48(2): 181-188.
- [8] Hore U, Uniyal V P. Diversity and composition of spider assemblages in five vegetation types of the Terai Conservation Area, India. The Journal of Arachnology, 2008, 36(2): 251-258.
- [9] Tschamtké T, Klein A M, Kruess A, Steffan-Dewenter I, Thies C. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management. Ecology Letters, 2005, 8(8): 857-874.
- [10] 郑国,杨效东,李枢强. 西双版纳地区六种林型地表蜘蛛多样性比较研究. 昆虫学报, 2009, 52(8): 875-884.
- [11] 陈曦,张旭珠,金池,李安,高萌萌,卢彤,张晓华,李良涛. 太行山区不同农业景观生境的蜘蛛群落结构特征及其影响因子. 中国生态农业学报: 中英文, 2020, 28(10): 1488-1498.
- [12] 刘润红,姜勇,常斌,李娇凤,荣春艳,梁士楚,杨瑞岸,刘星童,曾惠帆,苏秀丽,袁海莹,傅桂焕,吴燕慧. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析. 生态学报, 2018, 38(19): 6881-6893.
- [13] Qin J F, Liu C H, Ai N, Zhou Y W, Tuo X H, Nan Z Z, Shi J H, Yuan C X. Community characteristics and niche analysis of soil animals in returning farmland to forest areas on the Loess Plateau. Land, 2022, 11(11): 1958.
- [14] 张孝然,蒲真,黄治昊,周鑫,邢韶华. 大黄花虾脊兰生境特征及生存群落物种生态位分析. 植物科学学报, 2017, 35(6): 799-806.
- [15] 王壮壮,朱时应,张秋涵,何梦萨,普布. 亏祖山秋季不同海拔土壤纤毛虫优势种生态位及其与环境因子的关系. 生态学报, 2022, 42(9): 3494-3503.

- [16] 林英华, 贾旭东, 徐演鹏, 李慧仁, 刘学爽, 徐永波, 韦昌雷, 刘三章, 王立中. 大兴安岭典型森林沼泽类型地表土壤动物群落与生态位分析. 林业科学, 2015, 51(12): 53-62.
- [17] 杨静, 张贺, 李双霜, 李桂花, 张建峰. 砂质潮土施用改良剂对土壤动物群落特征的影响. 中国农业科学, 2022, 55(16): 3185-3199.
- [18] 宋大祥, 朱明生, 陈军. 河北动物志-蜘蛛类. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2001.
- [19] 朱明生, 张保石. 河南蜘蛛志: 蛛形纲: 蜘蛛目. 北京: 科学出版社, 2011.
- [20] 郭忠玲, 马元丹, 郑金萍, 刘万德, 金哲峰. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2013-2018.
- [21] 刘任涛. 土壤动物生态学研究方法: 实验设计、数据处理与论文写作. 北京: 科学出版社, 2016.
- [22] Colwell R K, Futuyma D J. On the measurement of niche breadth and overlap. Ecology, 1971, 52(4): 567-576.
- [23] Pianka E R. The structure of lizard communities. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 53-74.
- [24] 姚润枝, 周在豹, 闫国增, 田作宝, 王朔, 李凯. 退耕还林对地面蜘蛛种群的影响. 生态学报, 2016, 36(22): 7393-7400.
- [25] 秦钟, 章家恩, 李庆芳. 城市化地区不同生境下中小型土壤动物群落结构特征. 应用生态学报, 2009, 20(12): 3049-3056.
- [26] 金涛涛, 张佛熠, 郑伟斌, 薛华健, 罗天宇, 张渺, 刘玮, 王琼. 南昌城乡不同绿地中小型土壤动物群落多样性及其影响因素. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1404-1414.
- [27] 刘新民. 科尔沁沙地不同生境条件下大型土壤动物群落多样性特征研究. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2008, 37(1): 98-103.
- [28] Zhu X Y, Gao B J, Yuan S L, Hu Y C. Community structure and seasonal variation of soil arthropods in the forest-steppe ecotone of the mountainous region in Northern Hebei, China. Journal of Mountain Science, 2010, 7(2): 187-196.
- [29] 俞筱桢, 余瑞, 黄娟, 陈菊, 袁子勇, 杨芳. 贵州茂兰喀斯特森林四药门花群落优势种群生态位特征. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3470-3478.
- [30] 郑超超, 伊力塔, 张超, 余树全, 库伟鹏, 钱逸凡, 凌骅. 浙江江山公益林物种间关系及 CCA 排序. 生态学报, 2015, 35(22): 7511-7521.
- [31] 何忠伟, 胡仁传, 黄日波, 谢强. 广西银杉林主要树种种群生态位分析. 林业科学研究, 2012, 25(6): 761-766.
- [32] 求锦津, 王咏雪, 李铁军, 孙鹏, 张苗苗, 聂振林, 俞松立, 田阔, 水柏年. 舟山长白海域主要游泳动物生态位及其分化研究. 生态学报, 2018, 38(18): 6759-6767.
- [33] 孟东平, 王翠红, 辛晓芸, 张金屯. 汾河太原段水体浮游藻类生态位的研究. 环境科学与技术, 2006, 29(10): 95-97, 120-121.
- [34] 韩雪梅, 李丹丹, 梁子安, 陈云峰, 胡诚. 北方常见农业土地利用方式对土壤螨群落结构的影响. 生态学报, 2013, 33(16): 5026-5034.
- [35] Villenave C, Saj S, Pablo A L, Sall S, Djigal D, Chotte J L, Bonzi M. Influence of long-term organic and mineral fertilization on soil nematofauna when growing Sorghum bicolor in Burkina Faso. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(7): 659-670.
- [36] Zhou Y W, Liu C H, Ai N, Tuo X H, Zhang Z Y, Gao R, Qin J F, Yuan C X. Characteristics of soil macrofauna and its coupling relationship with environmental factors in the loess area of northern Shaanxi. Sustainability, 2022, 14(5): 2484-2484.
- [37] Zhou Y W, Liu C H, Ai N, Qin J F, Shi J H, Nan Z Z. Soil fauna community characteristics and driving factors of Pinus tabulaeformis in the loess region of northern Shaanxi. CATENA, 2023, 229: 107196.