

DOI: 10.20103/j.stxb.202403090478

郭志霞, 刘任涛, 赵文智. 贺兰山东麓荒漠草原地面节肢动物群落结构分布特征. 生态学报, 2025, 45(3): 1472-1485.

Guo Z X, Liu R T, Zhao W Z. Distribution of ground-active arthropod community in a desert steppe ecosystem at eastern foot of Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1472-1485.

贺兰山东麓荒漠草原地面节肢动物群落结构分布特征

郭志霞^{1,2,3}, 刘任涛^{1,2,3,*}, 赵文智^{3,4}

1 宁夏大学林业与草业学院, 银川 750021

2 宁夏大学生态环境学院, 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: 在贺兰山东麓荒漠草原区, 分别在平行山体方向不同空间距离布设 4 个研究样带, 利用陷阱杯诱捕法, 调查了不同空间距离样带节肢动物的群落多样性与功能群分布特征, 阐明了贺兰山山前荒漠草原节肢动物群落结构分布规律及其影响因素。结果表明: (1) 随样带距离增加, 地面节肢动物个体数、Shannon 指数和 Simpson 指数无显著变化, 而总类群数呈显著降低趋势, 降低了 48.31% ($P < 0.05$)。 (2) 随样带距离增加, 捕食性动物类群数和个体数均无显著变化, 而植食性动物类群数和个体数呈逐渐降低趋势 ($P < 0.05$), 分别降低了 66.64% 和 65.38%; 杂食性动物个体数随距离样带未发生显著变化, 而其类群数呈显著降低趋势 ($P < 0.05$), 降低了 16.41%。 (3) 冗余分析 (RDA) 显示, 草本植物密度和土壤有机碳是贺兰山山前荒漠草原地面节肢动物群落分布差异的主要影响因素; PLS-SEM 结果显示, 草本植物密度和丰富度及土壤黏粉粒含量 ($P < 0.05$) 是贺兰山山前荒漠草原地面节肢动物功能群结构分布的主要影响因素。综合分析表明, 远离贺兰山, 土壤理化性质发生变化, 引起荒漠草原植物密度降低, 地面节肢动物类群数分布亦减少, 特别是植食性动物分布愈少, 反映了山前荒漠草原地面节肢动物呈现上行效应的分布规律。

关键词: 贺兰山; 地面节肢动物; 群落组成; 多样性; 功能群

Distribution of ground-active arthropod community in a desert steppe ecosystem at eastern foot of Helan Mountain

GUO Zhixia^{1,2,3}, LIU Rentao^{1,2,3,*}, ZHAO Wenzhi^{3,4}

1 College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

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

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

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

Abstract: In this study, we set 4 study sampling belts paralleled to mountains on the desert steppe at eastern foot of Helan Mountain. The community composition and the biological diversity of ground-active arthropods in the different sampling belts far away from the foot of Helan Mountain were examined by using pitfall trapping method, and the environmental factors was determined. All the results showed that: (1) There were no significant differences in the abundance, Shannon index and Simpson index of ground-active arthropods between the four sampling belts far away from the foot of mountains. However, the group richness of ground-active arthropods was found to indicate a decreasing trend ($P < 0.05$) far away from the foot of

基金项目: 干旱区生态水文宁夏科技创新团队项目 (2021RXTDLX01); 宁夏自然科学基金创新群体项目 (2023AAC01002); 中央引导地方科技发展专项 (2024YDDF0025)

收稿日期: 2024-03-09; **网络出版日期:** 2024-10-21

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

mountains, and it reduced by 48.31% from the first belts (i.e. 0.3 m) to the belts 3 km away. (2) There were no significant differences in the abundance of predatory arthropods between four sampling belts; however, there was a gradual decrease ($P < 0.05$) of the group richness and abundance of herbivorous arthropods alongside the four sampling belts far away from the foot of mountains, and both reduced by 66.64% and 65.38%, respectively from the first belt (i.e., 0.3 m) to the belts 3 km away. Likewise, there was a significantly decreasing trend ($P < 0.05$) of group richness of omnivorous arthropods alongside the four sampling belts far away from the foot of mountains, and it reduced by 16.41% from the first belt (i.e., 0.3 m) to the belts 3 km away, despite no significant changes in the abundance of omnivorous arthropods. (3) The redundancy analysis (RDA) showed that the herbaceous plant density and soil organic carbon ($P < 0.05$) were the key drivers forcing the distribution of ground-active arthropod communities. According to the results of PLS-SEM, the herbaceous plant density and richness and soil clay plus silt content were the key drivers forcing the distribution of trophic structure of ground-active arthropod communities. In conclusion, the decreasing of herbaceous plant density alongside the sampling belts far away from Helan Mountain could result in low richness distribution of ground-active arthropods, particularly with low herbivorous arthropods. It was suggested that there was a bottom-up effects of distance from mountains on the web structure of ground-active arthropod communities in a desert steppe ecosystem at eastern foot of Helan Mountain.

Key Words: Helan Mountains; ground-active arthropods; community composition; diversity; functional groups

贺兰山是我国西北地区一道重要的生态屏障^[1],在维系西北、华北乃至全国的生态安全方面扮演着重要角色^[1-2]。荒漠草原作为贺兰山东麓重要的草地类型,具有丰富的动植物资源和较高的水源涵养能力,是贺兰山区域重要而独特的一部分^[2]。在贺兰山东麓,由于地势变化,导致局部微生境中土壤养分、水分等重新分配^[3],不同地点土壤理化性质和植被特征呈现多样性和差异性^[3-4],表现为明显的空间异质性^[5-6]。由于微地形变化导致的草本植被分布差异,将影响以草本植物为食物来源的地面节肢动物群落组成、多样性分布及功能群发生深刻变化^[7]。地面节肢动物是山前荒漠草原生态系统中土壤节肢动物群落的重要动物类群,扮演着消费者和分解者等关键角色,是构成山前荒漠草原生态系统的关键^[8-9]。因此,研究山前荒漠草原距离山体远近微生境中地面节肢动物多样性变化规律,对于生物多样性保护、荒漠草原生态服务功能维持及管理均具有重要意义。

目前关于山地地面节肢动物群落的研究主要集中在海拔梯度对其的影响。徐帅博等^[10]对山地土壤动物垂直分布的研究结果表明,影响土壤动物群落分布格局的最重要的原因是海拔梯度,不同土壤动物类群对海拔变化的响应不一致。在天山和色季拉山,发现海拔梯度引起气候变化,进而导致植物类型的变化,土壤动物的群落组成和多样性在垂直植被带间呈现明显的差异性,并且,与土壤微环境相比,植物类型和生态环境对土壤动物影响较大^[11-12]。然而,关于山前荒漠草原土壤动物群落分布的研究较少,特别是山前荒漠草原生态系统中距离山体不同土壤环境和植被变化情况下土壤动物组成、多样性和功能群结构分布规律,尚不清楚。

山前荒漠草原生物多样性保护是维持山地生态系统功能稳定性及其响应环境变化的重要措施。开展山前空间距离上荒漠草原土壤动物多样性分布规律研究,对于深入认识山体存在对荒漠草原生物多样性分布的影响及其采取合理的保护措施具有重要作用。本研究选择贺兰山东麓荒漠草原为研究样地,利用陷阱诱捕法,选择不同距离样带,研究地面节肢动物群落组成、多样性分布和功能群结构特征,阐明不同距离样带对节肢动物群落结构的影响规律,旨在为我国山前荒漠草原生态系统生物多样性保护和稳定性维持提供依据。

1 研究区概况

研究区域位于宁夏贺兰山东麓黄旗口冲积扇山前荒漠草原区(图1)(105.85°—106.41°E,38.33°—38.58°N),其地势西高东低,海拔 1183—1258 m。该地区属于大陆性季风气候,干旱少雨,蒸发较强烈,昼夜温差大^[13]。年均气温 8.5℃,年降雨量 180—250 mm,多发生于夏季,年蒸发量约为 2000 mm^[14]。土壤类型包括风沙土、

灰钙土、石砾土等^[15]。受地表径流影响距离山体远近不同位置的土壤理化性质存在较大差异^[16]。

该地区植被覆盖度低,主要植物包括柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、松叶猪毛菜(*Salsola laricifolia*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)和刺旋花(*Convolvulus tragacanthoides*)等^[17]。

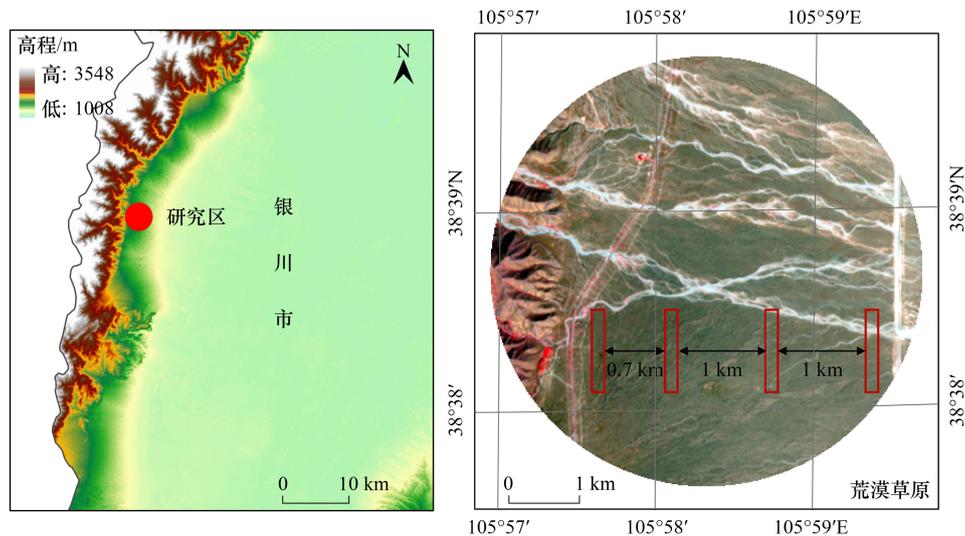


图1 研究区及样带位置

Fig.1 Distribution of the study area and sampling belts

2 研究方法

2.1 试验设计

在垂直山体方向往东,以自然保护区边界为起点,分别在0.3、1、2、3 km处设置4条平行于山体的大样带(图1)。在每个距离样带上布设4个重复样地,样地面积为100 m×100 m。为保证每个重复的相对独立性,样地间距离100 m以上。在每个样地布设4个调查样方,面积5 m×5 m,样方间隔距离10 m以上。共布设样方为:4样带×4样地×4样方=64个。

2.2 土壤样品采集与土壤理化性质测定

在每个样方,按照“M”型,用小铲采集5个土壤样品(深度:0—15 cm)进行混合,得到混合土样1个(共计2 dm³)。采集到的土壤样品,1/4土样用于测定土壤含水量^[18];余下3/4土样置于室内,自然状态下风干至恒重,过2 mm筛^[18]。移除石块、草根和叶片等杂质后,用于土壤理化性质分析^[18]。测定的物理性质:土壤含土壤电导率(EC)、含水量(SM)、土壤粒径组成,土壤化学性质:土壤pH、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)等。测定方法如表1。

2.3 草本植物调查

每个样方中,随机布设3个1 m×1 m小样方,采用样方法调查草本的植被特征:物种数(HR)、个体数(HD;株/m²)、高度(HH; cm)。

2.4 节肢动物调查与标本鉴定

在每个样方中,采用陷阱诱捕法,布设1个陷阱用于动物调查^[20]。方法为:将诱捕器(塑料豆浆杯)杯口与地面齐平(高度10 cm,上表面直径7 cm,下表面直径5 cm)并埋入土壤中;为增加诱捕的有效性,向收集器中加入防冻液。每次野外布设试验时间为14 d。然后,将诱捕到的动物标本于75%的酒精中保存,带回实验室进一步鉴定与统计^[20—21]。采样调查时间为2022年5月1日—14日和8月14日—27日。

动物标本的分类鉴定参考工具书:《中国土壤动物检索图鉴》^[22]、《宁夏贺兰山昆虫》^[24]和《昆虫分

类》^[23]等,并在显微镜(Nikon E200MV)和体视显微镜(Olympus SZX163)下对标本进行鉴定^[20-21],所有动物均鉴定至科。依据土壤动物类群的相对多度可分为3大类:优势类群(DG: >10%),常见类群(CG: 1%—10%),稀有类群(RG: <1%)。根据相关文献,将诱捕到的动物标本依据取食类型分为3个营养功能群:植食性(He)、杂食性(Om)和捕食性(Pr)^[25]。

表 1 土壤理化性质测定指标及测定方法

Table 1 Determination indicators and methods for soil physical and chemical properties

土壤指标 Soil parameters	测定方法 Measurement methods	测试地点 Location
物理性质 Physical property		
土壤电导率/($\mu\text{s}/\text{m}$)	1:5 土水比浸提后,使用便携式电导率仪(雷磁 DDSJ-308F)测定 ^[18]	宁夏大学生态环境学院全球变化与荒漠生态课题组
土壤含水量/%	烘干称重法 ^[18]	
土壤粒径组成/%	采用 Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪测定 ^[18] 据国际制土壤质地分类划分土壤质地:粗砂粒(2—0.25 mm)、细砂(0.25—0.005 mm)、黏粉粒(< 0.05 mm) ^[18] 。	杨凌沃恩生物科技有限公司
化学性质 Chemical property		
土壤有机碳/(g/kg)	采用重铬酸钾氧化外加热法测定 ^[18]	杨凌沃恩生物科技有限公司
土壤全氮/(g/kg)	采用元素分析仪(意大利 DK6,UDK140 分析仪)测定 ^[19]	
土壤全磷/(g/kg)	采用 Na_2CO_3 熔融法测定 ^[18]	
土壤全钾/(g/kg)	采用 Na_2CO_3 熔融法测定 ^[18]	
土壤 pH	1:5 土水比浸提后,使用 PHS-3C 酸度计测定 ^[18]	宁夏大学生态环境学院全球变化与荒漠生态课题组

2.5 数据处理

地面节肢动物群落多样性以类群数、Shannon 多样性指数(H')和 Simpson 指数(C)来表示。计算公式如下:

$$\text{Shannon 多样性指数}(H'): H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$\text{Simpson 指数}(C): C = 1 - \sum P_i^2 \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots, S) \quad (2)$$

式中, $P_i = x_i / \sum x_i$,表示第 i 种土壤动物类群占总个体数的比例, x_i 表示第 i 种类群的个体数^[21]。 S 为物种数; N 为全部种的个体数。

在 R 4.0.3 软件中进行如下统计分析。使用 Shapiro-Wilk 方法对动物群落物种数和个体数进行正态分布和方差齐性检验^[26]。对不符合正态分布的数据进行 $\log(x+1)$ 转换,使其符合或近似符合正态分布^[26-27]。为探究不同距离样带环境因子和地面节肢动物分布的差异性,对环境因子数据和地面节肢动物数据进行单因素方差分析^[27]。Pearson 相关性分析探究随距离样带变化动物优势类群、常见类群和稀有类群的类群数、个体数分别与环境因子间的相关性^[27]。为揭示地面节肢动物随距离样带变化总物种数、个体数和多样性指标的变化特征,采用最小二乘法分析地面节肢动物分布数据并作线形回归图^[27]。该研究使用偏最小二乘法路径建模(PLS-SEM)方法来揭示关键环境因子和土壤动物功能群、多样性指标之间的复杂关系:距离样带、土壤特性、草本植物和土壤动物功能群、多样性指标。距离样带由距贺兰山保护区的距离来表示。为减少模型参数的数量,采用方差膨胀因子分析(variance inflation factor, VIF)除去具有多重共线性(VIF>2)的土壤因子,土壤特性分别由土壤细砂、含水量和黏粉粒(地面节肢动物功能群);土壤有机碳、含水量和粗砂(地面节肢动物多样性)表示。采用 Z-score 将类群数、Shannon 指数和 Simpson 指数合成为一个多样性指数。使用 0.400—1.000 范围内的拟合度(GOF)指数评估模型的稳定性^[25-27]。

采用 Canoco 5 对节肢动物群落及环境因子进行主成分分析(PCA)和除趋势对应分析(DCA)。采用偏 RDA 分析和蒙特卡洛置换检验,评价不同环境因子对动物群落的贡献率^[20]。

3 结果与分析

3.1 不同样带植物与土壤环境因子特征

土壤电导率、有机碳、全氮和细砂含量表现为随样带距离增加均无显著差异(表2)。土壤含水量和 pH 表现为 2 km 处显著高于 0.3 km、1 km 和 3 km 处($P<0.05$)。土壤全磷表现为 3 km 处显著高于 2 km 处($P<0.05$),而与其他 2 个样带无差异。土壤全钾表现为 0.3 km 距离样带处显著高于 2 km 处($P<0.05$),而与其他 2 个样带间无显著差异。土壤黏粉粒表现为 2 km 处显著高于 0.3 km 和 1 km ($P<0.05$),而土壤粗砂粒则与黏粉粒表现相反,表现为 2 km 显著低于其他样带($P<0.05$)。

草本植物丰富度表现为 2 km 处最高($P<0.05$),0.3 km 和 1 km 处居中($P<0.05$),3 km 处最低($P<0.05$)。草本植物密度和高度均表现为 0.3 km>1 km>2 km>3 km 处($P<0.05$)。

表 2 不同样带环境因子特征(平均值±标准误)

Table 2 Environmental parameters in different distance sampling belts (Mean±SE)

环境因子 Environment parameters	贺兰山山前荒漠草原距离样带 Distance sampling belts of desert steppe in front of Helan Mountain/km			
	0.3	1	2	3
pH	0.94±0.00c	0.95±0.01b	0.96±0.00a	0.95±0.00b
粗砂含量 Coarse sand content/%	1.74±0.06a	1.67±0.06a	1.30±0.03b	1.65±0.06a
电导率 Electrical conductivity/($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2.00±0.02	2.02±0.03	2.04±0.00	2.02±0.01
含水量 Moisture content/%	0.47±0.04b	0.51±0.07b	0.87±0.00a	0.55±0.08b
黏粉粒含量 Clay plus silt content/%	1.22±0.15b	1.25±0.16b	1.76±0.01a	1.34±0.18ab
全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)	0.22±0.03	0.21±0.04	0.28±0.02	0.19±0.04
全钾 Soil total kalium/(g/kg)	0.24±0.02a	0.22±0.01ab	0.18±0.00b	0.22±0.01ab
全磷 Soil total phosphorus/(g/kg)	1.45±0.02ab	1.46±0.03ab	1.37±0.00b	1.48±0.03a
细砂含量 Soil fine sand content/%	1.40±0.02	1.48±0.07	1.37±0.04	1.44±0.04
土有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	1.16±0.10	1.14±0.10	1.29±0.04	1.08±0.09
草本植物丰富度 Herb richness	0.90±0.05b	0.89±0.03b	1.08±0.03a	0.64±0.04c
草本植物高度 Herb height/cm	1.59±0.02a	1.48±0.04b	1.40±0.01c	1.38±0.03d
草本植物密度 Herb density/(株/ m^2)	1.19±0.02a	1.07±0.01b	1.03±0.02c	0.67±0.04d

小写字母不同代表不同样带间的差异显著($P<0.05$)

3.2 不同样带地面节肢动物群落组成与数量特征

研究样地共诱捕 1957 只地面节肢动物,隶属于 12 目 30 科(表 3)。在 0.3 km 处,优势类群为拟步甲科(Tenebrionidae)和蚁科(Formicidae)2 类,个体数分别占总诱捕量的 14.34%和 54.96%;常见类群共包含 7 类,占总诱捕量的 24.80%;其余 14 类为稀有类群,占总诱捕量的 5.90%。1 km 处,优势类群为拟步甲科和蚁科 2 类,个体数分别占总诱捕量的 26.58%和 35.52%;常见类群共包含 8 类,占总诱捕量的 32.35%;其他 8 类为稀有类群,占总诱捕量的 5.58%。

2 km 距离样带处,优势类群为拟步甲科、蚁科和步甲科(Carabidae)3 类,个体数分别占总诱捕量的 18.83%、19.08%和 36.39%;常见类群共包含 8 类,占总诱捕量的 23.94%;稀有类群包含卡尔避日蛛科(Karschiidae)、癩蝗科(Pamphagidae)和瓢虫科(Coccinellidae)3 类,占总诱捕量的 1.76%。3 km 处,优势类群为拟步甲科、蚁科和步甲科 3 类,个体数分别占总诱捕量的 12.10%、49.09%和 25.11%;常见类群包含地鳖蠊科(Polyphagidae)、癩蝗科(Pamphagidae)、钳蝎科(Buthidae)和缘蝽科(Coreidae)4 类,占总诱捕量的 11.88%,稀有类群包含象甲科(Curculionidae)和隐翅虫科(Erotylidae)2 类,占总诱捕量的 1.82%。

优势类群的类群数在 0.3 km 和 1 km 处显著低于 2 km 和 3 km 处($P<0.05$);个体数表现为 0.3 km 处最高,3 km 处居中,1 km 和 2 km 处最低($P<0.05$)(表 4)。常见类群的类群数表现为 3 km 处显著低于其他样地($P<0.05$);个体数表现为 0.3 km 处最高,1 km 和 3 km 处居中,2 km 处最低($P<0.05$)。稀有类群的类群数和个体数均表现为 0.3 km 处最高,1 km 处居中,2 km 和 3 km 处最低($P<0.05$)。

表 3 节肢动物群落个体数量及所占比例
Table 3 The abundance and its proportion of arthropods communities

土壤动物类群 Soil fauna groups	贺兰山前荒漠草原距离样带 Sampling belts of desert steppe at the foot of Helan Mountain/km						汇总 Total				
	0.3		2		3						
	个体数 Abundance	相对多度 Relative abundance	个体数 Abundance	相对多度 Relative abundance	个体数 Abundance	相对多度 Relative abundance					
食性 Trophic											
步甲科 Carabidae	Pr	12	++	36	++	74	+++	53	+++	175	++
潮虫科 Oniscidae	Om	6	+							6	+
尺蛾科 Geometridae	Pr			3	+	4	++			7	+
植角蝗科 Gomphoceridae	He	2	+	3	+					5	+
蜻科 Pentatomidae	He	1	+			24	++			25	++
地鳖蠊科 Polyphagidae	Om			3	+					3	+
地蛛科 Atypidae	Pr	14	++			22	++			61	++
盾蝟科 Scutelleridae	He	1	+	7	++					8	+
光盆蛛科 Liocranidae	Pr	2	+	3	+					5	+
卡尔避日蛛科 Karschiidae	Pr					3	+			3	+
叩甲科 Elateridae	Om	4	+	2	+	4	++			12	+
癩蝗科 Pamphagidae	He					2	+			2	+
狼蛛科 Lycosidae	Pr	6	+			6	++			25	++
猎蝽科 Reduviidae	Pr	2	+							2	+
拟步甲科 Tenebrionidae	Om	107	+++	101	+++	75	+++			498	+++
瓢虫科 Coccinellidae	Pr			3	+					3	+
平腹蛛科 Gnaphosidae	Pr	4	+	7	++	2	+			13	+
钳蝎科 Buthidae	Pr	12	++	12	++	8	++			38	++
螳螂科 Mantodea	Pr	2	+							2	+
土蝽科 Cybidae	He	3	+							3	+
网蝽科 Tingidae	He	3	+							3	+
蜈蚣科 Scolopendridae	Pr	9	++	10	++					19	+
象甲科 Curculionidae	He	7	+	5	++	10	++			44	++
肖叶甲科 Eumolpidae	He			1	+					1	+
蟹蛛科 Thomisidae	Pr	1	+							1	+
夜蛾科 Noctuidae	He			2	+					2	+
蚁科 Formicidae	Om	410	+++	135	+++	143	+++			811	+++
异蝽科 Urostylidae	He	36	++							10	+
隐翅虫科 Staphylinidae	Pr	32	++	15	++	6	++			57	++
缘蝽科 Coreidae	He	70	++	32	++	10	++			62	++

He: 植食者 Herbivore; Om: 杂食者 Omnivore; Pr: 捕食者 Predator; “+++”表示优势类群; “++”表示常见类群; “+”表示稀有类群

表 4 优势、常见和稀有类群的类群数和个体数变化特征(平均值±标准误)

Table 4 Changes in richness and abundance of dominant, common, and rare groups of arthropods (Mean±SE)

类群 Groups		贺兰山山前荒漠草原距离样带 Distance sampling belts of desert steppe in front of Helan Mountain/km			
		0.3	1	2	3
优势类群 Dominant groups	类群数	0.48±0.00b	0.48±0.00b	0.60±0.00a	0.63±0.03a
	个体数	2.11±0.01a	1.77±0.02c	1.74±0.01c	1.91±0.01b
常见类群 Common groups	类群数	0.88±0.01a	0.93±0.01a	0.94±0.01a	0.70±0.04b
	个体数	1.67±0.02a	1.19±0.03c	1.38±0.02b	1.13±0.05c
稀有类群 Rare groups	类群数	1.17±0.02a	0.95±0.02b	0.50±0.07c	0.44±0.05c
	个体数	1.06±0.05a	0.75±0.09b	0.38±0.05c	0.46±0.09c

不同小写字母代表不同样带间的差异显著 ($P < 0.05$)

土壤动物群落排序分析结果(图 2)表明,不同距离样带地面节肢动物群落组成存在显著差异。在 PC1 轴上影响群落结构的主要类群是蜈蚣科(Scolopendridae)、隐翅虫科、步甲科和蝽科(Pentatomidae)等,在 PC2 轴上影响群落结构的主要类群是瓢虫科、盾蝽科(Scutelleridae)、地蛛科(Atypidae)和狼蛛科(Lycosidae)等。

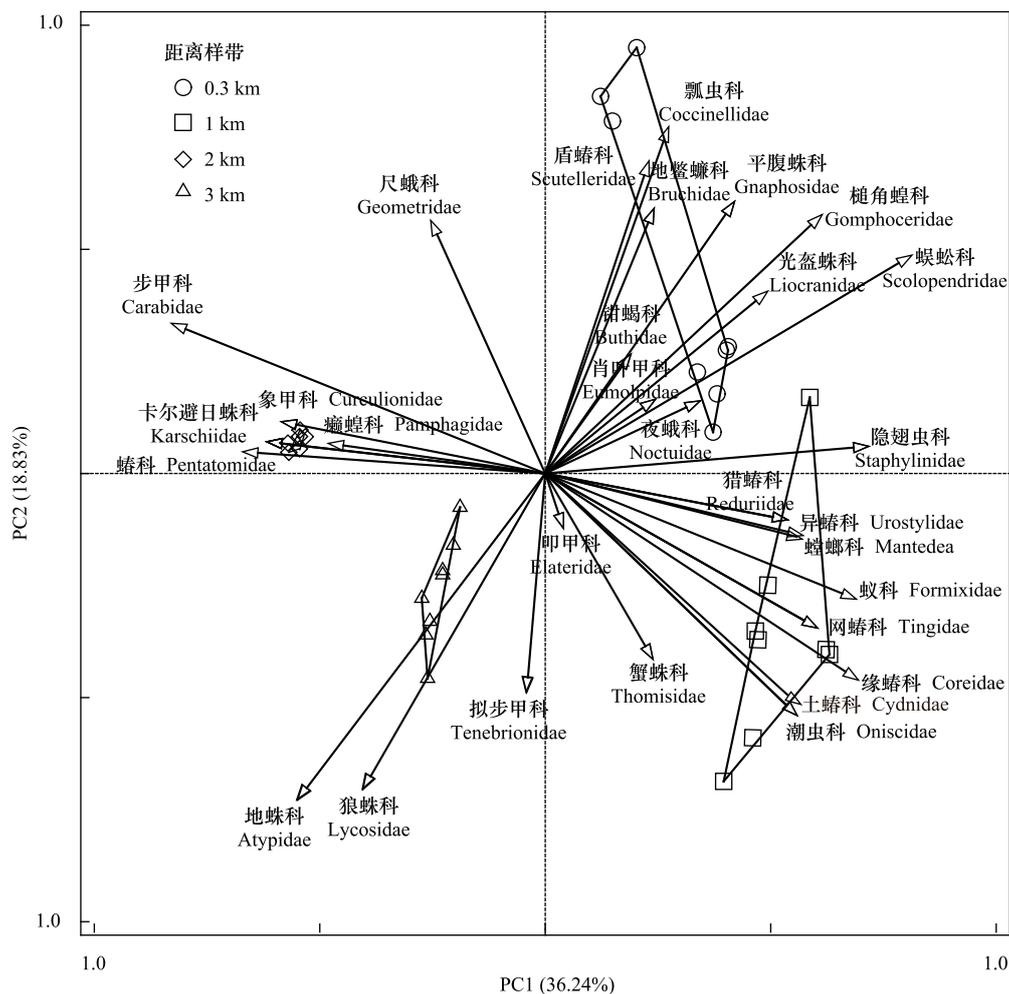


图 2 不同距离样带节肢动物群落结构差异

Fig.2 Differences in community structure of arthropods in different distance sampling belts

3.3 地面节肢动物群落多样性特征

最小二乘法分析的结果表明(图 3),类群数随样带距离增加呈显著降低趋势($R^2 = 0.25, P = 0.004$),而地面节肢动物个体数、Shannon 指数和 Simpson 指数受样带距离增加影响较小($R^2 = 0.03, P = 0.335; R^2 = 0.01, P =$

0.505; $R^2 < 0.01$, $P = 0.829$)。

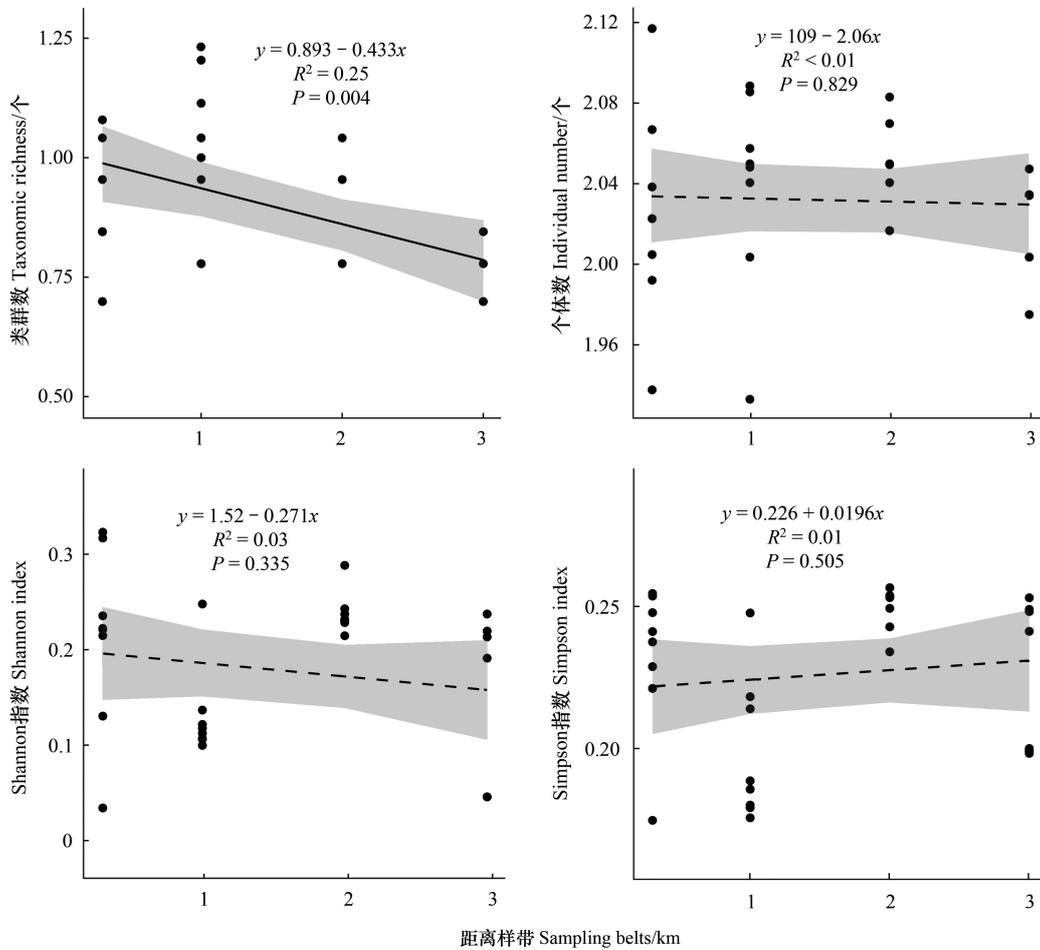


图3 土壤动物多样性变化特征

Fig.3 Changes in group richness, abundance, Shannon index and Simpson index of arthropods

阴影区域显示拟合结果的95%置信区间

3.4 不同样带地面节肢动物群落功能群结构特征

最小二乘法分析的结果表明(图4),植食性动物类群数和个体数随样带距离增加表现为显著降低趋势(类群数: $R^2 = 0.41$, $P < 0.001$; 个体数: $R^2 = 0.14$, $P = 0.043$)。样带距离增加杂食性动物个体数未发生显著变化($R^2 < 0.01$, $P = 0.607$),但类群数随样带距离增加呈显著降低趋势($R^2 = 0.14$, $P = 0.034$)。而随样带距离增加捕食性动物类群数和个体数均未发生显著变化(类群数: $R^2 = 0.03$, $P = 0.310$; 个体数: $R^2 < 0.01$, $P = 0.652$)。

3.5 不同样带地面节肢动物群落组成、功能结构及多样性与环境因子间的相关性

由表5可知,优势类群的类群数与土壤pH、黏粉粒和含水量呈显著正相关($P < 0.01$),与草本高度和土壤粗砂粒呈显著负相关($P < 0.01$);常见类群的类群数与草本密度、高度和丰富度呈显著正相关($P < 0.01$),与土壤全钾呈显著负相关($P < 0.01$);稀有类群类群数与土壤含水量、pH和黏粉粒呈现显著负相关($P < 0.01$),与草本植物高度和土壤粗砂粒呈显著正相关($P < 0.01$)。

优势类群个体数与土壤有机碳、pH、草本植物丰富度($P < 0.05$)和土壤含水量、黏粉粒($P < 0.01$)表现为显著负相关,与土壤全磷含量和粗砂粒表现为显著正相关($P < 0.01$);常见类群个体数与土壤pH表现为显著负相关($P < 0.01$),而与草本丰富度($P < 0.05$)、密度和高度($P < 0.01$)表现为显著正相关;稀有类群个体数与土壤有机碳、pH、含水量、和黏粉粒含量表现为负相关关系($P < 0.01$),而与土壤全磷、粗砂粒含量和草本植物高度表现为显著正相关($P < 0.01$)。

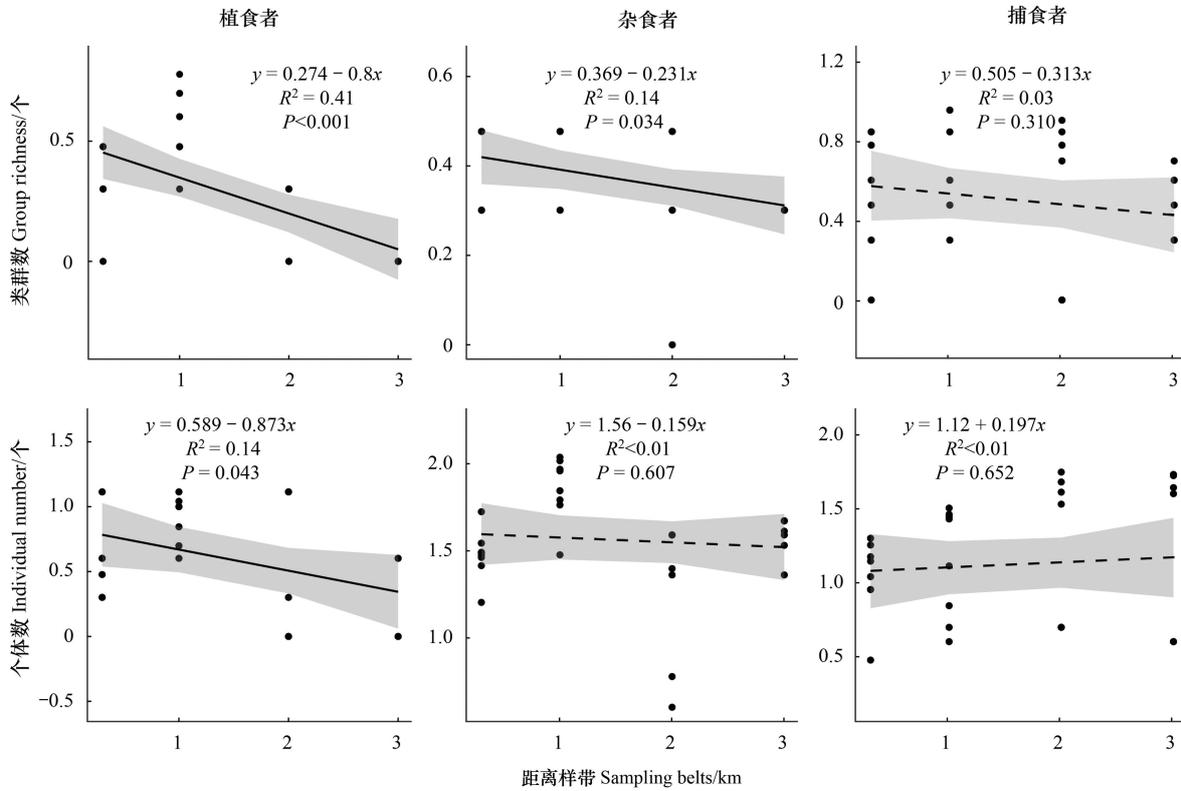


图 4 功能群类群数和个体数

Fig.4 Group richness and abundance of functional groups of arthropods

He: 植食者 Herbivore; Om: 杂食者 Omnivore; Pr: 捕食者 Predator

表 5 优势类群、常见类群和稀有类群的个体数和类群数与环境因子的相关性分析

Table 5 Correlation analysis on the abundance and richness of dominant, common and rare groups of arthropods with environmental factors

环境因子 Environmental parameters	类群数 Group richness			个体数 Individual number		
	DG	CG	RG	DG	CG	RG
HR		0.68 **		-0.36 *	0.36 *	
HD		0.74 **			0.47 **	
HH	-0.64 **	0.80 **	0.59 **		0.72 **	0.48 **
EC			-0.25	-0.44 *		-0.47 **
pH	0.62 **		-0.65 **	-0.41 *	-0.47 **	-0.51 **
SM	0.47 **		-0.55 **	-0.59 **		-0.62 **
SOC						
TN						
TP				0.53 **		0.45 **
TK		-0.50 **				
SP	0.53 **		-0.56 **	-0.54 **		-0.68 **
FS						
CS	-0.51 **		0.59 **	0.60 **		0.69 **

HH: 草本植物高度 Herb height; HR 草本植物丰富度 Herb richness; HD: 草本植物密度 Herb density; pH: 土壤酸碱度 Soil potential of hydrogen; EC: 土壤电导率 Electrical conductivity; SM: 土壤含水量 Soil moisture content; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; TK 土壤全钾 Soil total potassium; TP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; FS: 土壤细砂 Soil fine sand content; SP: 土壤黏粉粒 Soil clay plus silt content; CS: Soil Coarse sand content SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon. DG: 优势类群 Dominant groups; CG: 常见类群 Common groups; RG: 稀有类群 Rare groups; * 或 ** 表示环境因子与类群数和个体数的相关性显著水平达到 $P < 0.05$ 或 0.01

通过对动物类群进行除趋势对应分析(DCA), 结果中显示 DCA 计算的排序轴长度(LGA)为 2.0, 小于 3, 因此选择线形模型的 RDA 分析, 来确定动物群落结构与环境因子之间的关系^[28]。RDA 结果显示(图 5), 第 1、2 主排序轴累计相对方差解释率为 96.39%(分别解释 85.68%、10.71%)。蒙特卡洛检验表明, 环境因子对土壤动物群落指数分布有显著影响(第一排序轴 $F=22.4, P=0.002$; 所有排序轴 $F=12.8, P=0.002$)。草本植物密度和土壤有机碳是影响土壤动物群落分布主要因子(表 6, $P<0.05$), 贡献率: 54.3%和 19.9%。

PLSPM 分析结果(地面节肢动物功能群: $GOF=0.570$, 多样性: $GOF=0.654$), 揭示了距离样带、土壤、草本植物等环境因素之间的直接和间接相互作用, 以及它们对地面节肢动物功能群、多样性的影响(图 6 和表 7—9), 在不同距离样带, 分别解释了地面节肢动物功能群的 70.6%, 而多样性为 63.1%(图 6)。

随距离样带变化, 土壤理化性质(路径系数 = -0.606)对地面节肢动物功能群正向直接显著影响(图 6, 表 7—9; 列出所有相关系数), 并且土壤细砂对地面节肢动物功能群负向影响系数最大(图 6, 表 7—9; 列出所有相关系数), 土壤有机碳对地面节肢动物功能群正向影响系数最大(图 6, 表 7—9; 列出所有相关系数)。土壤理化性质通过对草本植物的影响进而对地面节肢动物功能群具有正向间接显著影响(图 6), 距离样带对地面节肢动物功能群负向影响, 而草本植物对地面节肢动物功能群无显著影响。

随距离样带变化, 仅土壤理化性质(路径系数 = -0.640)对地面节肢动物多样性产生负向直接影响(图 6, 表 7—9; 列出所有相关系数), 并且土壤有机碳对地面节肢动物群落组成负向影响系数最大(表 9)。而草本植物对地面节肢动物多样性无显著影响。

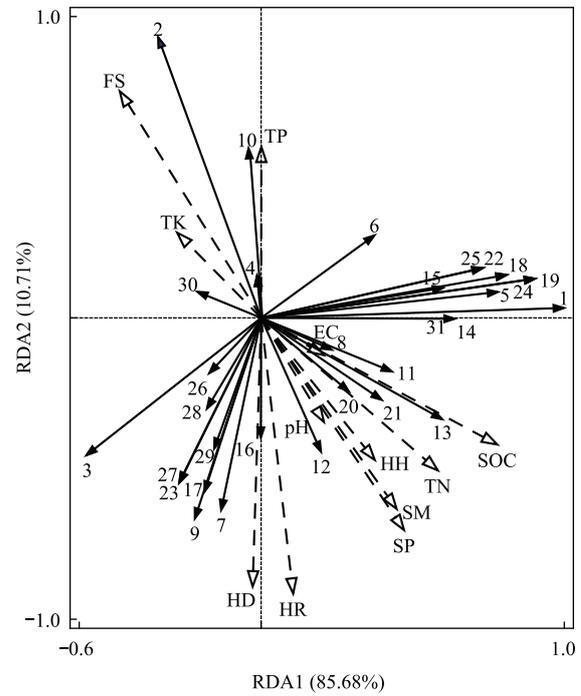


图 5 节肢动物群落分布与土壤环境因子的 RDA 分析
Fig.5 RDA analysis of the arthropod communities and functional groups and environmental parameters

1: 步甲科; 2: 潮虫科; 3: 尺蛾科; 4: 槌角蝗科; 5: 蛭科; 6: 地鳖蠊科; 7: 地蛛科; 8: 盾蝟科; 9: 光螯蛛科; 10: 卡尔避日蛛科; 11: 叩甲科; 12: 癩蝗科; 13 狼蛛科; 14: 猎蝟科; 15: 拟步甲科; 16: 瓢虫科; 17: 平腹蛛科; 18: 钳蝎科; 19: 螳螂科; 20: 土蝟科; 21: 网蝟科; 22: 蜈蚣科; 23: 象甲科; 24: 肖叶甲科; 25: 蟹蛛科; 26: 夜蛾科; 27: 蚁科; 28: 异蝟科; 29: 隐翅虫科; 30: 缘蝟科; SM: 土壤含水量; EC: 土壤电导率; SP: 土壤黏粉粒; FS: 土壤细砂; CS: 土壤粗砂; SOC: 土壤有机碳; TN: 土壤全氮; pH: 土壤酸碱度; TP: 土壤全磷; TK: 土壤全钾; HH: 草本高度; HR: 草本丰富度; HD: 草本密度

表 6 环境因子对节肢动物群落分布和功能群结构的相对贡献率

Table 6 The relative contribution of environmental parameters to arthropod communities and functional groups

环境因子 Environmental parameters	群落结构 Community structure			环境因子 Environmental parameters	群落结构 Community structure		
	贡献率/%	F	P		贡献率/%	F	P
HR	2	2	0.334	SP/%	6.6	4	0.139
HH/cm	2.3	4.2	0.083	TN/(g/kg)	0.9	1.8	0.309
HD/(株/m ²)	19.9	9.8	0.026	TK/(g/kg)	8.2	7.7	0.052
pH	0.7	2.6	0.176	TP/(g/kg)	0.4	1	0.477
EC/(μS/cm)	3.1	4.2	0.104	FS/%	0.7	1.8	0.246
SM/%	0.9	2.2	0.201	SOC/(g/kg)	54.3	16.4	0.026

HH: 草本高度 Herb height; HR 草本丰富度 Herb richness; HD: 草本密度 Herb density; pH: 土壤酸碱度 Soil potential of hydrogen; EC: 土壤电导率 Electrical conductivity; SM: 土壤含水量 Soil moisture content; SP: 土壤黏粉粒 Soil clay plus silt content; TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; TK 土壤全钾 Soil total kalium; TP: 土壤全磷 Soil total phosphorus; FS: 土壤细砂 Soil fine sand content; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon

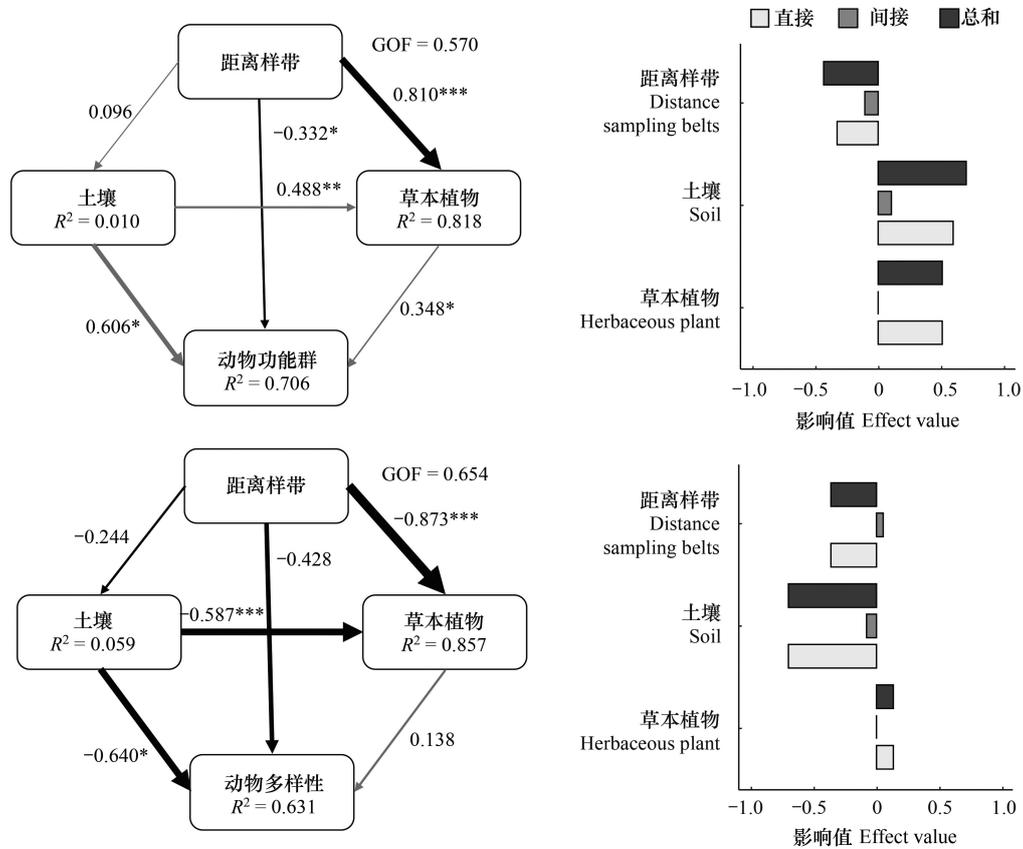


图 6 基于偏最小二乘法路径模拟的距离样带、土壤和草本植物对土壤动物功能群、多样性的直接和间接影响

Fig.6 Direct and indirect effects of distance sampling belts, soil and herbaceous plants on soil fauna functional groups and diversity based on partial least squares path simulations

表 7 图 5 所示 PLS-SPM 模型的最终结果

Table 7 Final results of the PLS-SPM model shown in Fig.5

序号 Serial No.	关系 Relationship	功能群 Functional groups			多样性 Diversity		
		直接 Direct	间接 Indirect	总和 Total	直接 Direct	间接 Indirect	总和 Total
1	距离样带→土壤	0.096	0.000	0.096	-0.244	0.000	-0.244
2	距离样带→草本植物	-0.809	0.047	-0.763	-0.730	0.143	-0.730
3	距离样带→物种组成	-0.332	-0.108	-0.441	-0.373	0.055	-0.373
4	土壤→草本植物	0.488	0.000	0.488	-0.587	0.000	-0.587
5	土壤→物种组成	0.606	0.107	0.712	-0.721	-0.081	-0.721
6	草本植物→物种组成	0.518	0.000	0.518	0.138	0.000	0.138

表 8 PLS-SPM 模型的最终结果

Table 8 Final results of PLS-SPM modeling

	类型 Type	R ²	块共同度	平均冗余度	平均提取的变量量
			Block communality	Mean redundancy	AVE
功能群 Functional groups	距离样带	0.000	1.000	0.000	1.000
	土壤	0.009	0.829	0.008	0.829
	草本植物	0.818	0.774	0.633	0.774
	功能群	0.706	0.351	0.248	0.351
多样性 Diversity	距离样带	0.000	1.000	0.000	1.000
	土壤	0.059	0.866	0.051	0.866
	草本植物	0.857	0.772	0.662	0.772
	多样性	0.631	1.000	0.631	1.000

表 9 观测变量与潜在变量之间的载荷系数

Table 9 Loading coefficients between observed and predicted variables

	潜在变量 Latent variables	观测变量 Observed variables	距离样带 Sample belts	土壤 Soil	草本植物 Herbs	地面节肢动物 Ground-active arthropods
功能群 Functional groups	距离样带	距离样带	1.000	0.096	-0.763	-0.441
	土壤	FS	0.009	-0.971	-0.440	-0.717
		SM	0.335	0.876	0.274	0.468
		SP	-0.075	0.881	0.407	0.624
	草本植物	HD	-0.940	0.136	0.877	0.573
		HR	-0.407	0.581	0.882	0.693
	功能群	He	-0.519	0.527	0.696	0.959
		Om	-0.179	-0.248	-0.056	0.182
		Pr	0.178	0.504	0.163	0.315
多样性 Diversity	距离样带	距离样带	1.000	-0.244	-0.730	-0.373
	土壤	SOC	0.009	0.887	-0.461	-0.588
		SM	0.335	-0.968	0.316	0.552
		CS	-0.331	0.934	-0.281	-0.505
	草本植物	HR	-0.407	-0.609	0.907	0.723
		HD	-0.940	0.020	0.849	0.465
	多样性	多样性	-0.373	-0.588	0.691	1.000

SM: 土壤含水量 Soil moisture content; FS: 土壤细砂 Soil fine sand content; CS: 土壤粗砂; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; HR 草本丰富度 Herb richness; HD: 草本密度 Herb density; He: 植食者 Herbivore; Om: 杂食者 Omnivore; Pr: 捕食者 Predator

4 讨论

4.1 样带距离增加对荒漠草原地面节肢动物群落组成的影响

本研究结果表明,贺兰山前荒漠草原区样带距离增加优势类群的类群数呈显著增加趋势($P<0.05$),主要表现为 2 km 和 3 km 处优势类群均增加了步甲科(表 3)。因为步甲科动物具有较强的移动能力^[29-30],更主要的原因是较 0.3 km 和 1 km 处,2 km 和 3 km 处土壤含水量较高(表 2 和表 5),符合步甲科喜土壤水分较高的地区进行活动^[31]。常见类群和稀有类群的类群数随样带距离增加表现为 3 km 处显著低于其他距离样带($P<0.05$)。一方面这可能与草本植物高度密切相关(表 5),由于常见类群和稀有类群对环境改变的反应十分敏感^[32],在 3 km 处草本植物高度显著低于其他距离样带($P<0.05$)(表 2),会限制不耐高温的土壤动物活动^[33],进而影响到动物的繁殖、发育等生活史过程^[34-35]。另一方面还与蜈蚣科、隐翅虫科、蝽科、瓢虫科、盾蝽科、地蛛科和狼蛛科等分布有关。它们是荒漠草原常见类群和稀有类群的主要物种^[14, 36-37],并且是不同距离样带影响地面节肢动物群落结构的主要类群(图 2),并且蜈蚣科、地蛛科和狼蛛科等地面节肢动物均系喜生活于避光处^[33],而在 3 km 处草本植物密度、丰富度和高度均低于其他样带,为其提供适宜环境面积较其他样带少。因此,在 3 km 处常见类群和稀有类群的类群数均是最低的($P<0.05$)。

优势类群、常见类群和稀有类群的个体数均表现为 0.3 km 处显著高于其他样带($P<0.05$),表现出在土壤 pH 值低的微生境中具有较高的动物个体数分布(表 5),这与大部分的研究结果一致^[38-40]。有研究表明,干旱区弱碱性灰钙土壤中含有较丰富的繁殖质^[41],因而地面节肢动物数量较多。而其他距离样带土壤 pH 值均大于该样地,土壤盐渍化程度较 0.3 km 处大,对地面节肢动物生长发育影响较大^[42]。

4.2 样带距离增加对荒漠草原地面节肢动物多样性分布的影响

地面节肢动物个体数和类群数是反映地面节肢动物群落结构、分布和多样性的重要指标^[43]。地面节肢动物类群数随样带距离增加呈显著降低趋势($P<0.05$),表现出植物密度较高的微生境具有较高的动物类群数分布,这与刘继亮等^[30]在干旱荒漠区中的研究结果相似。刘继亮等^[30]研究发现,植物密度较高时,为不耐

温的动物提供了充足的食物来源与保护^[33],使其类群数较高。说明较高的草本密度对地面节肢动物类群数具有保育作用^[44]。

节肢动物个体数和多样性随距离样带未发生显著变化($P>0.05$)。这可能与土壤有机碳含量密切相关(图6和表9)。该研究区属于荒漠草原区,蒸发强烈、光照资源丰富,并且降雨量低^[13],导致其植被单位面积固碳量很低^[39]。因此土壤有机碳含量随距离样带变化无显著差异,为地面节肢动物生存提供的养分无差异。

4.3 样带距离增加对荒漠草原地面节肢动物功能群结构的影响

土壤动物作为构成土壤食物网的主要组成部分^[45],在调节物质循环过程中起到重要作用^[45]。结构方程模型结果显示草本植物密度和丰富度与植食性、杂食性和捕食性动物均呈显著正相关($P<0.05$),土壤黏粉粒含量与植食性、杂食性和捕食性动物呈显著负相关。表明草本植物密度、丰富度和土壤黏粉粒含量与不同食性地面节肢动物的生存和分布存在密切关系。草本植物密度、丰富度较高和土壤黏粉粒含量较低,因此聚集了较多种类的植食性、杂食性和捕食性地面节肢动物^[46]。已有关于荒漠草原的研究也有类似的结果^[47],草本植物密度较高改善了其周围的微环境^[46],从而决定了动物群落个体数分布特征,进而对动物的功能群组成及其食物网结构的动态变化产生影响^[48-49]。

本研究结果中,样带距离增加杂食性动物个体数无显著变化($P>0.05$),这与土壤细砂有关。杂食性动物含有拟步甲科、蚁科和叩甲科等(表3),它们大部分于土壤中运动,尤其喜欢挖掘活动,均决定于土壤机械组成^[49]。而该研究区细砂土占主要部分^[50],且各距离样带间无显著差异(表2)。因此,杂食性动物挖掘活动受不同距离样带影响差异较小,其活动范围较大,个体数分布无显著差异。

样带距离增加,植食性动物个体数呈显著降低趋势($P<0.05$),同时冗余分析结果表明:草本植物密度与植食性动物呈显著正相关关系。这说明样带距离增加,草本植物密度降低,植食性动物个体数呈显著降低趋势,反映了一种上行控制效应^[51-52]:高营养级受到低营养级的能量控制。这有利于维持荒漠草原生态系统食物网结构稳定性^[30, 53]。而捕食性动物个体数在不同距离样带间无显著变化($P>0.05$)。这说明在山前荒漠草原生境中植食性地面节肢动物个体数对不同植物密度距离样带较捕食性动物敏感。而在宁夏腾格里沙漠生境中发现捕食性动物个体数对不同植物密度的响应较植食性动物敏感^[30]。这说明在不同类型的生态系统中,由于不同节肢动物对环境变化的响应模式不同,进而决定了不同营养级节肢动物的个体数分布^[48]。

5 结论

由土壤理化性质改变引起草本植物分布变化对贺兰山东麓山前荒漠草原地面节肢动物群落结构有深刻影响,草本密度降低,对远离贺兰山的草原生境地地面节肢动物类群数分布亦减少,特别是植食性动物分布愈少,反映了山前荒漠草原地面节肢动物呈现上行效应的分布规律。

参考文献(References):

- [1] 苏闯,张芯毓,马文红,赵利清,梁存柱. 贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释. 山地学报, 2018, 36(5): 699-708.
- [2] 马振山,任振强. 西北地区的生态屏障——贺兰山国家级自然保护区. 内蒙古林业, 2007(3): 18.
- [3] Raulings E J, Morris K, Roache M C, Boon P I. The importance of water regimes operating at small spatial scales for the diversity and structure of wetland vegetation. *Freshwater Biology*, 2010, 55(3): 701-715.
- [4] 董云龙,张德罡,陈建纲,花立民,胡新振. 东祁连山高寒草地不同生境条件下植物群落结构特征及多样性比较——以甘肃省天祝抓喜秀龙乡为例. 草地学报, 2014, 22(3): 481-487.
- [5] 赵明松,李德成,张甘霖,等. 江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征——以安徽省定远县为例. 土壤, 2016, 48(4): 762-768.
- [6] 汝海丽,张海东,焦峰,薛超玉,郭美丽. 黄土丘陵区微地形条件下草本群落特征与土壤水分及养分关系分析. 草地学报, 2016, 24(4): 776-782.
- [7] 王意锟,吕耀平,丁枫华,陈祯,雷凌华,邓先俊,刘瑞瑜,宋强根. 城市绿地土壤动物群落结构与土壤理化性质的关系. 东北林业大学学报, 2022, 50(1): 72-76.
- [8] 孙彩彩,董全民,杨晓霞,冯斌,时光,吕卫东. 牦牛和藏羊放牧对青藏高原高寒草甸土壤节肢动物群落的影响. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3127-3134.
- [9] 臧建成,孙涛,洪大伟,杨小林. 拉萨半干旱河谷植被对地表节肢动物多样性的影响. 生态学报, 2018, 38(22): 8205-8212.
- [10] 徐帅博,李艳红,朱连奇,李理. 山地土壤动物群落垂直分布格局研究进展. 河南大学学报:自然科学版, 2020, 50(1): 19-28.
- [11] 刘淑琪,崔东,刘文新,孜尼哈尔·祖努尼江,黄菊英,刘璇,吕立琴,武玉鑫. 新疆西天山雪岭云杉林不同海拔高度大型土壤动物群落

- 结构特征. 土壤通报, 2023, 54(5): 1117-1127.
- [12] Yin X Q, Qiu L L, Jiang Y F, Wang Y Q. Diversity and spatial-temporal distribution of soil macrofauna communities along elevation in the Changbai Mountain, China. *Environmental Entomology*, 2017, 46(3): 454-459.
- [13] 赵娜, 沈爱红, 石云, 余洁, 张凤红, 郭瑞, 吴涛, 李建华, 朱晓雯, 李红霞. 贺兰山东麓冲积扇区不同微地形土壤理化性质及酶活性特征. *西南农业学报*, 2023, 36(11): 2451-2463.
- [14] 袁鹏, 王敏, 王源, 杨贵军. 贺兰山冲积扇荒漠草地地表甲虫种间关联和群落稳定性. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 741-749.
- [15] 杨贵军, 王源, 王敏, 贾龙. 贺兰山冲积扇荒漠草地拟步甲生态位及种间关联. *昆虫学报*, 2021, 64(7): 840-850.
- [16] 范世香, 韩绍文. 地面坡度对地表径流影响的实验研究. *水土保持通报*, 1991, 11(4): 6-10.
- [17] 杨贵军, 王源, 王敏. 贺兰山冲积扇荒漠草地拟步甲群落小尺度空间格局动态. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1461-1470.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Su Y Z, Zhao H L, Zhao W Z, Zhang T H. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma*, 2004, 122(1): 43-49.
- [20] 常海涛, 刘任涛, 陈蔚, 张安宁, 左小安. 内蒙古乌拉特荒漠草原红砂灌丛引入柠条后地面节肢动物群落结构分布特征. *草业学报*, 2020, 29(12): 188-197.
- [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] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [23] 王新谱, 杨贵军. 宁夏贺兰山昆虫. 银川: 宁夏人民出版社, 2010.
- [24] 朱永恒, 赵春雨, 王宗英, 濮励杰. 我国土壤动物群落生态学研究综述. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1477-1481.
- [25] 叶国辉, 楚彬, 胡桂馨, 张飞宇, 华铄泽, 周富斐, 牛钰杰, 唐庄生, 花立民. 高原鼯鼠干扰强度对祁连山东段高寒草甸大型土壤动物功能群特征及空间分布的影响. *生态学报*, 2022, 42(3): 1088-1097.
- [26] 朱登杰. 双因素方差分析在人体运动干预实验结果分析中的应用. 第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编, 2019, 5775-5777.
- [27] 周磊, 刘任涛, 曾飞越. 腾格里沙漠东南缘固沙植被区蚁丘对中小型土壤节肢动物群落的影响. *生态学报*, 2024. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202402290419>.
- [28] 徐帅博. 宝天曼自然保护区中小型土壤动物群落时空动态及其影响因素研究. 郑州: 河南大学, 2020.
- [29] 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(5): 536.
- [30] 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.
- [31] 王杰. 贺兰山步甲昆虫区系组成、物种多样性及空间分布格局. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [32] 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.
- [33] Hering R, Hauptfleisch M, Geißler K, Marquart A, Schoenen M, Blaum N. Shrub encroachment is not always land degradation: Insights from ground-dwelling beetle species niches along a shrub cover gradient in a semi - arid Namibian savanna. *Land degradation & development*, 2019, 30(1): 14-24.
- [34] 张安宁, 刘任涛, 刘佳楠, 赵娟, 常海涛, 陈蔚. 干旱风沙区柠条枯落物对土壤节肢动物群落的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2383-2391.
- [35] 刘任涛, 郝伟华, 朱凡. 宁夏荒漠草原地面节肢动物群落组成及季节动态特征. *草业学报*, 2016, 25(6): 126-135.
- [36] 王敏, 李欣芸, 杨益春, 杨贵军. 贺兰山地表甲虫群落多样性及其与环境因子的相关性. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(4): 154-161.
- [37] 杨贵军, 王敏, 杨益春, 李欣芸, 王新谱. 贺兰山甲虫物种丰富度分布格局及其环境解释. *生物多样性*, 2019, 27(12): 1309-1319.
- [38] 闫江超, 崔东, 吕立琴, 江智诚, 张敏如, 刘江慧, 曹敬, 王莉莉. 西天山自然保护区森林-草原交错带土壤动物群落分布特征. *生态学杂志*, 2024. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240124.1721.008.html>.
- [39] 陈乐, 张福平, 司建华, 冯起, 魏永芬. 贺兰山地区植被固碳功能空间分异特征及其驱动因素. *生态学报*, 2023, 43(24): 10250-10262.
- [40] 张建英, 杨贵军, 于有志. 银北盐碱地土壤动物多样性与土壤因子的相关性. *西北农业学报*, 2012, 21(7): 177-184.
- [41] 彭康, 张飞飞, 邵志东, 张芳. 新疆奇台绿洲不同耕作年限荒漠灰钙土无机碳变化及其影响因素. *农业环境科学学报*, 2024, 43(1): 91-101.
- [42] 邱丽丽, 刘静, 付关强, 薛文丽. 长岭草原不同盐碱地大型土壤动物的多样性. *贵州农业科学*, 2014, 42(10): 234-239.
- [43] 刘鹏飞, 红梅, 美丽, 德海山, 白雪原, 李志新, 马玺. 玉米秸秆还田量对黑土区农田地面节肢动物群落的影响. *生态学报*, 2019, 39(1): 235-243.
- [44] 李锋瑞, 刘继亮, 化伟, 牛瑞雪, 刘七军, 刘长安. 地面节肢动物营养类群对土地覆被变化和管理扰动的响应. *生态学报*, 2011, 31(15): 4169-4181.
- [45] 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.
- [46] 杨贵军, 贾彦霞, 王新谱, 张大治. 苜蓿-荒漠草地交错带步甲昆虫多样性. *环境昆虫学报*, 2015, 37(3): 483-491.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 赵小鲁, 谢炳庚. 动物生态地理研究: 陈鹏教授等论文集. 成都: 成都地图出版社, 1996.
- [50] 李亚园. 贺兰山不同海拔凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征及其关系研究. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.