

DOI: 10.20103/j.stxb.202312082678

杨敏,刘任涛,方进,郭志霞,赵璇,周磊.腾格里沙漠固沙植被区土壤质地对地面节肢动物功能群结构的影响.生态学报,2025,45(6):2723-2732.
Yang M, Liu R T, Fang J, Guo Z X, Zhao X, Zhou L. Effect of soil texture on functional group structure of ground-active arthropods in sand-fixing revegetated area of Tengger Desert. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2723-2732.

腾格里沙漠固沙植被区土壤质地对地面节肢动物功能群结构的影响

杨 敏^{1,2,3}, 刘任涛^{1,2,3,*}, 方 进^{1,2,3}, 郭志霞⁴, 赵 璇^{1,2,3}, 周 磊⁴

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 宁夏大学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 宁夏大学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 宁夏大学林草学院, 银川 750021

摘要:土壤质地是固沙植被区土壤生境恢复的重要标志。研究土壤质地对地面节肢动物功能群结构的影响,对于解析固沙植被区生物群落营养级结构恢复与生态系统稳定性具有重要意义。选择腾格里沙漠东南缘固沙植被区,依据土壤质地设置3种处理样地(S,只含有砂粒;SS,含有砂粒和粉粒;SSC,含有砂粒、粉粒和黏粒),采用陷阱诱捕法调查了不同样地的地面节肢动物功能群分布特征,阐明了土壤质地演变对固沙植被区地面节肢动物功能群多样性的影响规律。结果表明:(1)研究区地面节肢动物功能群包括捕食性、植食性、杂食性和腐食性动物,其中植食性和杂食性动物个体数占据优势地位。(2)随土壤质地细化,捕食性与植食性动物个体数呈相反变化趋势,前者先降低后增加,而后者则为先增加后降低;但杂食性动物个体数呈增加趋势。(3)捕食性、植食性和杂食性动物的类群数和 Shannon-Wiener 多样性指数均表现为 SSC 显著高于 SS 和 S。具体表现为:与 S 和 SS 样地相比,SSC 样地的捕食性、植食性和杂食性动物的类群数分别增加了 0.70—3.95 倍、0.45—1.23 倍和 0.50—1.33 倍;其 Shannon-Wiener 指数分别增加了 1.32—6.43 倍、0.81—1.59 倍和 10 倍以上。(4)结构方程模型显示,总体上土壤质地对地面节肢动物功能群多样性分布产生正效应。表现为:土壤质地既可对捕食性动物的类群数产生直接影响,亦可通过影响土壤理化性质而对其产生间接影响;土壤质地对植食性动物类群数的影响是通过草本植物的间接作用;土壤质地对杂食性动物类群数的影响则是通过土壤理化性质产生间接作用。研究表明,随着固沙植被区土壤质地细化、土壤条件改善和草本植物增加,地面节肢动物营养级功能群的多样性增加,有利于食物链延长和稳定,并且捕食性动物亦可调控植食性动物分布,表征了上行-下行效应营养级关系。

关键词:腾格里沙漠;土壤质地;地面节肢动物;功能群结构;固沙植被区

Effect of soil texture on functional group structure of ground-active arthropods in sand-fixing revegetated area of Tengger Desert

YANG Min^{1,2,3}, LIU Rentao^{1,2,3,*}, FANG Jin^{1,2,3}, GUO Zhixia⁴, ZHAO Xuan^{1,2,3}, ZHOU Lei⁴

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

基金项目:国家自然科学基金项目(32360318);宁夏自然科学基金创新群体项目(2023AAC01002);干旱区生态水文宁夏科技创新团队项目(2021RXTDLX01);中央引导地方科技发展专项(2024FRD05049)

收稿日期:2023-12-08; 采用日期:2025-01-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxuli2012@126.com

Abstract: Soil texture is a keystone of soil condition restoration for revegetated areas. The effects of soil texture on trophic structure of ground-active arthropods have implications for the recovery of trophic structure and food-web stability of revegetated areas. In the southeastern Tengger Desert, three treatment sites were setup based on soil texture including S (only sand soils), SS (sand and silt soil), and SSC (sand, silt and clay soil). The ground-active arthropods were examined using pitfall trapping method, and the functional groups were clarified based on their feeding traits. The objectives of the present study were to probe into the effects of soil texture on trophic structure and its diversity in revegetated areas. The results showed that: (1) The ground-active arthropods included four functional groups: predatory, herbivorous, omnivorous and saproverous arthropods. On the basis of arthropod abundance, herbivorous and omnivorous arthropods dominated the present ground-active arthropod communities. (2) With the improvement of soil texture, the abundance of predatory arthropods decreased first and then increased, whereas the abundance of herbivorous arthropods increased first and then decreased, and the abundance of omnivorous arthropods showed an increasing trend. (3) The group richness of predatory, herbivorous and omnivorous arthropods and their Shannon-Wiener diversity index were found to be significantly greater in SSC than in SS and S. The group richness of predatory, herbivorous and omnivorous arthropods was found to increase by 0.70—3.95, 0.45—1.23, and 0.50—1.33, respectively from S and SS to SSC. The Shannon-wiener diversity index of predatory, herbivorous and omnivorous arthropods was found to increase by 1.32—6.43, 0.81—1.59, and 10 times more, respectively from S and SS to SSC. (4) From the results of structural equation modes (SEM), there were facilitative effects of soil texture on the diversity of functional groups along succession. The improvement of soil texture indicated not only a direct effect on the group richness of predator arthropods, and but also an indirect effect through the improvement of soil physical-chemical properties. With regard to the group richness of herbivorous arthropods, there was an indirect effects of soil texture through herbaceous performances; With regard to the group richness of omnivorous arthropods, there was an indirect effects of soil texture through soil physical-chemical properties. In conclusion, the improvement of soil properties and herbaceous performances under finer soil texture would enhance the diversity of functional groups including omnivorous and saproverous arthropods in addition to predators and herbivorous arthropods in revegetated areas. Therefore, the diversity increase of trophic groups would be beneficial for lengthening the food chain within ground-active arthropods and thus the stability. Furthermore, there was predatory pressure on herbivorous arthropods by predators in the finest soil texture containing great soil clay plus silt; it was suggested that there were a reflective of bottom-up or top-down effects between functional groups of predators and herbivores within ground-active arthropod trophic structure.

Key Words: Tengger Desert; soil texture; ground-active arthropods; trophic structure; revegetated area

在腾格里沙漠东南缘开展人工固沙灌木种植,是控制沙漠化发展的有效生态措施^[1]。研究表明,固沙灌木种植可以增加地面粗糙度、降低近地表风速,使流动沙地得以固定,土壤质地表现出随植被恢复时间延长而向细粒化发展的特征^[2]。土壤质地通常表征为土壤中砂粒、粉粒和黏粒的相对比例,是影响许多重要土壤物理、化学和生物特性的关键土壤属性^[3],可以改变土壤的理化性质、养分情况和植物群落特征^[4]。这些土壤环境的改变影响了土壤动物的栖居环境和食物资源,从而影响土壤动物的分布^[5]。董炜华等^[6]研究表明,干旱区绿洲农田开垦年限不同的土壤质地变化是影响土壤动物群落分布的重要影响因素之一。Liu 等^[7]研究表明,土壤类型不同导致的土壤质地差异对灌木微生境中地面节肢动物丰度有显著影响,而对其多样性分布影响较小。综合分析表明,土壤质地发生改变显著影响土壤动物的存活、个体数量分布及其多样性^[5-7]。但是,关于土壤质地对土壤动物功能群结构的影响规律,尚不清楚,这直接关系到环境条件改变而导致的土壤质地变化对土壤动物营养级结构与食物网的影响。

地面节肢动物是土壤动物的主要类群,是陆地食物网的重要参与者^[8],主要通过各个功能群间的食物网关系发挥其生态作用。利用地面节肢动物功能群可以简化荒漠生态系统的食物网^[9],从而表征地面节肢动物的营养级结构。目前,关于土壤动物功能群的研究大多集中在放牧干扰和季节变化等因素对其产生的影响^[9-10]。如,刘任涛等^[9]研究发现放牧干扰退化草地在封育条件下,地面节肢动物植食性和捕食性动物的多

样性增加,而腐食性节肢动物个体数量减少,生物量降低。白燕娇等^[10]在宁夏干旱绿洲枸杞地中发现,随着季节更替宁夏干旱绿洲区枸杞林地地面节肢动物的功能群组成差异较大,而功能多样性差异较小。但是也有研究表明,土壤类型引起的土壤质地改变(例如砂土或砂壤土)对捕食性和植食性动物丰度和丰富度无显著影响^[7]。因而,在干旱荒漠固沙植被区,土壤质地如何影响地面节肢动物功能群结构和多样性分布尚未可知,需要值得深入研究。

基于此,以腾格里沙漠东南缘固沙植被区为研究样地,依据前期土壤调查确定的土壤颗粒组成情况,设置砂粒、砂粒和粉粒、砂粒、粉粒和黏粒 3 种土壤质地样地,采用陷阱诱捕法调查地面节肢动物功能群分布特征,旨在阐明土壤质地对固沙植被区地面节肢动物功能群组成、数量分布及其多样性的影响规律,有助于从土壤质地的角度了解固沙植被区地面活动节肢动物功能群结构分布特征,为腾格里沙漠固沙植被区生物多样性保护和生态系统结构与功能恢复提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区中卫市沙坡头区腾格里沙漠东南缘固沙植被区(37°25′—37°30′N,104°43′—105°02′E;海拔约 1339 m)。该区属于温带大陆性气候,干旱而多风、日照充足、冷热温差大、风沙活动较频繁^[1]。年均气温 9.6℃;年均降水量 186 mm,降水主要集中于 7—9 月;年均风速 2.9 m/s,年均沙尘天数达到 59 d。该区分布有格状新月形沙丘,由西北向东南倾斜,且呈阶梯状分布。

固沙植被区的建立使以流动沙地为主的沙漠景观逐渐演变为复杂的人工-天然荒漠生态系统,演替过程中由于有机残体累积、生物作用等,加速了土壤的演替,改善了土壤条件和土壤质地^[11]。植物群落由花棒(*Hedysarum scoparium*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinski*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)等灌木半灌木组成为主,逐渐演变到以雾冰藜(*Bassia dasphylla*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)等一年生草本层逐渐占优势的复杂植物群落。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

于 2021 年,在腾格里沙漠东南缘人工固沙植被区,依据前期土壤调查结果,确定研究区土壤颗粒组成情况,设置 3 种土壤质地类型为研究样地(表 1),即:(1)S,只含有土壤砂粒;(2)SS,含有土壤砂粒和土壤粉粒;(3)SSC,含有土壤砂粒、土壤粉粒和土壤黏粒。每种土壤质地类型样地设置 6 个重复,每个重复样地的面积为 30 m×30 m,间距为 0.5—1 km;共有 18 个样地(3 处理×6 重复)。该试验于 2021 年 5 月、7 月和 9 月进行,分别代表春、夏、秋季。

表 1 不同土壤质地固沙植被区土壤颗粒占比

Table 1 Proportion of soil particles in different soil texture in sand-fixing revegetated area

样地 Site	土壤黏粒/% Soil clay	土壤粉粒/% Soil silt	土壤砂粒/% Soil sand
S	0.00±0.00b	0.00±0.00b	100.00±0.00a
SS	0.00±0.00b	0.84±0.17b	99.16±0.17a
SSC	1.99±0.44a	10.49±1.99a	87.52±2.38b

同列不同字母表示存在显著差异($P<0.05$); S: 只含有土壤砂粒 soil sand alone; SS: 含有土壤砂粒和土壤粉粒 soil sand plus soil silt; SSC: 含有土壤砂粒、土壤粉粒和土壤黏粒 soil clay and silt plus soil sand

1.2.2 草本植物调查

在每个重复样地中心位置,随机设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方(距离 5 m 左右),用样方法,统计每个样方中草本植物的个体数(株/m²)和物种数,同时用卷尺测定植物高度(cm)。共调查样方 162 个,即 3 处理×6 重复×3 样方/样地×3 季节。

1.2.3 地面节肢动物调查与鉴定

在每个重复样地中心位置,随机布设 4 个陷阱杯(规格:上、下表面直径分别为 9 cm 和 5 cm,高度为 10 cm),杯口与地面平齐,间隔 10 m 以上,进行地面节肢动物调查。在陷阱杯中加入防冻液和酒精的混合液,以增加诱捕的有效性。

将收集到的地面节肢动物保存于西林瓶中,并倒入 75%酒精,保证动物标本的完整性和后续鉴定。采用体式显微镜对地面节肢动物进行计数和分类鉴定,并参照《中国土壤动物检索图鉴》^[12] 鉴定到目和科水平。根据取食类型,将地面节肢动物划分为捕食性、植食性、杂食性和腐食性 4 个功能群^[9-10]。按照个体数占总个体数的百分比,将地面节肢动物划分为优势类群($\geq 10\%$)、常见类群(1%—10%)和稀有类群($\leq 1\%$)^[13]。

1.2.4 土壤样品的采集及理化性质测定

在重复样地的每个陷阱杯旁取 1 份 0—10 cm 表层土,然后将 4 份土样进行混合,得到 1 份混合样品,装入自封袋带回实验室。

首先,取一部分鲜土,采用烘干称量法测定土壤含水量(%)。然后,将剩余土壤样品进行自然阴干处理,过 2 mm 筛后,进行土壤理化性质的测定。

土壤 pH 和电导率均按水土比为 5:1 浸提后进行测定。土壤粒径组成采用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪进行测定。土壤有机碳(g/kg)采用重铬酸钾容量法(外加热法)进行测定。土壤全氮(g/kg)采用半微量开氏法进行测定。

1.2.5 数据处理

统计地面节肢动物每个功能群的个体数、类群数,用 R 的 vegan 包对不同食性地地面节肢动物的 Shannon-Wiener 指数进行计算。由于本研究中腐食性类群只包含粪金龟科 1 个类群,且数量极少,故主要对植食性、捕食性和杂食性类群的个体数及多样性指数进行分析。计算公式如下:

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

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

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。

利用 SPSS Statistics 26 对 3 个样地土壤、植被和地面节肢动物的数据分别进行处理。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)来比较不同处理数据组间的差异。采用 Pearson 相关性分析地面节肢动物功能群结构及多样性指数特征与环境因子间的相关关系^[23]。使用偏最小二乘法路径建模(PLS-SEM)方法来揭示土壤质地、土壤和草本对地面节肢动物多样性之间的直接和间接影响。采用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

由表 2 可知,土壤有机碳和土壤电导率均表现为 SSC(即含粘粉粒的土壤质地)显著高于 SS(即含粉粒的土壤质地)和 S(仅含沙粒的土壤质地),且 SS 显著高于 S($P < 0.05$)。土壤全氮表现为 SSC 显著高于 SS 和 S($P < 0.05$),而 SS 与 S 之间无显著差异。但是,3 种质地样地间土壤含水量和土壤 pH 无显著差异($P > 0.05$)。说明随着土壤质地变细,土壤电导率、土壤有机碳和全氮含量逐渐增加,尤其是土壤有机碳和土壤电导率的变化更为显著。

草本植物密度、高度和丰富度均表现为 SSC 和 SS 显著高于 S($P < 0.05$),而 SSC 和 SS 之间无显著差异。说明沙地土壤质地一旦土壤粉粒增加,草本植物群落就会发生深刻变化,植物多样性增加,生长情况向好。

2.2 地面节肢动物功能群种类组成

由表 3 可知,本次试验共捕获捕食性、植食性、杂食性和腐食性 4 种功能类群。捕食性动物共捕获 1306 只,属 12 个类群,其个体数占总个体数的 18.14%。植食性动物共捕获 2788 只,属 9 个类群,其个体数占总个体数的 38.72%。杂食性动物共捕获 3102 只,属 2 个类群,其个体数占总个体数的 43.08%。腐食性动物共捕

获 5 只,仅属 1 个类群,其个体数占总个体数的 0.07%。从个体数所占比例来看,植食性和杂食性动物占据绝对优势地位。

表 2 不同土壤质地固沙植被区土壤理化性质及植被特征(平均值±标准误)

Table 2 Soil properties and vegetation characteristics in different soil texture in sand-fixing revegetated area (Mean±SE)			
土壤理化性质 Soil properties	S	SS	SSC
土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	0.63±0.04c	0.99±0.07b	2.85±0.37a
土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)	0.04±0.00b	0.06±0.00b	0.16±0.02a
土壤 pH Soil pH	7.62±0.05a	7.79±0.04a	7.74±0.04a
土壤电导率 Soil electrical conductivity/(μS/cm)	56.83±1.36c	63.82±1.79b	75.83±2.44a
土壤含水量 Soil moisture/%	1.12±0.25a	1.76±0.33a	1.88±0.43a
草本植物密度 Herbaceous density/(株/m ²)	1.53±0.31b	4.99±0.43a	5.30±0.81a
草本植物高度 Herbaceous height/cm	11.48±1.84b	19.67±1.50a	19.11±1.80a
草本植物丰富度 Herbaceous richness	2.33±0.44b	4.33±0.26a	4.94±0.46a

同行不同字母表示存在显著差异(P<0.05)

表 3 地面节肢动物群落组成及相对多度

Table 3 Community composition of ground-active arthropods communities and its relative abundance						
动物类群 Faunal group		S		SS	SSC	总和 Total
目 Order	科 Family	食性 Trophic	相对多度 Relative abundance	相对多度 Relative abundance	相对多度 Relative abundance	相对多度 Relative abundance
蜘蛛目 Araneida	管巢蛛科 Clubionidae	Pr			0.14	0.06
	平腹蛛科 Gnaphosidae	Pr	0.09	1.91	1.52	1.47
	光盆蛛科 Lioceranidae	Pr	0.37	0.1	2.03	0.93
	狼蛛科 Lycosidae	Pr		0.03	0.1	0.06
	逍遥蛛科 Philodromidae	Pr		0.03	0.17	0.08
	跳蛛科 Salticidae	Pr	0.18	0.03	0.24	0.14
	蟹蛛科 Thomisidae	Pr	0.09	0.1	0.2	0.14
鞘翅目 Coleoptera	吉丁甲科 Buprestidae	He			0.03	0.01
	步甲科 Carabidae	Pr	34.8	6.48	7.26	11.1
	花金龟科 Cetoniidae	He			0.03	0.01
	叶甲科 Chrysomelidae	He			1.45	0.6
	叶甲科幼虫 Chrysomelidae larva	He			1.22	0.5
	鞘翅目幼虫 Coleoptera larva	He		0.03	0.03	0.03
	象甲科 Curculionidae	He		0.16	0.24	0.17
	粪金龟科 Geotrupidae	Sa			0.17	0.07
	阎甲科 Histeridae	Pr		0.03		0.01
	鳃金龟科 Melolonthidae	He	3.21	0.03		0.5
	拟步甲科 Tenebrionidae	He	23.44	11.82	26.17	19.48
	膜翅目 Hymenoptera		36.63	39.83	46.44	42.06
膜翅目 Hymenoptera	蚁科 Formicidae	Om				
等足目 Isopoda	潮虫科 Oniscidae	Om			2.47	1.01
鳞翅目 Lepidoptera	毒蛾科幼虫 Lymantriidae larva	He	1.19	39.42		17.41
盲蛛目 Opiliones	长奇盲蛛科 Opilionidae	Pr			6.21	2.56
蝎目 Scorpiones	钳蝎科 Buthidae	Pr			3.24	1.33
蚰蜒目 Scutigermorpha	蚰蜒科 Scutigerae	Pr			0.64	0.26

Pr:捕食者 predator;He:植食者 herbivore;Om:杂食者 omnivore;Sa:腐食者 saprophage

流动沙地(即以沙粒为主要成分的土壤质地,S)出现的优势类群包括植食性动物如拟步甲科、杂食性动物如蚁科、捕食性动物如步甲科。在以粉粒为主要成分的土壤质地中(即 SS),优势类群除植食性动物如拟步

甲科、杂食性动物如蚁科外,还包括植食性动物如害虫毒蛾科幼虫。在粘粉粒含量较高的土壤质地中(即 SSC),捕食性、植食性、杂食性动物的个体数和类群数均较多,且开始出现腐食性动物。

2.3 地面节肢动物功能群个体数、多样性指数特征

由图 1 可知,捕食性动物个体数表现为 SSC 显著高于 SS($P<0.05$),而 S 居中。植食性动物个体数表现为 SS 显著高于 S($P<0.05$),而 SSC 居中。杂食性动物个体数表现为 SSC 和 SS 显著高于 S($P<0.05$),而 SS 和 SSC 之间无显著差异($P>0.05$)。说明在土壤粘粉粒含量较高的生境中捕食性动物分布较多,在土壤粉粒含量较高的生境中植食性动物分布较多,而随着沙地土壤质地中土壤粉粒增加杂食性动物则表现出较高的个体数分布。

捕食性、植食性和杂食性动物的类群数均表现为 SSC 最高,S 最低,而 SS 居中(图 1)。说明 3 种功能群的类群数随着土壤质地变细则逐渐增多,尤其是植食性和杂食性动物更为敏感。捕食性、植食性和杂食性动物类群的 Shannon-Wiener 指数均表现为 SSC 显著高于 SS 和 S($P<0.05$),而 SS 与 S 间无显著差异($P>0.05$)。说明 3 种功能群在土壤粘粉粒含量较高的土壤质地中生物多样性最高(图 1)。

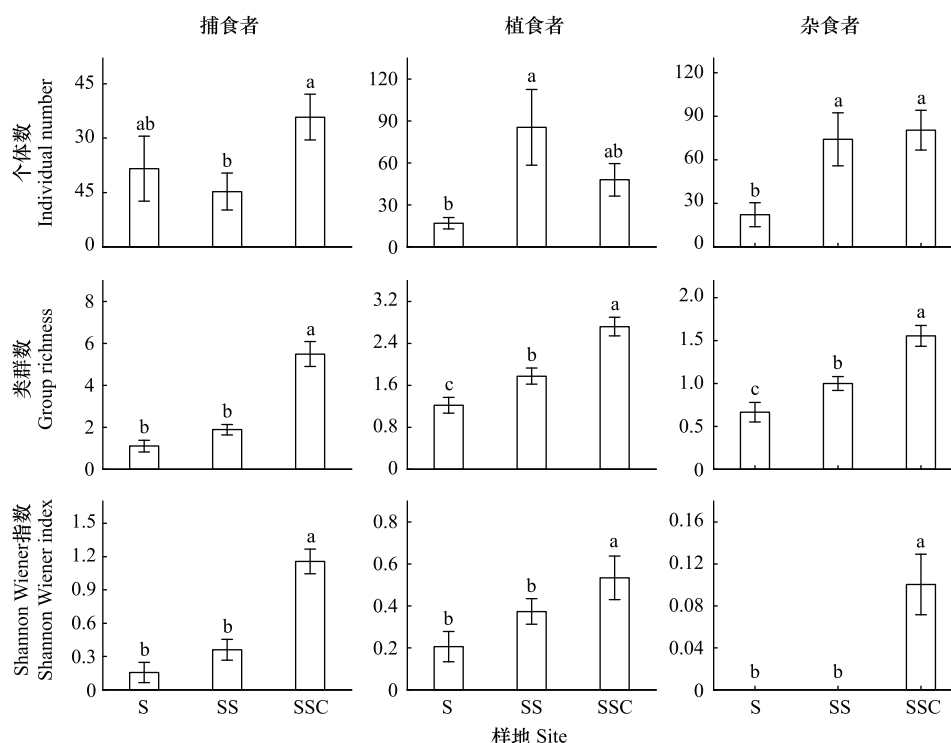


图 1 地面节肢动物功能群多样性指数特征

Fig.1 The diversity index of functional groups of ground-active arthropods

不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); S: 只含有土壤砂粒 soil sand alone; SS: 含有土壤砂粒和土壤粉粒 soil sand plus soil silt; SSC: 含有土壤砂粒、土壤粉粒和土壤黏粒 soil clay and silt plus soil sand

2.4 地面节肢动物功能群多样性指数特征与环境因子间的关系

由表 4 可知,捕食性动物个体数与土壤含水量呈显著正相关关系($P<0.01$),杂食性动物个体数与土壤有机碳、土壤全氮、土壤电导率、草本丰富度呈显著正相关关系($P<0.05$),而植食性动物个体数与土壤含水量呈显著负相关关系($P<0.01$)。

3 种食性地面节肢动物类群数均与土壤有机碳、土壤全氮、土壤电导率呈显著正相关关系($P<0.05$)。并且,植食性动物类群数与草本植物密度、高度、丰富度均呈显著正相关关系($P<0.05$);杂食性动物类群数与草本植物高度、丰富度均呈显著正相关关系($P<0.05$);而且 3 种食性地面节肢动物 Shannon-Wiener 指数与土壤

有机碳、土壤全氮、土壤电导率、土壤含水量、草本密度、草本高度和草本丰富度均呈正相关关系(表4)。

表4 地面节肢动物功能群多样性指数特征与环境因子间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between the diversity index of functional groups of ground-active arthropods and environmental factors

指数 Index	土壤 有机碳 SOC	土壤全氮 TN	土壤 pH 值 pH	土壤 电导率 EC	土壤 含水量 SM	草本植物 密度 HD	草本植物 高度 HH	草本植物 丰富度 HR
捕食性动物个体数 PrInd	0.263	0.262	-0.118	-0.011	0.401 **	0.087	-0.022	-0.096
植食性动物个体数 HeInd	0.181	0.259	-0.071	0.213	-0.388 **	-0.003	0.216	0.121
杂食性动物个体数 OmInd	0.393 **	0.420 **	0.143	0.290 *	0.151	0.186	0.196	0.327 *
捕食性动物类群数 PrR	0.664 **	0.707 **	0.200	0.500 **	0.208	0.227	0.192	0.200
植食性动物类群数 HeR	0.515 **	0.552 **	0.052	0.505 **	0.056	0.633 **	0.300 *	0.270 *
杂食性动物类群数 OmR	0.641 **	0.667 **	0.203	0.497 **	0.159	0.267	0.346 *	0.375 **
捕食性动物多样性指数 PrS	0.597 **	0.642 **	0.266	0.509 **	0.136	0.235	0.237	0.155
植食性动物多样性指数 HeS	0.056	0.036	0.093	0.192	0.373 **	0.847 **	0.253	0.313 *
杂食性动物多样性指数 OmS	0.646 **	0.704 **	-0.084	0.295 *	0.193	0.099	0.227	0.157

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$. PrInd:捕食性动物个体数 number of predators; PrR:捕食性动物类群数 group richness of predators; PrS:捕食性动物的 Shannon-Winner 指数 Shannon-Winner index of predators; HeInd:植食性动物个体数 number of herbivores; HeR:植食性动物类群数 group richness of herbivores; HeS:植食性动物的 Shannon-Winner 指数 Shannon-Winner index of herbivores; OmInd:杂食性动物个体数 number of omnivores; OmR:杂食性动物类群数 group richness of omnivores; OmS:杂食性动物的 Shannon-Winner 指数 Shannon-Winner index of omnivores; SOC:土壤有机碳 soil organic carbon; TN:土壤全氮 soil total nitrogen; pH:土壤 pH soil pH; EC:土壤电导率 soil electrical conductivity; SM:土壤含水量 soil moisture; HD:草本植物密度 herbaceous density; HH:草本植物高度 herbaceous height; HR:草本植物丰富度 herbaceous richness

从图2可以看出,PLSPM 分析结果($GOF = 0.511$)揭示了土壤质地、土壤、草本植物环境因素对不同食性地面节肢动物多样性的直接和间接影响(表5、表6)。土壤质地对捕食性动物多样性有直接正向影响,也可以通过影响土壤理化性质而对捕食性动物多样性产生间接正向影响。土壤质地通过土壤理化性质则对杂食性动物多样性产生间接正向影响。土壤质地通过草本植物则对植食性动物多样性产生间接正向影响。

3 讨论

3.1 土壤质地对地面节肢动物功能群组成的影响

功能群划分利于反映地面节肢动物各类群间的营养级联关系^[9]。本研究中,杂食性动物数量最多,其次为植食性动物,表明了该研究区地面节肢动物以杂食性和植食性动物为主,与捕食性和腐食性动物一起形成营养级食物网结构,这与陈蔚等^[14]的研究结果一致。植食性动物扮演着初级消费者的角色,主要食物来源是绿色植物,其在食物网中的能量值低于生产者位居第二位,因此植食性动物的种类、数量等通常较高^[15]。杂食性动物主要表现为蚂蚁个体数分布较多,这与腾格里沙漠固沙植被区蚂蚁为优势类群的分布特征^[16]相吻合。这是因为蚁科可食用资源较多(植物种子和土壤中的

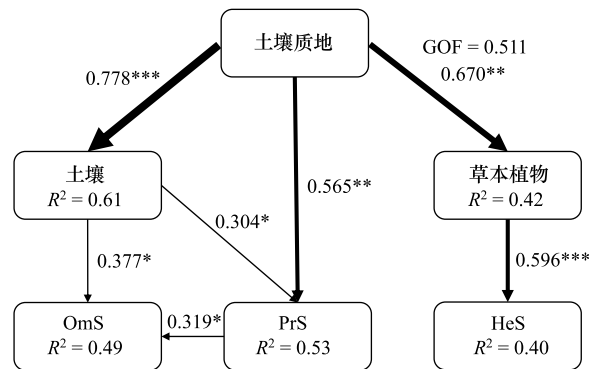


图2 基于偏最小二乘法路径模拟的土壤质地、土壤和草本植物对地面节肢动物功能群多样性的直接和间接影响

Fig.2 Direct and indirect effects of soil texture, soil properties and herbaceous on the diversity index of functional groups within ground-active arthropods based on partial least squares path simulations

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$;带箭头和系数的路径表示变量之间的单向因果关系,路径系数大小反映在箭头的宽度上;ST:土壤质地 Soil texture; Soil:土壤理化性质 Soil physical-chemical properties; Plant 草本植物 Herbaceous plants; OmS 杂食性动物多样性 Diversity of omnivores; PrS 捕食性动物多样性 Diversity of predators; HeS 植食性动物多样性 Diversity of herbivores. GOF 拟合优度指标 Goodness of fit; R^2 相关系数 Correlation efficiency

其他生物类群等)、生态位广且数量庞大^[17],占全部地面节肢动物数量的 42.06%,是造成研究区杂食性节肢动物数量最多的主要原因。

表 5 PLSPM 模型的最终结果
Table 5 Final results of PLSPM modeling

指数 Index	类型 Type	相关系数 R^2 Correlation efficiency	块共同度 Block communality	平均冗余度 Mean redundancy	平均提取的 变异量 AVE
土壤质地 Soil texture	外生变量	0	1.000	0.000	1.000
土壤 Soil properties	内生变量	0.605	0.525	0.318	0.525
草本 Herbaceous plants	内生变量	0.42	0.587	0.246	0.587
捕食性动物多样性 Diversity of predators	内生变量	0.528	1.000	0.528	1.000
植食性动物多样性 Diversity of herbivores	内生变量	0.401	1.000	0.401	1.000
杂食性动物多样性 Diversity of omnivores	内生变量	0.433	1.000	0.433	1.000

表 6 观测变量与潜在变量之间的载荷系数
Table 6 Loading coefficients between observed and predicted variables

指数 Index		土壤质地 Soil texture	土壤性质 Soil properties	草本植物 Herbaceous plants	捕食性动物 多样性 Diversity of predators	植食性动物 多样性 Diversity of herbivores	杂食性动物 多样性 Diversity of omnivores
土壤质地 Soil texture		1.000	0.778	0.648	0.688	0.373	0.492
土壤性质 Soil properties	土壤有机碳 SOC	0.681	0.940	0.350	0.597	0.056	0.646
	土壤电导率 EC	0.696	0.883	0.507	0.509	0.192	0.295
	土壤含水量 SM	0.214	0.130	0.258	0.136	0.373	0.193
	土壤 pH	0.281	0.330	0.388	0.266	0.093	-0.084
	土壤全氮 TN	0.687	0.914	0.308	0.642	0.036	0.704
草本植物 Herbaceous plants	草本高度 HH	0.388	0.303	0.767	0.237	0.254	0.227
	草本密度 HD	0.536	0.352	0.780	0.235	0.847	0.099
	草本丰富度 HR	0.540	0.474	0.750	0.313	0.155	0.157
捕食性动物多样性 Diversity of predators		0.688	0.657	0.340	1.000	0.102	0.579
植食性动物多样性 Diversity of herbivores		0.373	0.172	0.602	0.102	1.000	-0.044
杂食性动物多样性 Diversity of omnivores		0.492	0.587	0.199	0.579	-0.044	1.000

本研究显示,流动沙地(即仅为土壤沙粒为主要成分的土壤质地,S)的优势类群包括植食性动物拟步甲科、杂食性动物蚁科和捕食性动物步甲科。一方面说明拟步甲科和步甲科被视为荒漠植被退化或生境单一的指示类群^[18],占据优势地位,这与流动沙地土壤有机碳含量、土壤全氮含量、草本密度、丰富度均较低的特征密切相关(表 2)。同时也说明捕食性动物步甲科靠颚器营钻挖的运动方式^[5]使其能较好地适应均为砂粒的土壤质地,表征了以步甲科为代表的捕食性动物对沙粒含量较高的土壤质地的适应性特征。在土壤粉粒出现的土壤质地中(即 SS),优势类群除植食性拟步甲科和杂食性蚁科外还包括植食性害虫毒蛾科幼虫,表明随着固沙植被恢复,土壤质地改善,开始出现农林害虫,需注意植被管理和虫害防治。在土壤质地条件较好的土壤环境中,土壤粘粉粒含量较高(即 SSC),捕食性、植食性、杂食性动物的个体数和类群数均较多,且开始出现腐食性动物,说明土壤质地改善有助于延伸食物链长度,不仅包括食物链中的初级消费者、次级消费者,而且还包括分解者,对物质循环与能量流动有重要促进作用^[15]。

3.2 土壤质地对地面节肢动物功能群个体数及其多样性的影响

土壤质地细化的过程中,植食性动物个体数变化趋势为先增加后降低,捕食性则相反。说明随着土壤质地开始细化,食物资源和生存条件改善,植食性动物反应敏感,其个体数快速增加,有利于捕食性动物个体数增加,反映了一种上行效应^[19]。但是,随着土壤粘粉粒含量增加和土壤质地持续改善,捕食性动物的增多可

能反过来对植食性动物产生捕食压力而导致植食性动物个体数减少,反映了一种下行效应^[14]。另外,杂食性动物个体数随土壤质地细化依然呈增长趋势,其虽与植食性、捕食性动物共同竞争有限的资源^[20],但是由于杂食性节肢动物具有较宽的生态位^[10],具有较强的适应能力,因而能够随着土壤质地条件改善而个体数量增多。本研究中,杂食性动物主要以蚂蚁为主。蚂蚁既是消费者又是分解者。作为消费者,一方面它们与植食性节肢动物同作为初级消费者取食和搬运植物种子,帮植物传播种子;另一方面作为次级消费者,可以增加食物网的复杂性,有利于食物网结构的稳定性^[21]。同时,作为分解者,蚂蚁分解小型动物的尸体和腐烂的植物来改善土壤理化性质。综合分析来看,随着土壤质地变细、土壤环境条件改善,杂食性动物个体数的增加对于固沙植被区生态系统功能恢复具有很高的生态价值^[22]。

适宜的栖息环境和充足的食物资源是地面节肢动物生存的必要条件^[20]。土壤质地的改善尤其是土壤细颗粒的增加为土壤养分、水分的保持和草本植物的生长提供保障^[23],为地面节肢动物生存提供栖息地和食物来源,从而吸引了更多种类地面节肢动物的定居。本研究中,随土壤质地细化可食用资源种类增多,植食性动物类群数也增加^[24],捕食性动物类群数的变化趋势与植食性保持一致,体现了“上行控制”^[25]和营养级之间的“食性联接”^[21]。因此,捕食性、植食性、杂食性动物类群数随土壤质地细化均呈上升趋势。

地面节肢动物多样性反映土壤中食物资源和生境的多样性,在理论和实践中具有重要意义^[26]。本研究中,土壤质地通过草本植物对植食性动物多样性产生间接正向影响。说明植物为植食性动物提供食物来源和生长繁殖的场所,决定了植食性动物生存所需要的食物质量和数量,在食物网中二者间存在能量流动上的密切联系^[27]。因而,植物密度越高、多样性越丰富,提供的可食用资源多样性就越高,导致专性消费者的动物物种丰富度和多样性增加^[28]。土壤质地对捕食性动物多样性有直接正向影响,也通过土壤理化性质对捕食性和杂食性动物多样性产生间接正向影响。说明土壤质地细化,土壤营养条件改善,改变了捕食性和杂食性动物的栖居条件^[29]。主要表现为:土壤粉粒、黏粒含量增多、砂粒含量减少,影响土壤持水力和养分含量,为高多样性捕食性和杂食性动物生存提供了适宜的土壤环境^[30]。总之,土壤质地细化对各食性地面节肢动物多样性的提高起到直接或间接的促进作用。

此次研究中仅有一种腐食性动物-粪金龟科。粪金龟主要以动物粪便、尸体和腐殖质等为食,能够加快有机物的分解,是重要的“生态系统清洁工”^[31]。调查到的腐食性节肢动物个体数和种类都极少的原因可能是食物资源相对有限及调查取样的时间不处于凋落物分解较多的时期,有待进一步考究。

4 结论

腾格里沙漠固沙植被区中,植食性和杂食性动物是地面节肢动物功能群的主要组成部分。随着土壤质地细化、土壤条件改善,草本植物多样性增加和生长良好,为植食性动物增加创造生存条件,而随着土壤质地进一步改善、土壤粘粉粒增加,捕食性动物个体数增加给植食性动物造成捕食压力,反映了土壤质地细化过程中地面节肢动物营养级之间的上行-下行效应关系。并且,随着土壤质地细化杂食性动物数量持续增加以及腐食性动物的出现有助于延伸食物链长度,使地面节肢动物功能群结构趋于完善,有利于固沙植被区生物多样性稳定和生态系统功能恢复。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征. 地理研究, 2007, 26(3): 518-525.
- [3] Saurette D D. Comparing direct and indirect approaches to predicting soil texture class. Canadian Journal of Soil Science, 2022, 102(4): 835-851.
- [4] Bacq-Labreuil A, Crawford J, Mooney S J, Neal A L, Ritz K. *Phacelia* (*Phacelia tanacetifolia* Benth.) affects soil structure differently depending on soil texture. Plant and Soil, 2019, 441(1): 543-554.
- [5] 张雪萍. 土壤动物与环境质量关系探讨. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 1995, 11(4): 95-99.
- [6] 董炜华,王子婷,李锋瑞,刘继亮. 黑河中游绿洲化过程中不同开垦年限农田大型土壤动物群落特征. 地理科学, 2014, 34(10):

- 1254-1261.
- [7] Liu R T, Guo Z X, Steinberger Y. Differential responses of ground-active arthropod abundance and diversity to shrub afforestation in heterogeneous textured soils in desertified grassland ecosystems, North China. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154631.
- [8] McCary M A, Minor E, Wise D H. Covariation between local and landscape factors influences the structure of ground-active arthropod communities in fragmented metropolitan woodlands. *Landscape Ecology*, 2018, 33(2): 225-239.
- [9] 刘任涛, 李学斌, 辛明, 马琳, 刘凯. 荒漠草原地面节肢动物功能群对草地封育的响应. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2153-2159.
- [10] 白燕娇, 李义学, 刘任涛, 常海涛, 唐希明. 干旱绿洲区枸杞林地地面节肢动物功能群结构季节分布特征. *生态学报*, 2022, 42(15): 6239-6249.
- [11] 贾晓红, 李新荣, 王新平, 樊恒文, 赵金龙. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 46-50.
- [12] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 黄丽荣, 张雪萍. 大兴安岭北部森林生态系统土壤动物的功能类群及其生态分布. *土壤通报*, 2008, 39(5): 1017-1022.
- [16] 曾飞越, 刘任涛, 吉雪茹, 杨敏, 方进, 周磊, 赵文智. 腾格里沙漠固沙植被区蚂蚁群落分布特征及其对土壤理化性质的影响. *生态学报*, 2024, 44(3): 1104-1115.
- [17] 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.
- [18] 贾彦霞, 王新谱. 盐池四墩子人工柠条带—草地群落交错带地表甲虫多样性研究. *草业学报*, 2013, 22(5): 345-350.
- [19] Barnes A D, Scherber C, Brose U, Borer E T, Ebeling A, Gauzens B, Gilling D P, Hines J, Isbell F, Ristok C, Tilman D, Weisser W W, Eisenhauer N. Biodiversity enhances the multitrophic control of arthropod herbivory. *Science Advances*, 2020, 6(45): eabb6603.
- [20] Lindberg N. Soil fauna and global change-responses to experimental drought, irrigation, fertilisation and soil warming. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2003.
- [21] Shi P J, Hui C, Men X Y, Zhao Z H, Ouyang F, Ge F, Jin X S, Cao H F, Larry Li B. 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.
- [22] Glasier J, Nielsen S, Acorn J, Pinzon J. Boreal sand hills are areas of high diversity for boreal ants (Hymenoptera: Formicidae). *Diversity*, 2019, 11(2): 22.
- [23] Andrés P, Moore J C, Simpson R T, Selby G, Cotrufo F, Deneff K, Haddix M L, Shaw E A, de Tomasel C M, Molowny-Horas R, Wall D H. Soil food web stability in response to grazing in a semi-arid prairie: The importance of soil textural heterogeneity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 131-143.
- [24] Prather R M, Castillioni K, Welti E A R, Kaspari M, Souza L. Abiotic factors and plant biomass, not plant diversity, strongly shape grassland arthropods under drought conditions. *Ecology*, 2020, 101(6): e03033.
- [25] 叶国辉, 楚彬, 胡桂馨, 张飞宇, 华铤泽, 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] 王利峰, 和润莲, 杨林, 陈亚梅, 刘洋, 张健. 川西高山林线交错带土壤动物对岷江冷杉和高山杜鹃凋落物分解的贡献. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3689-3697.
- [27] Siemann E. Experimental tests of effects of plant productivity and diversity on grassland arthropod diversity. *Ecology*, 1998, 79(6): 2057-2070.
- [28] 吴远秀, 刘婧桐, 丁聪, 张炳川, 梁潇洒, 宁宇, 殷江霞, 吕晓涛. 氮素输入和刘割对草甸草原植食性昆虫多度和物种丰富度的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1975-1980.
- [29] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 巴义彬. 天然和人工固沙灌木林蜘蛛和甲虫分布与环境因子的关系. *生态学报*, 2020, 40(21): 7987-7996.
- [30] 孙建财, 刘任涛, 王真, 田颖. 基于文献计量的放牧对草地土壤动物多样性的影响. *生态学报*, 2024, 44(14): 6405-6415.
- [31] 阿拉腾巴根, 刘新民. 呼和浩特市粪金龟子群落动态特征研究. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2011, 40(4): 404-407.