

DOI: 10.20103/j.stxb.202302130244

杨敏, 刘任涛, 曾飞越, 吉雪茹, 方进, 赵文智. 腾格里沙漠东南缘人工固沙植被演替地面节肢动物群落多样性分布特征. 生态学报, 2024, 44(1): 428-439.

Yang M, Liu R T, Zeng F Y, Ji X R, Fang J, Zhao W Z. Distribution of ground-active arthropod community diversity during the succession of artificial sand-fixing vegetation in the southeastern Tengger Desert. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 428-439.

腾格里沙漠东南缘人工固沙植被演替地面节肢动物群落多样性分布特征

杨 敏^{1,2,3}, 刘任涛^{1,2,3,*}, 曾飞越^{1,2,3}, 吉雪茹^{1,2,3}, 方 进^{1,2,3}, 赵文智^{2,4}

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

3 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

4 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

摘要:在腾格里沙漠东南缘选取 2、5、8、34 a 和 57 a 的不同年限人工固沙植被区为研究样地, 以流动沙地为对照, 利用陷阱诱捕法调查了不同样地地面节肢动物的群落组成及多样性特征, 阐明了固沙植被区地面节肢动物多样性对植被演替的响应规律。结果表明: (1) 此次调查共获得地面节肢动物 15685 头, 隶属于 15 目 40 科 44 个类群。随固沙年限的增加, 地面节肢动物优势类群数基本无变化, 常见类群数和稀有类群数分别增加了 0.5—2.5 倍和 0.25—2.75 倍; 捕食性、植食性和杂食性地面节肢动物类群数均呈上升趋势, 分别增加了 0.5—3 倍、0.2—4.2 倍和 0.3—1.67 倍。(2) 地面节肢动物总个体数表现为 8 a 和 57 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$), 分别是流沙地的 3.85 倍和 3.03 倍; 类群数和多样性指数均表现为 57 a 和 34 a 固沙植被区显著高于其他年限固沙植被区 ($P < 0.05$), 且 57 a 固沙植被区地面节肢动物类群数显著高于 34 a 固沙植被区 ($P < 0.05$)。(3) 草本植物密度、土壤有机碳和灌木高度是影响固沙植被区地面节肢动物群落组成及多样性分布的主要因子, 解释率分别为 48.1%、25.2% 和 9.1%。草本密度、土壤有机碳与地面节肢动物个体数、类群数和多样性指数均呈显著正相关 ($P < 0.05$); 灌木高度与地面节肢动物个体数呈显著正相关, 与类群数和多样性指数呈显著负相关 ($P < 0.05$)。综上所述: 地面节肢动物对固沙植被不同演替阶段环境条件的选择和适应性不同。流动沙地经人工固沙后, 可以提高地面节肢动物的多样性, 且 34 a 固沙时间是地面节肢动物多样性保持相对稳定的关键时间节点。

关键词:腾格里沙漠; 植被恢复; 地面节肢动物; 多样性保护

Distribution of ground-active arthropod community diversity during the succession of artificial sand-fixing vegetation in the southeastern Tengger Desert

YANG Min^{1,2,3}, LIU Rentao^{1,2,3,*}, ZENG Feiyue^{1,2,3}, JI Xueru^{1,2,3}, FANG Jin^{1,2,3}, ZHAO Wenzhi^{2,4}

1 School of Ecology and Environments, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Lab. for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China

3 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, China

4 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: In this study, we selected the 2-year, 5-year, 8-year, 34-year and 57-year artificial sand-fixing vegetation area in the southeastern Tengger Desert as study sites, and the mobile sand land was used as the control. The community composition and the diversity characteristics of ground-active arthropods in the revegetated areas of different years were

基金项目:宁夏自然科学基金重点项目(2020AAC02014);国家自然科学基金(41867005);宁夏重点研发计划项目(2021BEG03007);宁夏科技创新团队项目(2021RXTDLX01)

收稿日期:2023-02-13; 网络出版日期:2023-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxuliu2012@126.com

investigated by using pitfall trapping method. Combined with environmental factors, we clarified the response of ground-active arthropod diversity to vegetation succession in the revegetated areas. The results showed that: (1) a total of 15685 ground-active arthropods were obtained in this study, belonging to 15 orders, 40 families and 44 groups. Alongside the succession of the revegetated areas, there was no significant change of the number of dominant groups, whereas the number of common groups and rare groups increased by 0.5—2.5, 0.25—2.75, respectively, in comparison to the mobile sand land. And the number of the predatory, herbivorous and omnivorous groups increased by 0.5—3.0, 0.2—4.2 and 0.3—1.67, respectively. (2) Alongside the succession of revegetated areas, the total abundance of ground-active arthropods in 8-year and 57-year revegetated area was significantly higher than that in mobile sand land ($P < 0.05$), and increased by 3.85 and 3.03, respectively. There were significantly higher number of groups and diversity index of ground-active arthropods in 57-year and 34-year revegetated area than that in other sites, with the peak in 57-year revegetated area ($P < 0.05$). The number of groups of ground-active arthropods was found to be significantly higher in 57-year revegetated area compared with 34-year revegetated area ($P < 0.05$). (3) Herb density, soil organic carbon and shrub height were the main environmental factors driving the community composition and diversity of ground-active arthropods in the revegetated areas. Their contribution rate was 48.1%, 25.2% and 9.1%, respectively. Herb density and soil organic carbon had significantly positive correlation with the total abundance, the number of groups and the diversity index of ground-active arthropods ($P < 0.05$). Shrub height showed significantly positive correlation with the total abundance, and significantly negative correlation with the number of groups and the diversity index of ground-active arthropods ($P < 0.05$). In conclusion, there were different adaptabilities of ground-active arthropods to environmental conditions in the revegetated areas. It suggested that the revegetated plantations could improve the diversity of ground-active arthropods, and 34 years of revegetated plantations was the key time node for biodiversity conservation and desertification control in desertification region.

Key Words: Tengger Desert; revegetated plantation; ground-active arthropods; diversity conservation

在荒漠区进行人工固沙植被区建设和植被恢复,是有效控制沙漠化进程的重要生态措施,对改良土壤结构、改善土壤理化性质及荒漠生态系统的保护及恢复具有重要作用^[1-3]。地面节肢动物是荒漠生态系统中数量最多、物种最丰富的动物类群,扮演着消费者和分解者等关键角色,是构成荒漠生态系统的关键^[4-5]。随着人工固沙植被建植和恢复演替进程,植被和土壤理化性质、养分等环境条件将发生改变^[6-7]。由于植被和土壤为地面节肢动物提供食物来源和基本生存条件,因而固沙植被演替过程中地面节肢动物分布及多样性亦将发生显著变化^[8],直接反映人工固沙植被区生态恢复过程和进程。因此,研究人工固沙植被演替过程中地面节肢动物多样性变化规律,对于荒漠生物多样性保护、维持荒漠生态系统服务功能及固沙植被建设与管理均具有重要意义。

近年来,关于灌丛与土壤动物群落组成及多样性分布特征关系的研究较多。Kwok 等^[9]在澳大利亚新南威尔士州的研究发现,灌丛种类是比灌丛密度对地面节肢动物群落结构分布更重要的影响因素;Liu 等^[10]在以色列内盖夫沙漠的研究表明,季节性对沙漠不同灌丛微生物间地面节肢动物的丰度和多样性有调节作用;Zhang 等^[11]通过对腾格里沙漠三种人工灌丛林地地面节肢动物的分布和多样性的研究,发现相比于流动沙地,人工灌丛林地地面节肢动物的类群数和香农指数显著增加,总丰度无显著差异;刘继亮等^[4]在黑河中游的研究表明,干旱区人工固沙植被恢复过程中,植被类型不同对地表节肢动物群落组成的影响也不同;Gao 等^[12]在甘肃张掖东大山自然保护区的研究表明,灌丛显著提高了半干旱草原地面节肢动物的 alpha 多样性(丰富度和 Shannon 指数),但显著降低了 beta 多样性,灌丛对不同体型土壤动物的影响也存在一定差异性;陈应武^[13]对腾格里沙漠不同沙漠化植被区的昆虫进行研究,结果表明,从流沙区到荒漠化草原,昆虫的多度、丰富度和多样性逐渐升高。综合分析发现,这些研究主要集中于天然灌丛和人工固沙植被的不同种类对地面节肢动物或者昆虫的多度、群落组成及多样性分布的影响,但是关于人工固沙植被长期演变过程中地面节肢动物群落多样性变化规律的研究较少。

鉴于此,本研究选择腾格里沙漠固沙植被区为研究样地,利用陷阱诱捕法,通过调查不同年限固沙植被区

地面节肢动物群落组成、多样性分布和功能群结构,阐明人工固沙植被演替对地面节肢动物多样性的影响规律,旨在解析不同年限人工固沙植被区地面节肢动物的群落组成及多样性特征,确定固沙植被区地面节肢动物多样性分布的内在影响因素,不仅可以丰富腾格里沙漠人工固沙植被区土壤动物生态学领域的研究内容,为科学评估该区植被恢复与固沙效益提供土壤动物学方面的理论支撑^[14],还为我国荒漠生态系统生物多样性恢复和保育、人工植被建设以及沙漠化防治均提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫市沙坡头区腾格里沙漠东南缘的人工固沙植被区(37°25′—37°30′N, 104°43′—105°02′E)。该地区以流动沙丘为主,余为半固定沙丘及固定沙丘^[15]。平均海拔约 1339 m,年平均气温 9.6℃,年日照时数约 3264 h;年均降水量 186 mm 左右,年均蒸发量约为 3000 mm,是年均降水量的 16 倍。年均风速约为 2.9 m/s,大于 5 m/s 的沙风天气约 200 d 左右。土壤基质为风沙土。

人工固沙植被区中现有植物种包括灌木、半灌木植物如柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)和猫头刺(*Oxytropis aciphylla* Ledeb)等,草本植物如雾冰藜(*Bassia dasphylla*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii* Turcz)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2 样地选择及试验设计

于 2021 年在腾格里沙漠东南缘“包-兰”铁路两侧非灌溉人工固沙植被保护区选择流动沙地(人工固沙年限为 0 a,作为对照 CK)以及固沙年限分别为 2 a(2019 年固沙)、5 a(2016 年)、8 a(2013 年)、34 a(1987 年)和 57 a(1964 年)的人工固沙植被区为研究样地。样地距“包-兰”铁路 0.2—6 km。每个年限的固沙植被区均设 6 个重复样地,每个重复样地的面积为 30 m×30 m,间距为 0.5—1 km。考虑到沙丘微地形的影响和试验结果有效性,本研究选择丘底设置调查样点。

1.3 地面节肢动物调查与标本鉴定

在每个重复样地,沿着东、南、西、北 4 个方位布设 4 个陷阱杯(上、下表面直径分别为 9 cm 和 5 cm,高度为 10 cm),间隔 10 m 以上,保证杯口与地面齐平,在杯中加入防冻液以增加诱捕的有效性。每次共布设 144 个陷阱杯,布设时间均为 14 d,将获取的节肢动物标本置于装有浓度为 75% 的酒精的小白瓶中,用记号笔写好标签,带回实验室以待鉴定统计。于 2021 年 5 月、7 月和 9 月,利用陷阱诱捕法来收集节肢动物。

根据《中国土壤动物检索图鉴》^[16]和《宁夏贺兰山昆虫》^[17]等工具书来鉴定采集到的节肢动物,一般鉴定到科水平,少数鉴定到目。因土壤节肢动物的成虫和幼虫具有不同的生态作用,故将其分开鉴定统计。

1.4 植被调查

在每个陷阱杯旁设置 1 个 5 m×5 m 的大样方,每个大样方中随机选取 3 个 1 m×1 m 的草本样方,用样方法分别进行灌木、半灌木植物和草本植物的植被特征调查,包括个体数(株 m⁻²)、物种数、高度(cm)。

1.5 土壤采集及理化性质测定

在每个重复样地,首先,在每个陷阱杯旁取 1 个 0—10 cm 表层土壤样品,装入提前做好标记的自封袋,置于保温箱带回实验室;土壤样品置于实验室内自然阴干,过 2 mm 孔径筛去除杂质后,一部分用于土壤 pH、电导率和粒径组成的测定;一部分土壤样品研磨后过 0.01 mm 孔径筛,用于土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)和土壤全钾(TK)的测定。其次,用铝盒采集 0—10 cm 表层土壤,用于土壤含水量测定。最后,用体积为 100 cm³的环刀采集原状土壤,用于土壤容重测定。

土壤含水量(%)及土壤容重(g/cm³)采用烘干称量法进行测定。土壤粒径组成采用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪测定。土壤 pH 和电导率均按水土比为 5:1 浸提后进行测定。土壤有机碳(g/kg)用重铬酸钾容量法(外加热)测定,土壤全氮(g/kg)用半微量开氏法测定,土壤全钾(g/kg)采用 NaOH 熔融—火焰光度计法测定。

1.6 数据处理

地面节肢动物群落多样性以 Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)表示^[18],计算公式如下:

$$P_i = n_i/N \quad (i = 1, 2, 3, \dots, S)$$

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, S)$$

$$D = \sum (n_i/N)^2 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, S)$$

式中, P_i 为种 i 的个体数占群落总个体数的比例; S 为物种数; N 为全部种的个体数。

根据不同地面节肢动物个体数占总捕获量的百分比将其划分为优势类群($\geq 10\%$)、常见类群($1\%—10\%$)和稀有类群($\leq 1\%$)^[19]。

使用 Excel 和 SPSS Statistics 26 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析和最小显著差异法比较不同数据之间的差异,采用方差齐性检验和非参数检验差异显著性。用 R 的 vegan 包对地面节肢动物的多样性指数进行计算,用 Origin 2021 软件进行作图。采用 Canoco 5 对地面节肢动物群落指数及环境因子进行去趋势对应分析(DCA),计算排序轴梯度长度(lengths of gradient, LGA),以选择适宜的排序分析方法。分析时,将所有数据进行 $\log(x+1)$ 转换。同时,采用偏 RDA 分析(partial RDA)和蒙特卡洛置换检验(Monte/Carlo permutation test),定量评价每个环境因子对地面节肢动物群落指数的贡献率。

2 结果与分析

2.1 环境特征

由表 1 可以看出,不同年限固沙植被区的土壤理化性质和植被特征均表现出一定的差异性。随着固沙年限的增加,土壤黏粉粒、细砂粒、有机碳均呈上升趋势,表现为 34 a 和 57 a 固沙植被区显著高于其他年限固沙植被区($P < 0.05$),且 57 a 固沙植被区显著高于 34 a 固沙植被区。土壤全氮表现为 57 a 固沙植被区显著高于其他年限固沙植被区($P < 0.05$)。土壤粗砂、容重均表现为流动沙地显著高于 8 a、34 a 和 57 a 固沙植被区

表 1 不同样地土壤理化性质和植被特征(平均值 \pm 标准误)

Table 1 Soil properties and vegetation characteristics in different sampling sites (Mean \pm SE)

环境指标 Environmental factors	年限 Year/a					
	0	2	5	8	34	57
土壤含水量 Soil moisture content/%	1.22 \pm 0.57a	1.25 \pm 0.75a	1.29 \pm 0.77a	1.61 \pm 0.99a	1.44 \pm 1.10a	2.33 \pm 1.74a
土壤黏粉粒 Soil clay plus silt content/%	0.00 \pm 0.00c	0.82 \pm 0.15c	1.02 \pm 0.22c	1.17 \pm 0.46c	14.68 \pm 0.65b	16.86 \pm 0.76a
土壤细砂 Soil fine sand content/%	1.61 \pm 0.94c	3.79 \pm 1.35c	3.92 \pm 1.35c	5.40 \pm 1.75c	14.80 \pm 1.25b	25.42 \pm 1.67a
土壤粗砂 Soil coarse sand content/%	98.39 \pm 0.94a	95.39 \pm 1.48ab	94.78 \pm 1.79ab	93.44 \pm 1.57b	70.52 \pm 0.61c	56.91 \pm 1.37d
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	1.63 \pm 0.02a	1.59 \pm 0.02ab	1.65 \pm 0.01a	1.48 \pm 0.01d	1.57 \pm 0.03bc	1.50 \pm 0.02d
土壤电导率 Soil electrical conductivity/(μ S/cm)	51.45 \pm 3.02c	61.86 \pm 3.37bc	65.57 \pm 3.89bc	76.94 \pm 5.28ab	77.48 \pm 8.55ab	86.48 \pm 5.13a
土壤 pH Soil pH	7.63 \pm 0.13a	7.90 \pm 0.07a	7.80 \pm 0.04a	7.83 \pm 0.12a	7.80 \pm 0.12a	7.75 \pm 0.12a
土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	0.69 \pm 0.14c	0.90 \pm 0.08c	0.97 \pm 0.14c	1.13 \pm 0.04c	2.86 \pm 0.22b	4.59 \pm 0.25a
土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)	0.06 \pm 0.01b	0.06 \pm 0.02b	0.06 \pm 0.01b	0.08 \pm 0.01b	0.18 \pm 0.02b	0.53 \pm 0.12a
土壤全钾 Soil total kalium/(g/kg)	18.56 \pm 0.34b	18.71 \pm 0.35ab	17.99 \pm 0.33b	19.78 \pm 0.67a	18.79 \pm 0.27ab	18.39 \pm 0.17b
灌木丰富度 Shrub richness	2.67 \pm 0.33d	4.00 \pm 0.00bc	3.00 \pm 0.00cd	3.00 \pm 0.00cd	4.33 \pm 0.33b	7.33 \pm 0.67a
草本丰富度 Herb richness	2.67 \pm 0.67d	8.00 \pm 2.08bcd	6.33 \pm 0.88cd	9.00 \pm 1.00bc	12.00 \pm 2.52ab	15.67 \pm 2.33a
灌木高度 Shrub height/cm	56.61 \pm 5.10b	52.74 \pm 3.07b	88.21 \pm 5.01a	88.92 \pm 3.73a	64.62 \pm 4.15b	59.52 \pm 6.34b
草本高度 Herb height/cm	27.24 \pm 5.02a	23.17 \pm 3.14ab	17.4 \pm 2.34ab	18.68 \pm 2.81ab	14.39 \pm 2.87b	13.71 \pm 4.49b
灌木密度 Shrub density/(株/m ²)	0.13 \pm 0.07c	0.66 \pm 0.02abc	0.58 \pm 0.05abc	0.64 \pm 0.06abc	0.83 \pm 0.14ab	1.03 \pm 0.39a
草本密度 Herb density/(株/m ²)	0.88 \pm 0.10c	4.04 \pm 1.19abc	10.81 \pm 5.9abc	13.26 \pm 3.57ab	3.86 \pm 1.07bc	14.34 \pm 4.26a

0 a 为流动沙地, 2 a、5 a、8 a、34 a、57 a 分别代表不同年限的人工固沙植被区; 同行不同字母表示存在显著差异($P < 0.05$)

($P < 0.05$), 与 2 a 和 5 a 固沙植被区差异不显著 ($P > 0.05$)。土壤电导率表现为 8 a、34 a 和 57 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$)。土壤全钾表现为 8 a 固沙植被区显著高于 5 a、57 a 固沙植被区及流动沙地 ($P < 0.05$), 2 a 和 34 a 固沙植被区居中。灌木丰富度表现为 57 a 固沙植被区显著高于其他年限固沙植被区, 2 a 和 34 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$)。草本丰富度和灌木密度均表现为 57 a 固沙植被区显著高于 2 a、5 a、8 a 固沙植被区及流动沙地 ($P < 0.05$), 灌木高度表现为 5 a 和 8 a 固沙植被区显著高于其他年限固沙植被区 ($P < 0.05$)。草本高度表现为流动沙地显著高于 34 a 和 57 a 固沙植被区 ($P < 0.05$), 灌木密度表现为 34 a 和 57 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$), 草本密度表现为 57 a 固沙植被区显著高于 34 a 固沙植被区和流动沙地, 8 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$)。

2.2 地面节肢动物群落组成与数量特征

由表 2 可知在研究样地共获得地面节肢动物 15685 只, 隶属于 15 目 40 科 44 个类群。其中优势类群有 3 个, 包括蚁科、拟步甲科和毒蛾科幼虫, 其个体数占比分别为 47.22%、23.26% 和 11.04%; 常见类群有 4 个, 包括步甲科、平腹蛛科、光盆蛛科和长奇盲蛛科, 其个体数占比分别为 8.14%、2.05%、1.08% 和 1.56%; 其余 37 个类群为稀有类群, 其个体占比为 5.65%。

其中, 流动沙地优势类群、常见类群和稀有类群的类群数分别为 2、2、8, 其个体数分别占本样地总个体数的 93.00%、5.53%、1.47%。相对于流动沙地, 2 a 固沙植被区地面节肢动物优势类群、常见类群和稀有类群的类群数分别为 2、5、10, 其个体数占比分别为 85.24%、12.54% 和 2.22%。5 a 固沙植被区地面节肢动物优势类群、常见类群和稀有类群的类群数分别为 3、2、14, 其个体数占比分别为 93.20%、4.84% 和 1.96%。8 a 固沙植被区地面节肢动物优势类群、常见类群和稀有类群的类群数分别为 2、3、12, 其个体数占比分别为 82.05%、17.04% 和 0.91%。34 a 固沙植被区地面节肢动物优势类群、常见类群和稀有类群的类群数分别为 2、7、17, 其个体数占比分别为 73.21%、21.26% 和 5.53%。57 a 固沙植被区地面节肢动物优势类群、常见类群和稀有类群的类群数分别为 2、7、30, 其个体数占比分别为 67.21%、26.39% 和 6.40%。

2.3 地面节肢动物群落指数特征

由图 1 可知, 地面节肢动物个体数表现为 8 a 和 57 a 固沙植被区显著高于 2 a 和 34 a 固沙植被区及对照流动沙地 ($P < 0.05$), 5 a 固沙植被区居中。类群数和多样性指数 (Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数) 均表现为 34 a 和 57 a 固沙植被区显著高于其他年限固沙植被区 ($P < 0.05$), 而且 57 a 固沙植被区地面节肢动物类群数显著高于 34 a 样地。

2.4 地面节肢动物功能群结构特征

根据地面节肢动物取食类型, 将其划分为捕食性、植食性、杂食性和腐食性 4 个功能群^[20]。由表 2 可以看出, 植食性动物有 20 个类群, 个体数占比为 37.48%; 捕食性有 19 个类群, 个体数占比为 14.39%; 杂食性有 4 个类群, 个体数占比为 47.98%; 腐食性有 1 个类群, 个体数占比为 0.16%。植食性和杂食性动物的个体数占比最高, 而植食性和捕食性动物的类群数占比最高, 腐食性动物的类群数和个体数占比均最低。

由于腐食性类群只有 1 个类群, 且个体数较少, 故本研究只统计比较植食性、捕食性和杂食性 3 个功能群的个体数量分布特征。

由图 2 可知, 与流动沙地相比, 随着人工固沙年限的增加, 植食性动物个体数无显著变化; 杂食性动物个体数在 8 a 固沙植被区个体数达到最大值, 且表现为 5 a 和 8 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$); 捕食性动物个体数随固沙年限的增加呈先下降后上升的趋势, 表现为其他年限固沙植被区显著高于 2 a 固沙植被区, 57 a 固沙植被区显著高于 5 a、8 a 和 34 a 固沙植被区 ($P < 0.05$)。

植食性、杂食性、捕食性动物类群数随着人工固沙年限的增加均呈现增加趋势。其中, 植食性和杂食性动物的类群数表现为 34 a 和 57 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$), 而 2 a、5 a 和 8 a 固沙植被区与流动沙地间无显著性差异; 捕食性动物的类群数表现为 5 a、34 a 及 57 a 固沙植被区显著高于流动沙地 ($P < 0.05$), 而 2 a 和 8 a 固沙植被区与流动沙地无显著性差异。

表 2 地面节肢动物群落数量特征 (平均值±标准误差)

动物类群 Fauna group 科 Family	食性 Trophic	Table 2 Quantity characteristics of ground-active arthropods communities (Mean±SE)												
		0 a	2 a	5 a	8 a	34 a	57 a	总和 Sum						
		相对多度 Relative abundance	个体数 Individual	相对多度 Relative abundance	个体数 Individual	相对多度 Relative abundance	个体数 Individual	相对多度 Relative abundance	个体数 Individual	相对多度 Relative abundance	个体数 Individual	相对多度 Relative abundance	个体数 Individual	相对多度 Relative abundance
蚁科 Formicidae	Om	++	44.94±3.32	+++	91.11±36.90	+++	152.06±46.29	+++	42.22±15.24	+++	79.39±31.33	+++	79.39±31.33	+++
潮虫科 Oniscidae	Om							++	1.94±0.63	++	4.28±1.97	++	4.28±1.97	++
蚤斯科 Tettigoniidae	Om			+	0.06±0.06	+	0.06±0.06	+	0.06±0.06	+	0.06±0.06	+	0.06±0.06	+
蝗蝻科 Labiduridae	Om	+												
步甲科 Carabidae	Pr	+++	3.83±2.28	++	6.11±3.39	++	13.67±10.60	++	8.72±2.47	++	17.33±7.18	++	17.33±7.18	++
盲甲科 Histeridae	Pr			+	0.06±0.06	+								
逍遥蛛科 Philodromidae	Pr		0.06±0.06				0.06±0.06	+			0.06±0.06	+		+
管巢蛛科 Clubionidae	Pr													
平腹蛛科 Gnaphosidae	Pr	+	1.67±1.07	++	1.83±1.02	++	5.39±4.89	++	2.39±0.71	++	6.50±2.04	++	6.50±2.04	++
跳蛛科 Salticidae	Pr	+	0.11±0.06	+	0.11±0.11	+	0.17±0.10	+	0.22±0.06	+	1.17±0.69	+	1.17±0.69	+
光笱蛛科 Liocranidae	Pr	+	1.17±1.00	++	0.61±0.29	+	0.39±0.20	+	0.56±0.47	+	6.50±2.46	++	6.50±2.46	++
狼蛛科 Lycosidae	Pr				0.17±0.10	+	0.17±0.10	+	0.50±0.42	+	0.78±0.53	+	0.78±0.53	+
隆头蛛科 Eresidae	Pr								0.17±0.10	+				
蟹蛛科 Thomisidae	Pr		0.11±0.06	+	0.11±0.06	+			0.17±0.10	+	0.67±0.35	+	0.67±0.35	+
幽灵蛛科 Pholcidae	Pr										0.06±0.06	+	0.06±0.06	+
长奇盲蛛科 Opilionidae	Pr										12.17±6.11	++	12.17±6.11	++
钳蝎科 Buthidae	Pr								0.44±0.36	+	5.17±4.52	++	5.17±4.52	++
蜘蛛科 Scutigerae	Pr						0.06±0.06	+	0.33±0.19	+	0.94±0.48	+	0.94±0.48	+
猎蝽科 Reduviidae	Pr										0.06±0.06	+	0.06±0.06	+
卡尔避日蛛科 Karschiidae	Pr										0.11±0.06	+	0.11±0.06	+
蟬总科 Isodoidea	Pr										0.17±0.10	+	0.17±0.10	+
蚁蛉科 Myrmeleontidae	Pr		0.06±0.06	+	0.17±0.17	+	0.11±0.11	+	0.28±0.28	+				+
蚊蛉科幼虫 Larva Myrmeleontidae	Pr	+			0.06±0.06	+					0.06±0.06	+	0.06±0.06	+
拟步甲科 Tenebrionidae	He	+++	14.39±6.61	+++	29.94±16.19	+++	25.67±8.05	++	30.67±14.19	+++	59.78±36.20	+++	59.78±36.20	+++
象甲科 Curculionidae	He	+	0.44±0.28	+	1.22±1.06	+	0.83±0.54	+	1.33±1.08	++	1.94±1.55	+	1.94±1.55	+
吉丁甲科 Buprestidae Leach	He						0.06±0.06	+			0.83±0.75	+	0.83±0.75	+

续表

Fauna group 科 Family	食性 Trophic	0 a		2 a		5 a		8 a		34 a		57 a		总和 Sum		
		个体数 Individual	相对多度 Relative abundance	个体数 Individual												
鳃金龟科 Melolonthidae	He	2.00±1.92	++	0.44±0.44	+	0.17±0.10	+	0.22±0.22	+	0.39±0.39	+	0.22±0.22	+	0.22±0.22	+	+
花金龟科 Cetoniidae	He							0.17±0.10	+							+
叶甲科 Chrysomelidae	He							1.11±1.03	++	1.67±1.42	+					+
叶甲科幼虫 Larval Chrysomelidae	He							4.22±4.22	++	0.56±0.56	+					+
天牛科 Cerambycidae	He			0.06±0.06	+	0.11±0.11	+									+
鞘翅目幼虫 Larval Coleoptera	He	0.28±0.28	+	0.06±0.06	+	0.06±0.06	+			0.50±0.50	+	0.56±0.47	+			+
泥蜂科 Sphecidae	He	0.06±0.06	+	0.11±0.11	+	0.28±0.28	+			0.28±0.20	+	0.67±0.35	+			+
异蜂科 Urostylidae	He											2.67±2.26	++			+
蜂科 Pentatomidae	He											0.22±0.22	+			+
盲蝽科 Miridae	He							0.06±0.06	+			0.11±0.11	+			+
缘蝽科 Coreidae	He			0.11±0.11	+					0.11±0.11	+	0.39±0.15	+			+
长蝽科 Lygaeidae	He											0.06±0.06	+			+
癭蝽科 Pamphagidae	He											0.17±0.17	+			+
网翅蝗科 Arcepteridae	He											0.17±0.10	+			+
网翅蝗科幼虫 Larval Arcepteridae	He											0.11±0.11	+	0.22±0.22	+	+
球蚜总科 Aleydidae	He			1.33±1.33	++					0.78±0.78	+			0.06±0.06	+	+
毒蛾科幼虫 Larva Lymantriidae	He			0.72±0.72	++	32.11±32.11	+++	63.39±63.39	+++							+++
粪金龟科 Geotrupidae Latreille	Sa					0.06±0.06	+	0.22±0.22	+	0.44±0.22	+	0.67±0.42	+			+

0 a 为流动沙地, 2 a, 5 a, 8 a, 34 a, 57 a 分别代表不同年限的人工固沙植被区; Pr: 捕食者 Predator; He: 植食者 Herbivore; Om: 杂食者 Omnivore; Sa: 腐食者 Saprophage; “+++”为优势类群, “++”为常见类群, “+”为稀有类群

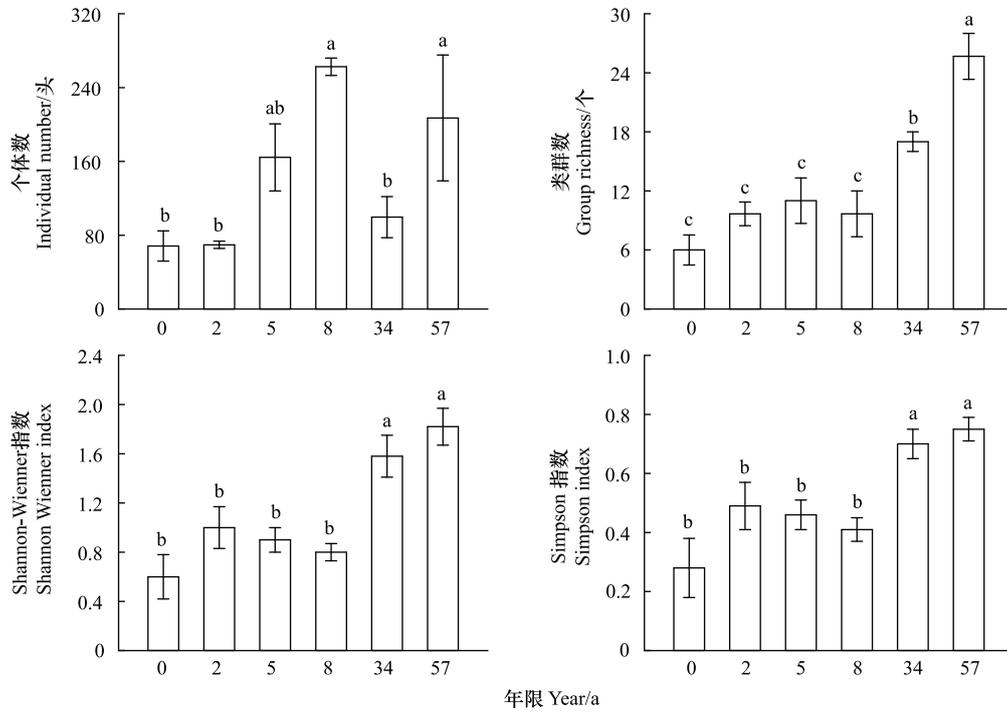


图 1 地面节肢动物群落指数变化

Fig.1 Changes of index of ground-active arthropods communities

0 a 为流动沙地, 2 a、5 a、8 a、34 a、57 a 分别代表不同年限的人工固沙植被区; 同一幅图中同一组直方柱上方不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

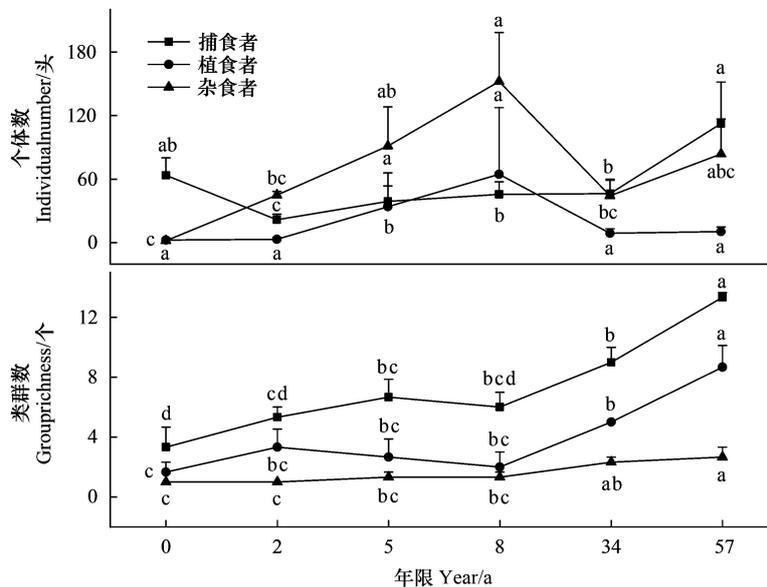


图 2 地面节肢动物功能群个体数和类群数

Fig.2 Individuals and group richness of functional groups of ground-active arthropods

0 a 为流动沙地, 2 a、5 a、8 a、34 a、57 a 分别代表不同年限的人工固沙植被区; 同一幅图中同一组直方柱上方英文小写字母不同, 表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.5 地面节肢动物群落分布与环境因子之间的关系

经 DCA 分析得到 LGA 为 2.17, 该值小于 4, 所以选择线性模型的冗余对应分析 (redundancy analysis, RDA) 来确定地面节肢动物群落指数与环境因子间的关系^[21]。RDA 结果(图 3)显示, 两个典范轴累计方差解释率为 95.26% (第 1、2 排序轴分别解释 61.62% 和 33.64%)。对地面节肢动物群落分布影响显著的因子包括草本密度、土壤有机碳和灌木高度(表 3, $P < 0.05$), 贡献率分别为 48.1%、25.2% 和 9.1%。其中, 草本密度、土壤有机碳与地面节肢动物个体数、类群数和多样性指数均呈显著正相关; 灌木高度与地面节肢动物个体数呈显著正相关, 与类群数和多样性指数呈显著负相关。

3 讨论

3.1 固沙植被演替对地面节肢动物群落组成的影响

本研究中, 不同样地地面节肢动物优势类群数基本无变化, 但因不同样地间生境类型的环境、食源条件等不同, 优势类群种类组成表现出一定差异^[22]。首先, 人工固沙植被区的优势种均包含蚁科, 这与龚玉梅^[23]等的研究结果相似。由流动沙地转变为人工固沙植被区, 灌木和草本种类和密度增多, 为蚁科个体存活提供了适宜的环境和食物资源条件, 吸引蚂蚁定居和筑巢^[24]。其次, 除 8 a 固沙植被区外, 流动沙地和其他年限固沙植被区的优势类群均包含拟步甲科。刘任涛^[25]等在宁夏盐池、刘继亮^[26]等在中国西北内陆干旱区黑河流域的研究结果均表明, 拟步甲科是我国荒漠半荒漠地区地面节肢动物群落的主要类群。这是因为拟步甲科对沙漠有倾向性, 作为喜沙动物, 适应干旱少雨的环境^[27]。同时, 拟步甲科爬行能力强, 食性复杂, 对环境的适应能力极强。研究^[28]表明, 枯落物全钾含量越低, 拟步甲科出现的概率越大。而枯落物的积累和地面节肢动物尸体及排泄物的富集都能导致土壤全钾含量的增高^[29], 所以 8 a 固沙植被区拟步甲科不再是优势种, 可能是由于该区土壤全钾含量较高。相比流动沙地, 各年限人工固沙植被区中步甲科不再是优势类群, 原因可能是无

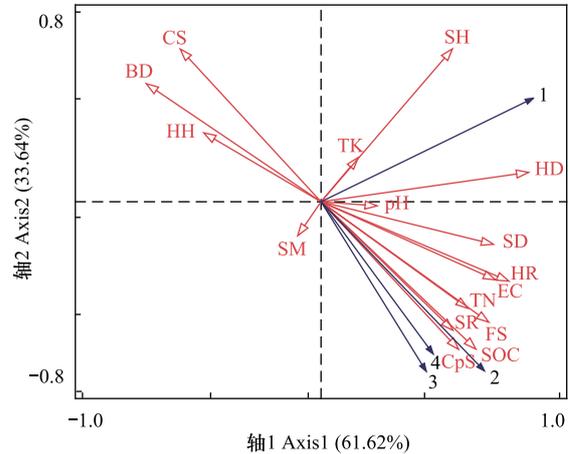


图 3 地面节肢动物群落指数及环境因子关系的 RDA 二维排序图

Fig.3 RDA two-dimensional diagram of the relationship between ground-active arthropods community index and environmental factors

SM: 土壤含水量; CpS: 土壤黏粉粒; FS: 土壤细砂粒; CS: 土壤粗砂粒; BD: 土壤容重; EC: 土壤电导率; pH: 土壤酸碱度; SOC: 土壤有机碳; TN: 土壤全氮; TK: 土壤全钾; SR: 灌木丰富度; HR: 草本丰富度; SH: 灌木高度; HH: 草本高度; SD: 灌木密度; HD: 草本密度; 1: 地面节肢动物个体数; 2: 地面节肢动物类群数; 3: 地面节肢动物 Shannon-Wiener 指数; 4: 地面节肢动物 Simpson 指数

表 3 环境因子对地面节肢动物群落指数相对贡献的偏 RDA 分析

Table 3 Partial RDA analysis on the relative contribution of environmental factors to the community index of ground-active arthropods

指标 Index	HD	SOC	SH	SR	CpS	SM	BD	TK
贡献率 Contribution/%	48.1	25.2	9.1	2.7	2.3	1.8	1.5	1.1
F	14.3	13.2	6.5	2.1	1.9	1.5	1.3	1
P	0.002	0.002	0.002	0.116	0.174	0.24	0.292	0.372
指标 Index	pH	CS	HH	FS	EC	SD	TN	HR
贡献率 Contribution/%	1.1	0.9	0.7	1.4	1.1	1.5	1	0.4
F	1	0.8	0.6	1.2	0.9	1.3	0.9	0.2
P	0.372	0.452	0.562	0.316	0.396	0.344	0.466	0.806

HD: 草本密度 Herb density; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; SH: 灌木高度 Shrub height; SR: 灌木丰富度 Shrub richness; CpS: 土壤黏粉粒 Soil clay plus silt content; SM: 土壤含水量 Soil moisture content; BD: 土壤容重 Soil bulk density; TK: 土壤全钾 Soil total kalium; pH: 土壤酸碱度 Soil potential of hydrogen; CS: 土壤粗砂粒 Soil coarse sand content; HH: 草本高度 Herb height; FS: 土壤细砂粒 Soil fine sand content; EC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity; SD: 灌木密度 Shrub density; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; HR: 草本丰富度 Herb richness

植被覆盖的流动沙地能够保证步甲科动物自由活动,更主要的原因可能是步甲科需要高温、水分条件适宜的流动沙地进行产卵孵化,而人工固沙植被区覆盖度增加可能会影响步甲科动物移动行为,随着固沙年限的增加,人工固沙植被区灌丛及草本覆盖度的增加导致地面节肢动物个体爬行的阻力增大,这与步甲科动物具有较强的移动能力适应特殊环境条件相关^[30]。因此在人工固沙植被区,步甲科的个体数降低,由流动沙地的优势种转为人工固沙植被区的常见种。5 a 和 8 a 固沙植被区优势类群均包括毒蛾科幼虫,表征了 5—8 a 固沙植被区存在着较多农林害虫,需要从植物保护的角度注意植被管理和虫害防治^[31]。人工固沙植被区地面节肢动物常见类群、稀有类群变化较大,且类群数均增加,说明人工固沙植被区为地面节肢动物的存活、定居及繁衍创造了适宜的生境和食物^[32],可以吸引更多的地面节肢动物前来定居、生存。

总之,由于地面节肢动物生物生态学特征和生活史习性不同,对不同固沙植被区环境条件的选择和适应性不同,因此流动沙地经人工固沙后,地面节肢动物群落组成随固沙植被演替而发生显著变化^[21,33]。

3.2 固沙植被演替对地面节肢动物群落多样性分布的影响

土壤动物个体数、类群数和多样性指数是反映土壤动物群落结构和分布的重要指标^[34]。8 a 和 57 a 固沙植被区地面节肢动物个体数显著高于流动沙地、2 a 和 34 a 固沙植被区。蚂蚁是人工固沙植被区的优势种,其可食用资源与可利用的生态位较多^[35],且因对生态环境变化敏感而成为环境变化的重要指示生物^[36—37]。所以蚂蚁的个体数变化可能是引起地面节肢动物总个体数变化的原因之一。其次主要还与草本密度和灌木高度有关(表 3)。8 a 固沙植被区灌木高度和 57 a 固沙植被区草本密度分别达到最大值,为不耐高温的地面节肢动物提供了保护和充足的食物来源^[38],使得其个体数较高。

地面节肢动物类群数和多样性指数均表现为固沙植被建植 8 a 之前与流动沙地无显著差异,但是 34 a 和 57 a 固沙植被区显著增加。这与土壤有机碳含量密切相关(表 3)。土壤有机碳是土壤质量评价的重要指标^[39]。随植被恢复固沙植被区风速减慢,不同种类植物枯落物的累积、结皮的发育和演化使土壤养分得到改善^[32],使土壤有机碳随固沙年限的增加而增加,且表现为 34 a 和 57 a 固沙植被区显著高于其他年限固沙植被区,为更多种类的地面节肢动物生存提供充足的养分。但是地面节肢动物多样性指数表现为 34 a 和 57 a 固沙植被区无显著差异。说明了 34 a 固沙时长是地面节肢动物多样性保持相对稳定的关键时间节点^[40]。

3.3 固沙植被演替对地面节肢动物功能群结构的影响

土壤动物的生态作用是通过各功能类群间的食物网来实现的^[41],地面节肢动物占据不同的营养结构,是土壤食物网的主要组成部分,在调节物质循环过程中起到重要作用^[42]。不同食性地面节肢动物对不同植被恢复时间的敏感程度不同,使得地面节肢动物的功能类群在各年限固沙植被区分布上存在差异,导致土壤动物群落结构发生变化。杂食性类群个体数对不同年限人工固沙植被区的响应与地面节肢动物总个体数的变化规律相似,杂食性蚁科个体数的变化是其主要原因,这与上面的分析一致。植食性动物个体数在不同年限固沙植被区无显著变化,捕食性则差异性较大,整体表现为先降低再增加的趋势。这说明捕食性动物个体数对不同年限固沙植被区的响应较植食性敏感,与刘任涛^[43]的研究结果相似。2 a 固沙植被区捕食性动物个体数显著低于流动沙地,捕食性步甲科个体数的变化是其主要原因,与上面的分析一致^[30]。5 a—57 a 固沙植被区捕食性动物个体数呈上升趋势,蛛形纲数量变化是其主要原因。植被恢复有利于改善蛛形纲动物的栖居环境和丰富其食物资源^[44],使其数量增加。

不同食性地面节肢动物类群数随着固沙年限的变化趋势基本一致,均随固沙年限的增加呈波动上升趋势。捕食性和植食性地面节肢动物的类群数占比较大,特别是捕食性动物表现出更大的优势地位,反映了研究区域地面节肢动物区系以捕食性动物分布为其主要特征,这与刘任涛等^[45]在宁夏盐池的研究结果相似。研究表明,随着固沙年限的增加,植被丰富度和密度逐渐增加,捕食性动物类群数因植食性动物类群数的增加而增加,反应了一种“上行控制效应”^[46—47]。这有利于维持荒漠生态系统食物网结构稳定性^[48],从而加快土壤恢复进程。

综上所述,相比于流动沙地,人工固沙植被区的地面节肢动物的个体数、类群数和多样性均有提高。本研

究揭示了腾格里沙漠人工固沙植被长期演变过程中地面节肢动物多样性的变化规律,为腾格里沙漠人工固沙植被区土壤动物多样性保育及固沙植被管理提供了有价值的信息。基于此,未来可以进一步研究人工固沙植被长期演变过程中地面节肢动物的生态功能。

4 结论

(1) 随着固沙植被演替,地面节肢动物优势类群数基本无变化,常见类群和稀有类群数均增加。

(2) 地面节肢动物个体数随着固沙植被演替呈波动变化趋势,而 34 a 和 57 a 固沙植被区呈现了较高的地面节肢动物多样性。

(3) 34 a 固沙时间是地面节肢动物多样性保持相对稳定的关键时间节点,可以为固沙植被管理利用提供重要参考依据。

参考文献(References):

- [1] 田青,王建兵,张德罡,王理德. 腾格里沙漠南缘植被恢复过程中土壤理化性状的变化. 中国沙漠, 2013, 33(3): 772-776.
- [2] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y, Drake S. Facilitative effects of shrubs in shifting sand on soil macro-faunal community in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, Northern China. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(5): 316-321.
- [3] Le Houerou H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14(1): 3-14.
- [4] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 潘成臣. 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. 生态学报, 2018, 38(4): 1357-1365.
- [5] 常海涛. 乌拉特荒漠草原红砂灌丛林种植柠条后土壤动物群落结构时空分布特征[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [6] 李新荣, 张志山, 黄磊, 王新平. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述. 科学通报, 2013, 58(5): 397-410.
- [7] 王蕙, 赵文智. 绿洲化过程中绿洲土壤物理性质变化研究. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1109-1115.
- [8] 周永维. 吴起小流域不同植被类型对土壤动物群落特征的影响[D]. 延安: 延安大学, 2022.
- [9] Kwok A B C, Eldridge D J. The influence of shrub species and fine-scale plant density on arthropods in a semiarid shrubland. *The Rangeland Journal*, 2016, 38(4): 381-389.
- [10] Liu R T, Steinberger Y. Seasonal distribution and diversity of ground-active arthropods between shrub microhabitats in the Negev Desert, Israel. *Arid Land Research and Management*, 2018, 32(1): 91-110.
- [11] Zhang A N, Liu R T, Huang L. Effects of shrub revegetation on ground-active arthropod diversity and trophic structure in the Tengger Desert. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 101: 103246.
- [12] Gao H N, Li C X, Jiao Y, Zhang Y, Feng Q. Shrubs alter alpha and beta diversity of soil fauna in a semiarid grassland. *Rangeland Journal*, 2022, 44(4): 213-220.
- [13] 陈应武. 腾格里沙漠东南缘沙漠化对昆虫多样性的影响. 河南农业科学, 2015, 44(9): 77-81.
- [14] 郝宝宝. 陕北风沙黄土区人工林大型土壤动物群落特征[D]. 延安: 延安大学, 2021.
- [15] 王文帆, 刘任涛, 郭志霞, 冯永宏, 蒋嘉瑜. 腾格里沙漠东南缘固沙灌丛土壤理化性质及分形维数. 中国沙漠, 2021, 41(1): 209-218.
- [16] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] 王新谱, 杨贵军. 宁夏贺兰山昆虫. 银川: 宁夏人民出版社, 2010.
- [18] 张安宁, 常海涛, 陈蔚, 刘任涛. 干旱风沙区灌丛林地地面节肢动物群落对放牧管理的响应. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3931-3941.
- [19] 辛未冬, 刘华煜, 杨铁萌, 赵浩志. 复垦对煤矸石山地表节肢动物群落特征的影响. 生态学杂志, 2021, 40(7): 2213-2222.
- [20] 罗维成, 赵文智, 刘继亮, 杨竞艺, 白雪莲, 魏乐民, 冯怡琳. 祁连山自然保护区煤矿修复区地表节肢动物分布特征及其影响因素. 中国沙漠, 2022, 42(6): 165-175.
- [21] 白燕娇, 刘任涛, 常海涛. 干旱绿洲区不同生长年限枸杞林地面节肢动物群落分布特征. 生态与农村环境学报, 2021, 37(9): 1190-1199.
- [22] Zhao H L, Liu R T. The "bug island" effect of shrubs and its formation mechanism in Horqin Sand Land, Inner Mongolia. *CATENA*, 2013, 105: 69-74.
- [23] 龚玉梅, 时项峰, 王新谱. 宁夏沙边子的土壤动物多样性. 林业科学, 2009, 45(9): 163-168.
- [24] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 王建英, 曲浩. 科尔沁沙地流动沙丘掘穴蚁(*Formica cunicularia*)筑丘活动及其对土壤的作用. 中国沙漠, 2010, 30(1): 135-139.
- [25] 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. 应用生态学报, 2014, 25(1): 228-236.

- [26] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 牛瑞雪. 黑河流域荒漠生态系统地面土壤动物群落的组成与多样性. 中国沙漠, 2010, 30(2): 342-349.
- [27] 娄巧哲, 徐养诚, 马吉宏, 吕昭智. 古尔班通古特沙漠南缘地表甲虫物种多样性及其与环境的关系. 生物多样性, 2011, 19(4): 441-452.
- [28] 晏静, 张瑞海, 宋振, 张国良, 刘玉升, 付卫东. 黄顶菊 (*Flaveria bidentis*) 凋落物对土壤无脊椎动物群落的影响. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 182-193.
- [29] Nkem J N, Lobry de Bruyn L A, Grant C D, Hulugalle N R. The impact of ant bioturbation and foraging activities on surrounding soil properties. *Pedobiologia*, 2000, 44(5): 609-621.
- [30] Crist T O, Guertin D S, Wiens J A, Milne B T. Animal movement in heterogeneous landscapes: an experiment with *Eleodes* beetles in shortgrass prairie. *Functional Ecology*, 1992, 6: 536-544.
- [31] 韩国君, 张文忠, 韩国辉, 李学智, 陈长杰. 黑绒鳃金龟生物学特性研究. 吉林林业科技, 2002, 31(6): 15-16, 25.
- [32] 李新荣, 肖洪浪, 刘立超, 张景光, 王新平. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响. 中国沙漠, 2005, 25(2): 173-181.
- [33] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [34] 邵颖, 曹四平, 曹文文, 刘长海. 南泥湾湿地退化与管理对土壤动物多样性的影响. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 634-643.
- [35] Pérez-Sánchez A J, Schibalski A, Schröder B, Klimek S, Dauber J. Local and landscape environmental heterogeneity drive ant community structure in temperate seminatural upland grasslands. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(3): e9889.
- [36] Luo X Y, Newman C, Luo Y, Zhou Z M. Comparing ant assemblages and functional groups across urban habitats and seasons in an East Asia monsoon climate area. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 2023, 13(1): 40.
- [37] Andersen A N. The use of ant communities to evaluate change in Australian terrestrial ecosystems: a review and a recipe. *Proceeding of Ecological Society of Australian*, 1990, 16: 347-357.
- [38] Shelef O, Groner E. Linking landscape and species: effect of shrubs on patch preference of beetles in arid and semi-arid ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 960-967.
- [39] 赵晗, 王海燕, 罗鹏, 杜雪, 邹佳何, 符利勇, 雷相东. 微地形对云冷杉阔叶混交林土壤有机碳和全氮的影响. 北京林业大学学报, 2022, 44(8): 88-97.
- [40] Liu R T, Zhu F, Song N P, Yang X G, Chai Y Q. Seasonal distribution and diversity of ground arthropods in microhabitats following a shrub plantation age sequence in desertified steppe. *PLoS One*, 2013, 8(10): e77962.
- [41] 周泓杨, 张丹桔, 张捷, 赵燕波, 赵波, 魏大平, 张健. 马尾松人工林郁闭度对大型土壤动物功能群的影响. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1860-1868.
- [42] 陈蔚, 黄兴科, 刘任涛, 张安宁, 常海涛. 宁夏荒漠草原植物多样性对地面节肢动物功能群多样性的影响. 草地学报, 2019, 27(6): 1587-1595.
- [43] 刘任涛, 朱凡, 贺达汉, 辛明, 徐坤. 草地开垦对土壤动物多样性与功能群结构的影响. 中国草地学报, 2014, 36(6): 34-40.
- [44] 蒯国锋, 刘新民. 沙坡头地区人工植被条件下土壤蜘蛛群落特征的研究. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2004, 33(3): 304-307.
- [45] 刘任涛, 张安宁. 固沙灌丛林营造初期地面节肢动物群落结构特征. 中国沙漠, 2020, 40(5): 190-199.
- [46] Hunter M D, Price P W. Playing chutes and ladders: heterogeneity and the relative roles of bottom-up and top-down forces in natural communities. *Ecology*, 1992, 73(3): 724-732.
- [47] 颜熙, 李文金, 董欢, 周喜, 忠克吉, 周华坤, 卡着才让, 顾智辉, 解乃达才让, 祁金兰, 武啟红, 才让东周. 下行和上行效应对草地植物生产力和多样性影响的研究进展. 兰州大学学报: 自然科学版, 2022, 58(2): 275-284.
- [48] Shi P J, Hui C, Men X Y, Zhao Z H, Ouyang F, Ge F, Jin X S, Cao H F, Li B L. Cascade effects of crop species richness on the diversity of pest insects and their natural enemies. *Science China Life Sciences*, 2014, 57(7): 718-725.