

# 环境因子对甘南高寒草甸地表大型节肢动物多样性的影响

刘志涛<sup>①</sup> 王莹<sup>①</sup> 高铸成<sup>①</sup> 丁敏<sup>①</sup> 叶董<sup>②</sup>  
王京<sup>②</sup> 王瑞<sup>②</sup> 林英华<sup>②\*</sup>

① 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院 哈尔滨 150080; ② 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所 北京 100091

**摘要:** 地表节肢动物是生态系统的重要生物指示物, 研究甘南高寒草甸地表节肢动物群落多样性与环境因子的关系, 有助于揭示其分布格局对高寒草甸生态环境变化的响应。2018年5至9月, 采用陷阱法调查甘南高寒草甸4种典型类型生境, 即沼泽湿地、沼泽化草甸、草甸和成熟草甸地表大型节肢动物群落组成与多样性。研究时段共采集地表大型节肢动物2545头, 属于3纲9目29科30属, 以狼蛛属(*Lycosa*)、弓背蚁属(*Camponotus*)和蚁属(*Formica*)为优势类群。营养功能群以捕食类和植食类为主。研究结果显示, 成熟草甸生境大型节肢动物类群数明显高于沼泽化草甸和草甸生境的类群数( $P < 0.05$ ); 沼泽湿地生境 Pielou 均匀度指数( $J_s$ )明显大于草甸和成熟草甸生境的 Pielou 均匀度指数( $P < 0.05$ ); Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )差异不显著( $P > 0.05$ ); 4种生境之间地表大型节肢动物群落相似性指数较低。研究时段基于物种“出现-不出现”C-score、V-ratio、SES与Pianka生态重叠指数的实测值与预测值的差异均没有规律性, 显示研究区域地表大型节肢动物群落随机性与竞争性格局共存, 受随机扩散与生态过滤共同影响。置换多元方差分析(PerMANOVA)表明, 研究区域生境特征( $R^2 = 0.6364$ ,  $P < 0.001$ )比研究时间( $R^2 = 0.1573$ ,  $P < 0.001$ )能更多地解释地表大型节肢动物群落变化。土壤主要理化性质显著地影响了地表大型节肢动物群落特征, 其中, 土壤温度和土壤含水量对地表大型节肢动物群落影响最大。基于距离的冗余分析(db-RDA)结果表明, 土壤理化性质与地上生物量仅共同解释了地表大型节肢动物群落变异的29.88%, 其他70.12%的变异没有得到解释, 显示地表大型节肢动物群落形成的复杂性。

**关键词:** 群落结构; 共存格局; 土壤性质; 冗余分析; 甘南

**中图分类号:** Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2023) 02-237-13

## Characteristic of Ground-Dwelling Macroarthropods Community in Alpine Meadow of Gannan Region

LIU Zhi-Tao<sup>①</sup> WANG Ying<sup>①</sup> GAO Zhu-Cheng<sup>①</sup> DING Min<sup>①</sup>  
YE Dong<sup>②</sup> WANG Jing<sup>②</sup> WANG Rui<sup>②</sup> LIN Ying-Hua<sup>②\*</sup>

**基金项目** 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFC0504802);

\* 通讯作者, E-mail: linyinghua@263.net;

**第一作者介绍** 刘志涛, 男, 副教授; 研究方向: 动物生态学; E-mail: zhitaoharbin1972@163.com。

收稿日期: 2022-08-18, 修回日期: 2023-01-09 DOI: 10.13859/j.cjz.202302008

① *College of Life Science and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150080;*

② *Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China*

**Abstract:** [Objectives] Ground-dwelling macroarthropods are important indicators of soil ecosystem. Studying the characteristics of community of ground-dwelling macroarthropods in alpine meadows is helpful to reveal the response of its distribution pattern to the change of alpine meadow ecological factors. [Methods] From May to September 2018, we investigated ground-dwelling macroarthropods community composition and diversity by pitfall traps at four typical alpine meadow habitats (swamp wetland, swamp meadow, meadow and mature meadow). The principal coordinate analysis (PCoA) was used to explain the similarities or differences in ground-dwelling macroarthropods community from different habitats. Permutational multivariate analysis of variance (PerMANOVA) tests the significance of community distinctions among habitats and sampling time. Variance partitioning analysis (VPA) was used to evaluate the soil environmental factors, above ground biomass and sampling time on ground-dwelling macroarthropods community. The influence of specific soil environmental factors on the dynamics of ground-dwelling macroarthropods community structure was analyzed by distance-based redundancy analysis (db-RDA). [Results] A total of 2 545 individual ground-dwelling macroarthropods were collected from May to September 2018, belonged to 30 genera of 29 families, 9 orders, 3 classes. The dominant groups were *Lycosa*, *Camponotus* and *Formica*, and predators and herbivores were dominant in trophic groups (Table 2). The number of ground-dwelling macroarthropod groups in habitat of mature meadow was significantly higher than that of habitats of swamp meadow and meadow ( $P < 0.05$ ); the Pielou evenness index ( $J_s$ ) of habitat of swamp wetland was significantly higher than that of habitats of meadow and mature meadow ( $P < 0.05$ ); Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) had no significant difference ( $P > 0.05$ ) among habitats, and the similarity index of ground-dwelling macroarthropod communities between habitats was low (Table 3). Among the Checkerboard score of the matrix (C-score), variance ratio (V-ratio), standardized effect size based on binary data, the Pianka niche overlap, the difference between the observed and simulated values have not regularity, suggesting that the ground-dwelling macroarthropods community assemblage was randomness and competition coexist, and that is structured simultaneously by both random diffusion and ecological filtering (Table 5). PerMANOVA analysis showed that the habitat characteristics of the study area ( $R^2 = 0.6364$ ,  $P < 0.001$ ) could more explain the changes of the ground-dwelling macroarthropods community characteristics than seasons ( $R^2 = 0.1573$ ,  $P < 0.001$ ). The characteristics of the ground-dwelling macroarthropods community was affected significantly by soil physicochemical properties, of which soil temperature and soil moisture content have the greatest impacts (Fig. 2). The distance based on redundancy analysis (db-RDA) showed that the soil physicochemical properties and aboveground biomass explained 29.88% of the variation of the ground-dwelling macroarthropods community, while the other 70.12% of the variation was not explained, indicating the complexity of the formation of the ground-dwelling macroarthropods community (Fig. 3). [Conclusion] The result showed that the ground-dwelling macroarthropods community changed with different habitats and seasons. The effects of habitats on ground-dwelling macroarthropods composition were much greater than those of seasons.

**Key words:** Community structure; Co-occurrence; Soil characteristics; Distance-based redundancy analysis; Gannan

栖息于地表的节肢动物是维持陆地生态系统功能与稳定性的关键要素，对凋落物分解、养分矿化以及地上植物群落多样性起着至关重要的作用 (Huhta 2007, Johnston et al. 2020)，但自然与人类活动所致的生境破坏直接或间接地影响地表节肢动物的分布 (Bestion et al. 2009)。土壤动物，尤其是地表土壤动物所栖息的生境是多因子组成的复杂综合体，其群落多样性与植物资源特定特征有关，且对环境因子干扰极其敏感 (Uhey et al. 2020, 王京等 2022)，其对陆地生态系统功能的指示性作用已经引起学者的关注 (Truchy et al. 2019, Borges et al. 2021)。

甘南藏族自治州位于甘肃西南部，青藏高原与黄土高原过渡的甘肃、青海和四川三省交界处，是我国西部重要牧场。近年受气候暖湿化和过牧等人为活动的影响，其主要植被组成了一个明显的改变 (刘旻霞等 2021)，进而改变地上与地下生态系统的生态过程，导致生态系统功能退化 (Raven 2022)。但受各种因素限制，该区域相关研究主要集中在土壤主要性质、植物群落以及景观变化等方面 (姚宝辉等 2019, Liu et al. 2021)，近年来虽然地下生物多样性已引起了学者的关注，但多侧重于土壤线虫与土壤微生物等研究 (王瑞等 2020, Wang et al. 2021)，地表节肢动物对栖息生境变化的响应鲜有报道。

本研究以甘南藏族自治州玛曲县麦考村为研究区域，通过暖季 (5 至 9 月) 地表大型节肢动物群落调查，分析不同生境地表大型节肢动物群落组成与多样性变化，探讨地表大型节肢动物群落与栖息生境的关系以及对栖息生境要素变化的响应，为进一步揭示地表节肢动物群落与地上生物多样性关系及其在生态系统的功能性作用提供依据。

## 1 自然概况

研究区位于甘南藏族自治州玛曲县麦考村，地处青藏高原东缘 (35°58' N, 101°53' E)，平均海拔为 3 500 m。全年无绝对无霜期，年平均气温为 1.20 °C，1 月平均气温 - 10.0 °C，7 月平均气温 11.7 °C，年平均降雨量为 620 mm，主要集中于 6 至 9 月，7 月降雨量最多。植被类型为典型高寒草甸，土壤类型为亚高山草甸土，优势植物主要包括鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*)、高原毛茛 (*Ranunculus tanguticus*)、苔草 (*Carex* sp.)、嵩草 (*Kobresia* sp.) 和垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) (杨晓理等 2019)。

## 2 研究方法

### 2.1 调查方法

研究以多年积水区为中心，结合植被类型，沿水分梯度选择 4 种典型生境，即沼泽湿地、沼泽化草甸、草甸和成熟草甸为研究区。选择地形和地貌条件相似，坡度、坡向一致的上述 4 种生境。在每个生境中设定 100 m × 100 m 样地，沿对角线均匀布设 3 个 10 m × 10 m 的样方。

陷阱法调查地表大型节肢动物群落，即 10 m × 10 m 样方均匀布设 9 个陷阱瓶 (直径 65 mm，高 90 mm)，内置 30% 酒精溶液，一次性埋入土壤表层，且陷阱瓶上端与地表平齐，48 ~ 72 h 后将陷阱取回，带回实验室，置于 75% 酒精保存。除幼虫及少部分土壤节肢动物仅鉴定到目或科外，均鉴定到属 (尹文英 1998)。并依据其在凋落物分解中的作用划分为大型与中小型土壤节肢动物；依据其食性确定其所属营养功能群 (Swift et al. 1979)。

地上生物量采用收割法，即每 10 m × 10 m 样方内沿对角线均匀布设的 3 个 0.2 m × 0.2 m 小样方，与地面平齐剪取小样方内的地上植物，

放入信封内,带回实验室用烘干法测定生物量。同时利用环刀法采集同一样方 0 ~ 20 cm 土壤层样品,剔除石块、凋落物等杂质,混合均匀放入自封袋带回实验室,一部分采用常规方法测量土壤有机质、全氮和 pH 值,另一部分采用烘干法测量土壤含水量。

为反映土壤温度变化,在每次采取土壤样本的同时,用红外测温仪 (TESTO 830S1, 德国德图) 测量 0 ~ 10 cm 土壤层温度作为土壤温度,重复 5 次并记录,以获得每个样品点的平均温度。一次测量完成后应先归零处理再进行下一次测量。研究区基本情况见表 1。

### 2.2 数据分析

数量等级划分: 个体数量占全部捕获量 10% 以上的为优势类群, 1% 至 10% 的为常见类群, 0.1% 至 1% (不包括 1%) 的为稀有类群, 极稀有类群所占比例在 0.1% 以下。

群落多样性与相似性分别采用 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Pielou 均匀度指数 ( $J_s$ ) 以及 Jaccard 相似性指数 ( $q$ ) 计算, 即  $H' = -\sum P_i \ln P_i$ 、 $J_s = H' / \ln S$ 、 $q = c / (a + b - c)$ 。式中,  $P_i$  为第  $i$  种个体数占群落总个体数比率,  $S$  为类群数,  $q$  为相似性系数,  $c$  为两个群落共有的类群数,  $a$  和  $b$  分别为群落 A、群落 B 的类群数。

资源生态位重叠度采用 Pianka  $O_{ij}$  指数计

算, 即  $O_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ik} P_{jk}}{\sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{ik}^2}}$ , 其中,  $P_{ij}$ 、 $P_{ik}$ 、 $P_{jk}$  为第  $i$ 、 $j$ 、 $k$  类群对第  $j$  或  $k$  个资源的利用占它对全部资源利用的频度,  $r$  为资源位数, 即样方数。其中, Pianka  $O_{ij}$  指数实测值小于于预

表 1 研究区基本概况

Table 1 The environment factors of experiment field

	生境 Habitat			
	沼泽湿地 Swamp wetland	沼泽化草甸 Swamp meadow	草甸 Meadow	成熟草甸 Mature meadow
经纬度 Latitude & Longitude	33°39' N, 101°32' E	33°39' N, 101°52' E	33°39' N, 101°53' E	34°40' N, 102°52' E
海拔 Altitude (m)	3 512	3 522	3 550	3 610
优势物种 Dominant Plant	中华羊茅 <i>Festuca sinensis</i> 、喜马拉雅嵩草 <i>Kobresia royleana</i> 、蕨麻 <i>Potentilla anserine</i>	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i> 、三穗苔草 <i>Carex tristachya</i> 、矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i> 、中华羊茅 <i>F. sinensis</i>	棱子芹 <i>Pleurosper-mum camtschaticum</i> 、三穗苔草 <i>C. tristachya</i> 、矮地榆 <i>Sanguisorba filiformis</i> 、中华羊茅 <i>F. sinensis</i>	蒙古蒿 <i>Mongolian wormwood</i> 、垂穗披碱草 <i>Euphorbiaceae Elymus nutans</i> 、钝裂银莲花 <i>Anemone obtusiloba</i> 、四川马先蒿 <i>Pedicularis szetschuanica</i>
地上生物量 (干重) Above biomass (Dry weight) (g)	11.86 ± 10.49 <sup>a</sup>	19.16 ± 21.21 <sup>b</sup>	10.21 ± 7.11 <sup>ac</sup>	16.61 ± 15.12 <sup>ad</sup>
土壤 pH Soil pH	5.46 ± 0.23 <sup>a</sup>	5.23 ± 0.23 <sup>b</sup>	5.53 ± 0.66 <sup>a</sup>	5.31 ± 0.21 <sup>a</sup>
土壤有机质 Soil organic matter (g/kg)	137.01 ± 63.22 <sup>a</sup>	166.19 ± 23.38 <sup>a</sup>	142.67 ± 41.91 <sup>a</sup>	57.28 ± 8.99 <sup>b</sup>
土壤全氮 Soil total nitrogen (g/kg)	11.35 ± 5.61 <sup>a</sup>	13.81 ± 2.87 <sup>a</sup>	10.71 ± 3.58 <sup>a</sup>	4.97 ± 0.81 <sup>b</sup>
地表温度 Surface temperature (0 - 10 cm) (°C)	11.73 ± 3.06 <sup>c</sup>	11.21 ± 2.70 <sup>c</sup>	10.95 ± 2.38 <sup>b</sup>	12.23 ± 1.58 <sup>d</sup>
土壤含水量 Soil water content (0 - 10 cm) (%)	69.81 ± 7.63 <sup>a</sup>	66.34 ± 6.55 <sup>a</sup>	58.02 ± 5.81 <sup>b</sup>	35.13 ± 7.26 <sup>d</sup>

地上生物量的样方面积为 20 cm × 20 cm。数据以平均值 ± 标准误表示。同行数据上标注字母相同, 表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

The sample volume of aboveground biomass was 20 cm × 20 cm. Data were shown as Mean ± SE. The same letters in the line represent no significant difference row ( $P > 0.05$ ).

测值时 ( $P < 0.05$ ), 群落内部竞争关系占主导; Pianka  $O_{ij}$  指数实测值大于预测值时 ( $P < 0.05$ ), 生境过滤作用占据主导; 两者没有显著性差异则表示随机扩散占主导 (史赞荣等 2016)。

采用零模型模拟分析地表大型节肢动物群落共存格局。将同一生境不同样方中的主要地表大型节肢动物群落汇总, 构建基于“1-0”数据, 即“出现-不出现”的“样方-物种”二元矩阵。利用行固定-列等概率 (fixed row-equiprobable column, FE)、行固定-列固定 (fixed row-fixed column, FF) 与行固定-列非等概率 (fixed row-probability column, FP) 算法随机模拟 50 000 次计算 C-score (checkerboard score of the matrix) 值、V-ratio (variance ratio) 值, 并以 C-score、V-ratio 值的实际观察值与模拟均值的标准效应尺度 (standardized effect size, SES) 判断群落物种间共存格局情况, 其中 C-score 值的 SES 超过 2.0 时, 群落呈竞争性群落结构; C-score 值的 SES 低于 -2.0 时, 呈非竞争性结构; V-ratio 值的 SES 超过 2.0 时, 群落共存格局为集群性群落, SES 低于 -2.0 时, 为非随机性的物种间隔离; 当 SES 介于 -2 和 2 之间, 则呈随机性共存结构, 即群落整体表现为中性作用 (高梅香等 2014, 丁新峰等 2019)。

为降低变量间的异质性, 将各变量对数  $\lg(x + 1)$  转化后进行方差齐性检验, 双因素方差分析方法分析采样时间与生境对地表大型节肢动物群落的影响, LSD 检验法对地表大型土壤节肢动物群落显著性进行多重比较。

主坐标分析 (principal co-ordinates analysis, PCoA) 法分析地表大型节肢动物群落组成的相似性或差异性, 并基于置换多元方差分析 (PerMANOVA) 进一步判断时间与生境对地表大型节肢动物群落影响; 方差分解分析 (variance partitioning analysis, VPA) 解析土壤主要性质、地表生物量与时间对地表大型节肢动物群落差异的贡献, 并基于距离的冗余分

析 (distance-based redundancy analysis, db-RDA) 揭示土壤主要性质和地表生物量对地表大型节肢动物群落结构的影响。

以上分析通过 SPSS16.00、Ecosim 7.0 软件的 Co-occurrence 与 Niche overlap 模块、Canoco 5.03 完成。

### 3 结果

#### 3.1 地表大型节肢动物群落组成

研究时段, 共采集地表大型土壤节肢动物 2 545 头, 隶属 3 纲 9 目 29 科 30 属。其中, 狼蛛属 (*Lycosa*)、弓背蚁属 (*Camponotus*) 和蚁属 (*Formica*) 为优势类群, 蟻科 (Ceratopogonidae) 幼虫为常见类群, 稀有与极稀有类群占 5.23% (表 2)。

营养功能群主要包括植食性、捕食性、菌食性、腐食性和杂食性 5 类。其中, 捕食性占有比例最大 (42.22%), 其次是植食性 (28.89%), 菌食性比例最少 (6.67%) (表 2)。方差分析显示, 地表大型节肢动物营养功能群受生境与采样时段影响 ( $P < 0.05$ ), 但仅草甸与成熟草甸生境地表大型节肢动物营养功能群组成差别显著 ( $P < 0.05$ ); 营养功能群个体数变化明显 ( $P < 0.001$ ), 其捕食性功能类群数随时间减少, 9 月捕食性功能类群数明显少于 5、7 月捕食性功能类群数 ( $P < 0.05$ ); 植食性功能个体数增加 ( $P < 0.001$ ), 9 月植食性功能类群数明显多于 5、7 月植食性功能类群数 ( $P < 0.05$ )。

#### 3.2 地表大型节肢动物群落多样性与分布

数据显示, 地表大型节肢动物个体数在 4 种生境中由高到低依次是成熟草甸、草甸、沼泽湿地、沼泽化草甸, 类群数由高到低依次是成熟草甸、沼泽湿地、沼泽化草甸、草甸。其中, 成熟草甸生境大型节肢动物个体数明显高于其他生境 ( $P < 0.01$ )、成熟草甸生境大型节肢动物类群数明显高于沼泽化草甸、草甸生境 ( $P < 0.05$ ) (表 3)。地表大型节肢动物群落 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Pielou 均匀

度指数 ( $J_s$ ) 在 4 种生境中由高到低依次均为沼泽湿地、沼泽化草甸、成熟草甸、草甸; 4 种生境之间 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 沼泽湿地生境 Pielou 均匀度指数 ( $J_s$ ) 明显大于草甸和成熟草甸生境 ( $P < 0.05$ ) (表 3), 表明成熟草甸生境地表大型节肢动物个体数、类群数最丰富, 但群落多样性变化不明显, 沼泽湿地生境地表大型节肢动物最均匀。研究时段, 地表大型节肢动物总个体数、类群总数以及群落多样性指数变化一致, 其中, 沼泽湿地生境仅 5 月类群数大于 7 月类群数 ( $P < 0.05$ ); 沼泽化草甸生境仅 7 月个体数大于 5 月和 9 月个体数 ( $P < 0.05$ ); 草甸生境的 5 月、7 月个体数与类群数均大于 9 月个体数与类群数 ( $P < 0.05$ ), 7 月 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 与 Pielou 均匀度指数 ( $J_s$ ) 均高于 5 月和 9 月 ( $P < 0.05$ ), 且 5 月 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 与 Pielou 均匀度指数 ( $J_s$ ) 均高于 9 月 ( $P < 0.05$ ); 成熟草甸生境 9 月个体数明显低于其他月份个体数 ( $P < 0.05$ ), 5 月 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 与 Pielou 均匀度指数 ( $J_s$ ) 均高于 9 月, 反映不同生境条件与采样时段对地表大型节肢动物群落多样性影响不一致 (表 3)。

Jaccard 系数 ( $q$ ) 整体偏低, 仅 5 月沼泽化草甸与草甸生境之间、7 月沼泽湿地与成熟草甸生境群落相似性大于 0.5, 其余均在 0.5 以下, 显示地表土壤节肢动物群落变化较大, 不同生境之间群落相似性较低, 不同生境之间地表大型节肢动物群落具有较高的异质性 (表 4)。

### 3.3 不同生境地表大型节肢动物群落共存格局与资源利用

零模型模拟分析显示, 地表大型节肢动物群落物种共存格局的 C-score 和 V-ratio 实测值与模拟值变化不完全一致, 其中三种算法中, 沼泽化草甸生境的 C-score 实测值明显小于模

拟值 ( $P < 0.01$ ), V-ratio 实测值明显大于模拟值 ( $P < 0.01$ ), SES 绝对值大于 2, 而其他生境 C-score 与 V-ratio 实测值与模拟值差异均不显著 ( $P > 0.05$ ), 其 SES 绝对值小于 2, 显示沼泽化草甸生境地表大型节肢动物群落结构为非随机性的物种间集群, 呈非竞争性群落结构, 其他生境群落呈随机分布格局。采样时段, 5 至 9 月沼泽化草甸生境、9 月成熟草甸生境与沼泽化草甸生境的 C-score 与 V-ratio 变化一致, 即为随机性的物种间集群, 呈非竞争性群落结构; 基于行固定-列非等概率 (FP) 算法的 5 月成熟草甸生境、7 月沼泽湿地生境中的 C-score 实测值明显大于其模拟值 ( $P < 0.01$ ), V-ratio 实测值明显小于其模拟值 ( $P < 0.01$ ), 呈非随机性的物种间隔离, 为竞争性群落结构, 其他采样时段与不同生境虽然也存在 C-score 实测值明显小于模拟值 ( $P < 0.01$ ), 但 V-ratio 实测值与模拟值差异性不显著 ( $P > 0.05$ ), 其 SES 绝对值小于 2, 呈随机分布格局, 但 FF 算法中, 仅 5 月沼泽化草甸生境、9 月成熟草甸生境中的 C-score 实测值明显大于其模拟值 ( $P < 0.01$ ) (表 5), 显示地表大型节肢动物群落随机分布与竞争交互存在。

资源生态位重叠度分析显示 (表 5), 成熟草甸生境生态位重叠指数最大, 其次是沼泽化草甸生境, 草甸生境生态位重叠指数最小, 但仅沼泽化草甸生境资源生态位重叠度的实测值明显大于模拟值 ( $P < 0.01$ ); 研究时段, 除沼泽化草甸生境资源生态位重叠度的实测值明显大于模拟值 ( $P < 0.01$ ) 外, 5 月沼泽湿地生境、9 月成熟草甸生境资源生态位重叠度的实测值明显大于模拟值 ( $P < 0.01$ ), 显示研究时段沼泽化草甸生境、5 月沼泽湿地生境、9 月成熟草甸生境地表大型节肢动物群落生态位分布不均衡, 其地表大型节肢动物群落主要受生境过滤作用影响, 其他生境地表大型节肢动物群落则受随机过程的影响, 显示地表大型节肢动物群落受随机扩散与生境过滤共同影响。

表 2 研究区域地表大型节肢动物主要类群组成

Table 2 The major composition of ground-dwelling macroarthropods at study area

种类 Taxa	个体数 Number (ind)				丰度 Percent	优势度 Degree of dominance	功能群 Guild
	沼泽湿地 Swamp wetland	沼泽化草甸 Swamp meadow	草甸 Meadow	成熟草甸 Mature meadow			
狼蛛属 <i>Lycosa</i>	23	88	125	36	10.69	优势类群 Dominant group	捕食性 Predators
窃跳蛛属 <i>Psocathropos</i>	0	2	1	2	0.20		菌食性 Fungivorous forms
麻步甲属 <i>Carabus</i>	0	0	0	3	0.12		捕食性 Predators
通缘步甲属 <i>Pterostichus</i>	3	4	5	5	0.67		捕食性 Predators
婪步甲属 <i>Harpalus</i>	1	0	1	4	0.24		捕食性 Predators
黑皮蠹属 <i>Attagenus</i>	4	1	0	1	0.24		植食性 Phytophage
皮蠹科幼虫 Dermestidae larva	0	3	0	0	0.12		杂食性 Omnivores
象甲科 Curculionidae	0	0	0	3	0.12		植食性 Phytophage
象甲科幼虫 Curculionidae larva	0	0	4	1	0.20		植食性 Phytophage
小蓇甲科 Mycetophagidae	0	3	1	0	0.16		植食性 Phytophage
阎甲属 <i>Carcinops</i>	0	0	3	0	0.12		捕食性 Predators
大黑阎甲属 <i>Plaesus</i>	0	0	4	0	0.16		捕食性 Predators
蒿金叶甲属 <i>Chrusolina</i>	1	0	0	2	0.12		捕食性 Predators
隐翅虫科 Staphylinidae	1	0	0	2	0.12		腐食性 Saprozoic
圆泥甲科 Georyssidae	5	0	2	3	0.39		菌食性 Fungivorous forms
葬甲科 Silphidae	3	0	0	0	0.12		腐食性 Saprozoic
螻蛄科幼虫 Ceratopogonidae larva	11	2	1	29	1.69	常见类群 Common group	植食性 Phytophage
弓背蚁属 <i>Camponotus</i>	128	87	333	375	36.27	优势类群 Dominant group	腐食性 Saprozoic
小家蚁属 <i>Monomorium</i>	2	4	22	0	0.63	常见类群 Common group	杂食性 Omnivores
蚁属 <i>Formica</i>	147	65	98	852	45.13		植食性 Phytophage
红蚁属 <i>Myrmica</i>	0	1	8	1	0.39		捕食性 Predators
其他 Others	10	6	2	11	2.10		
总个体数 Total individuals (ind)	339	266	610	1 330			
总类群数 Total groups	20	17	16	25			

### 3.4 生境要素对地表大型节肢动物群落的影响

主坐标分析 (PcoA, 图 1) 显示, PcoA 1

与 PcoA 2 分别解释了地表大型节肢动物群落变化的 20.43% 和 16.48%。PcoA 1 主要反映 9

表 3 地表大型节肢动物群落多样性与均匀性指数

Table 3 Diversity indexes and Pielous index of ground-dwelling macroarthropods community

生境 Habitat	5 月 May		7 月 July		9 月 September		总计 Total																		
	沼泽湿地 Swamp wetland	沼泽化草甸 Swamp meadow	草甸 Meadow	成熟草甸 Mature meadow	沼泽湿地 Swamp wetland	沼泽化草甸 Swamp meadow		草甸 Meadow	成熟草甸 Mature meadow																
个体数 Individuals (ind)	51.7 ± 39.3 <sup>abA</sup>	27.0 ± 18.0 <sup>aAB</sup>	106.0 ± 32.5 <sup>bA</sup>	96.7 ± 31.6 <sup>bA</sup>	23.0 ± 14.7 <sup>aA</sup>	52.3 ± 20.3 <sup>abA</sup>	96.3 ± 18.0 <sup>bA</sup>	278.0 ± 173.0 <sup>bca</sup>	38.3 ± 23.6 <sup>aA</sup>	9.3 ± 8.5 <sup>BB</sup>	1.0 ± 0.0 <sup>BB</sup>	68.7 ± 33.0 <sup>ab</sup>	5.0 ± 1.7 <sup>aAB</sup>	2.7 ± 1.5 <sup>acA</sup>	1.0 ± 0.0 <sup>bcb</sup>	7.0 ± 1.7 <sup>adA</sup>	1.049 0 ± 0.384 6 <sup>aA</sup>	0.512 8 ± 0.452 3 <sup>aA</sup>	0.000 0 ± 0.000 0 <sup>BC</sup>	0.792 6 ± 0.208 6 <sup>aA</sup>	0.657 4 ± 0.095 3 <sup>aA</sup>	0.413 0 ± 0.357 7 <sup>aA</sup>	0.000 0 ± 0.000 0 <sup>BC</sup>	0.407 0 ± 0.056 8 <sup>aB</sup>	0.411 4 ± 0.201 4 <sup>b</sup>
Shannon-Wiener 指数	1.252 4 ± 0.127 9 <sup>aA</sup>	0.873 3 ± 0.205 6 <sup>aA</sup>	0.730 6 ± 0.254 9 <sup>aA</sup>	1.169 4 ± 0.394 0 <sup>aA</sup>	0.666 2 ± 0.137 0 <sup>aA</sup>	0.706 6 ± 0.244 9 <sup>aA</sup>	0.474 4 ± 0.180 7 <sup>aA</sup>	0.575 2 ± 0.172 2 <sup>aA</sup>	1.006 4 ± 0.109 6 <sup>aA</sup>	1.012 5 ± 0.203 1 <sup>aA</sup>	1.298 1 ± 0.213 0 <sup>ab</sup>	0.347 0 ± 0.200 5 <sup>BB</sup>	0.789 6 ± 0.137 1 <sup>aA</sup>	0.673 5 ± 0.102 0 <sup>aA</sup>	0.710 3 ± 0.061 5 <sup>ab</sup>	0.252 1 ± 0.225 7 <sup>BB</sup>	1.102 6 ± 0.238 8 <sup>a</sup>	0.799 6 ± 0.349 1 <sup>a</sup>	0.676 3 ± 0.587 6 <sup>a</sup>	0.769 7 ± 0.432 3 <sup>a</sup>	0.704 4 ± 0.125 5 <sup>a</sup>	0.597 7 ± 0.262 6 <sup>ab</sup>	0.394 9 ± 0.327 5 <sup>b</sup>	0.411 4 ± 0.201 4 <sup>b</sup>	
Shannon-Wiener index ( <i>H'</i> )	0.873 3 ± 0.205 6 <sup>aA</sup>	0.730 6 ± 0.254 9 <sup>aA</sup>	1.169 4 ± 0.394 0 <sup>aA</sup>	0.666 2 ± 0.137 0 <sup>aA</sup>	0.706 6 ± 0.244 9 <sup>aA</sup>	0.474 4 ± 0.180 7 <sup>aA</sup>	0.575 2 ± 0.172 2 <sup>aA</sup>	1.006 4 ± 0.109 6 <sup>aA</sup>	1.012 5 ± 0.203 1 <sup>aA</sup>	1.298 1 ± 0.213 0 <sup>ab</sup>	0.347 0 ± 0.200 5 <sup>BB</sup>	0.789 6 ± 0.137 1 <sup>aA</sup>	0.673 5 ± 0.102 0 <sup>aA</sup>	0.710 3 ± 0.061 5 <sup>ab</sup>	0.252 1 ± 0.225 7 <sup>BB</sup>	1.102 6 ± 0.238 8 <sup>a</sup>	0.799 6 ± 0.349 1 <sup>a</sup>	0.676 3 ± 0.587 6 <sup>a</sup>	0.769 7 ± 0.432 3 <sup>a</sup>	0.704 4 ± 0.125 5 <sup>a</sup>	0.597 7 ± 0.262 6 <sup>ab</sup>	0.394 9 ± 0.327 5 <sup>b</sup>	0.411 4 ± 0.201 4 <sup>b</sup>		
Pielou 均匀度指数	0.730 6 ± 0.254 9 <sup>aA</sup>	1.169 4 ± 0.394 0 <sup>aA</sup>	0.666 2 ± 0.137 0 <sup>aA</sup>	0.706 6 ± 0.244 9 <sup>aA</sup>	0.474 4 ± 0.180 7 <sup>aA</sup>	0.575 2 ± 0.172 2 <sup>aA</sup>	1.006 4 ± 0.109 6 <sup>aA</sup>	1.012 5 ± 0.203 1 <sup>aA</sup>	1.298 1 ± 0.213 0 <sup>ab</sup>	0.347 0 ± 0.200 5 <sup>BB</sup>	0.789 6 ± 0.137 1 <sup>aA</sup>	0.673 5 ± 0.102 0 <sup>aA</sup>	0.710 3 ± 0.061 5 <sup>ab</sup>	0.252 1 ± 0.225 7 <sup>BB</sup>	1.102 6 ± 0.238 8 <sup>a</sup>	0.799 6 ± 0.349 1 <sup>a</sup>	0.676 3 ± 0.587 6 <sup>a</sup>	0.769 7 ± 0.432 3 <sup>a</sup>	0.704 4 ± 0.125 5 <sup>a</sup>	0.597 7 ± 0.262 6 <sup>ab</sup>	0.394 9 ± 0.327 5 <sup>b</sup>	0.411 4 ± 0.201 4 <sup>b</sup>			
Evenness index ( <i>J<sub>s</sub></i> )	0.474 4 ± 0.180 7 <sup>aA</sup>	0.575 2 ± 0.172 2 <sup>aA</sup>	1.006 4 ± 0.109 6 <sup>aA</sup>	1.012 5 ± 0.203 1 <sup>aA</sup>	1.298 1 ± 0.213 0 <sup>ab</sup>	0.347 0 ± 0.200 5 <sup>BB</sup>	0.789 6 ± 0.137 1 <sup>aA</sup>	0.673 5 ± 0.102 0 <sup>aA</sup>	0.710 3 ± 0.061 5 <sup>ab</sup>	0.252 1 ± 0.225 7 <sup>BB</sup>	1.102 6 ± 0.238 8 <sup>a</sup>	0.799 6 ± 0.349 1 <sup>a</sup>	0.676 3 ± 0.587 6 <sup>a</sup>	0.769 7 ± 0.432 3 <sup>a</sup>	0.704 4 ± 0.125 5 <sup>a</sup>	0.597 7 ± 0.262 6 <sup>ab</sup>	0.394 9 ± 0.327 5 <sup>b</sup>	0.411 4 ± 0.201 4 <sup>b</sup>							

大写字母代表月份, 小写字母代表类型, 相同字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

Capital letter represents the month, lowercase represents the type. The same letters represent no significant difference row ( $P > 0.05$ ).

表 4 地表大型节肢动物群落相似性

Table 4 The similarity among ground-dwelling macroarthropods community

整体 Total	5 月 May			7 月 July			9 月 September				
	沼泽化草甸 Swamp meadow	成熟草甸 Mature meadow	沼泽化草甸 Swamp meadow	沼泽化草甸 Swamp meadow	成熟草甸 Mature meadow	沼泽化草甸 Swamp meadow	沼泽化草甸 Swamp meadow	成熟草甸 Mature meadow	沼泽化草甸 Swamp meadow		
沼泽湿地 Swamp wetland	0.235 3	0.416 7	0.500 0	0.214 3	0.176 5	0.181 8	0.333 3	0.625 0	0.233 3	0.269 2	0.322 6
沼泽化草甸 Swamp meadow	0.307 7	0.166 7	0.166 7	0.538 5	0.400 0	0.400 0	0.333 3	0.300 0	0.375 0	0.375 0	0.242 4
草甸 Meadow	0.312 5	0.312 5	0.312 5	0.312 5	0.312 5	0.312 5	0.312 5	0.181 8	0.181 8	0.181 8	0.281 3



表 5 群落共存分析与生态位重叠指数的标准效应尺度 (SES)

Table 5 The standard effect size of co-occurrence analysis and niche overlap index

月份 Month	生境 Habitat	行固定-列等概率 Fixed row-equiprobable column		行固定-列非等概率 Fixed row-probability column		行-列固定 Fixed row-fixed column	Petraitis 生态 位重叠指数 Petraitis Niche overlap index
		C-score	V-ratio	C-score	V-ratio	C-score	
5 月 May	沼泽湿地 Swamp wetland	- 0.89	1.49	2.20 <sup>b**</sup>	- 1.51	1.62	2.01 <sup>b**</sup>
	沼泽化草甸 Swamp meadow	- 2.45 <sup>b**</sup>	4.87 <sup>b**</sup>	2.33 <sup>b**</sup>	- 0.42	4.95 <sup>b**</sup>	7.05 <sup>b**</sup>
	草甸 Meadow	- 0.28	- 0.22	1.51	- 1.81	- 0.75	- 0.76
	成熟草甸 Mature meadow	1.48	- 1.81	2.23 <sup>b**</sup>	- 2.45 <sup>a**</sup>	- 0.42	- 1.91
7 月 July	沼泽湿地 Swamp wetland	0.64	- 1.02	2.67 <sup>b**</sup>	- 2.71 <sup>a**</sup>	- 1.10	- 1.38
	沼泽化草甸 Swamp meadow	- 2.91 <sup>a**</sup>	3.96 <sup>b**</sup>	- 0.10	0.70	- 0.54	5.72 <sup>b**</sup>
	草甸 Meadow	0.11	- 0.01	1.60	- 1.47	0.13	- 0.34
	成熟草甸 Mature meadow	- 0.47	0.19	1.00	- 1.13	- 1.17	- 0.18
9 月 September	沼泽湿地 Swamp wetland	- 2.47 <sup>a**</sup>	1.94	0.60	- 0.99	- 1.63	1.17
	沼泽化草甸 Swamp meadow	- 3.53 <sup>a**</sup>	3.88 <sup>b**</sup>	0.65	- 0.58	- 0.84	2.96 <sup>b**</sup>
	草甸 Meadow	0.20	- 0.21	1.00	- 0.99	0.00	- 0.21
	成熟草甸 Mature meadow	- 2.57 <sup>a**</sup>	3.22 <sup>b**</sup>	2.61 <sup>b**</sup>	- 0.80	2.22 <sup>b*</sup>	3.03 <sup>b**</sup>
总计 Total	沼泽湿地 Swamp wetland	- 1.35	1.13	0.69	- 1.65	- 0.60	1.48
	沼泽化草甸 Swamp meadow	- 3.00 <sup>a**</sup>	5.18 <sup>b**</sup>	- 0.82	1.99	0.65	6.14 <sup>b**</sup>
	草甸 Meadow	- 0.65	0.24	0.15	- 0.53	- 1.15	0.17
	成熟草甸 Mature meadow	0.03	- 0.06	0.69	- 0.75	- 0.55	0.11

a\*\* 表示  $P_{(\text{观察值} \leq \text{模拟值})} < 0.01$ ; a\* 表示  $P_{(\text{观察值} \leq \text{模拟值})} < 0.05$ ; b\*\* 表示  $P_{(\text{观察值} \geq \text{模拟值})} < 0.01$ ; b\* 表示  $P_{(\text{观察值} \geq \text{模拟值})} < 0.05$ 。

a\*\* means  $P_{(\text{value of observation} \leq \text{value of simulation})} < 0.01$ ; a\* means  $P_{(\text{value of observation} \leq \text{value of simulation})} < 0.05$ ; b\*\* means  $P_{(\text{value of observation} \geq \text{value of simulation})} < 0.01$ ; b\* means  $P_{(\text{value of observation} \geq \text{value of simulation})} < 0.05$ .

月草甸生境与 5 月草甸生境、成熟草甸生境地表大型节肢动物群落的差异性, PcoA 2 主要反映 7 月、9 月沼泽湿地生境、沼泽化草甸生境与 7 月成熟草甸生境地表大型节肢动物群落的差异性。置换多元方差分析 (PerMANOVA) 显示, 研究区域地表大型节肢动物群落受采样时间与生境影响显著 ( $P < 0.001$ ), 且生境 ( $R^2 = 0.6364$ ,  $P < 0.001$ ) 比时间 ( $R^2 = 0.1573$ ,  $P <$

$0.001$ ) 能更多地解释地表大型节肢动物群落变化, 显示生境因子是影响地表大型节肢动物群落特征的主要因素。

方差分解分析 (VPA) 表明, 土壤物理性质 (土壤温度、含水量与 pH) 与土壤化学性质 (土壤有机质、土壤全氮与 C/N 比) 共同解释地表大型节肢动物群落变异的 25.80%, 土壤物理性质与地表生物量共同解释了地表大型节肢

动物群落变异的 28.93%，土壤化学性质与地表生物量共同解释了地表大型节肢动物群落变异的 26.31%，这三个因子共同解释了地表大型节肢动物群落变异的 0.01% 以下。土壤物化性质与地上生物量共同解释了地表大型节肢动物群落变异的 29.88%，还有 70.12% 的变异没有得到解释，显示地表大型节肢动物群落形成的复杂性（图 2）。

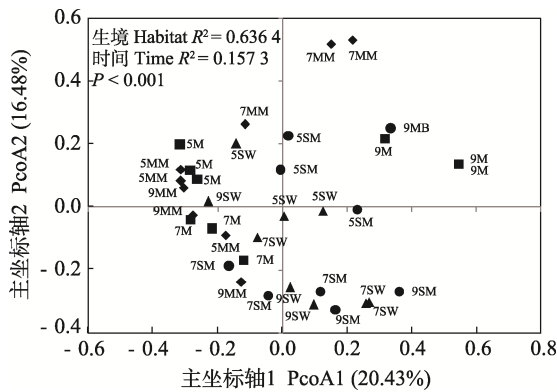


图 1 研究区域地表大型节肢动物群落主坐标分析  
Fig. 1 Principal co-ordinate analysis (PcoA) of ground-dwelling macroarthropods community

5、7、9 分别代表 5 月、7 月、9 月，SW、SM、M、MM 分别代表沼泽湿地、沼泽化草甸、草甸、成熟草甸生境。

5, 7 and 9 represent May, July and September, respectively; and SW, SM, M and MM represent swamp wetland, swamp meadow, meadow, and mature meadow.

采用 db-RDA 分析显示（图 3），地表大型节肢动物动物群落与土壤有机质 ( $r^2 = 0.280$ ,  $P < 0.01$ )、土壤全氮 ( $r^2 = 0.255$ ,  $P < 0.01$ )、土壤 pH ( $r^2 = 0.281$ ,  $P < 0.01$ )、土壤温度 ( $r^2 = 0.407$ ,  $P < 0.01$ )、土壤含水量 ( $r^2 = 0.292$ ,  $P < 0.01$ ) 均存在显著的相关性；与地表生物量 ( $r^2 = 0.174$ ,  $P > 0.05$ )、土壤 C/N ( $r^2 = 0.008$ ,  $P > 0.05$ ) 存在不显著的相关性，显示土壤主要理化性质对地表大型节肢动物动物群落影响显著，且土壤温度、土壤含水量影响最大，地表生物量对研究区域地表大型节肢动物群落具有一定影响。

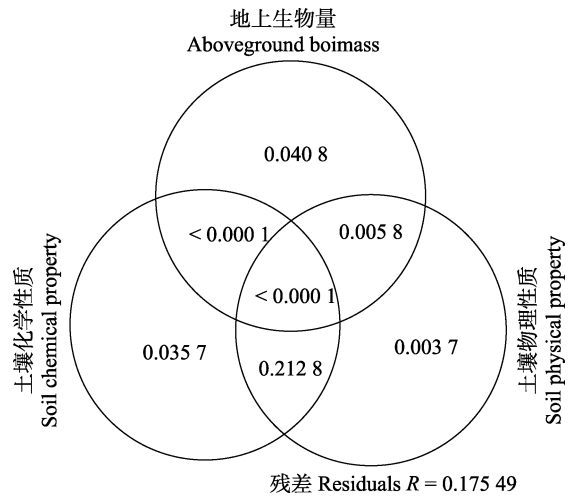


图 2 地表大型节肢动物群落与环境因子间的方差分解分析

Fig. 2 Variation partitioning analysis to quantify the contribution of environmental variables, sampling month and biomass to ground-dwelling macroarthropods community variations

土壤物理性质包括土壤温度、含水量与土壤 pH；土壤化学性质包括土壤有机质、土壤全氮与 C/N 比；地上生物量指地上植物干重。数字代表地表大型节肢动物群落变异。

Soil physical properties include soil temperature, water content and pH; soil chemical properties include soil organic matter, soil total nitrogen and C/N ratio; and aboveground biomass refers to dry weight of aboveground plants. The number was the variation of macroarthropods community on the surface.

#### 4 讨论

本研究发现，地表大型节肢动物群落组成与生境和采样时间有关。本研究时段，随甘南地区气温、水热条件逐渐改善和地上生物量增加，尤其是 7 月地面温度、湿度增加（马维伟等 2017）与研究时段土壤含水量随着海拔高度小幅度递减 ( $P < 0.01$ )，一些偏好较高湿度的地表节肢动物，如植食性的蚁属、捕食性的狼蛛属和杂食性的弓背蚁属个体数偏高，占据较大优势。至 9 月甘南地区生长季末期，因地表温度下降与植物生长季末地上生物量减少，地表大型节肢动物个体数明显降低，其营养功能

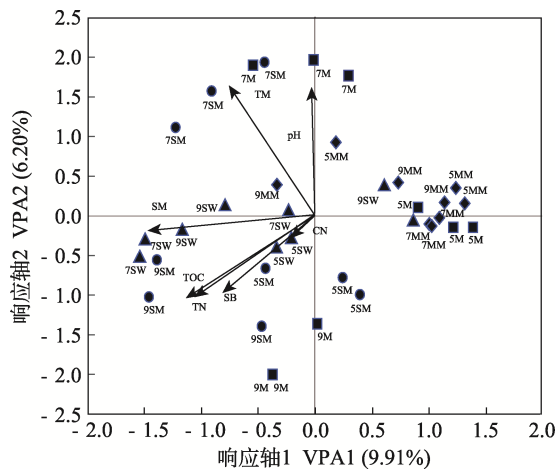


图3 地表大型节肢动物群落与环境因子关系的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis (db-RDA) of relationship between ground-dwelling macroarthropods community and environmental factors

5、7、9 分别代表 5 月、7 月、9 月，SW、SM、M、MM 代表沼泽湿地、沼泽化草甸、草甸、成熟草甸生境，TOC、TN、SM、SB、TM、C/N、pH 分别代表土壤有机质、土壤全氮、土壤含水量、地上生物量、土壤温度、C/N 比与 pH 值。

5, 7 and 9 represent May, July and September, respectively; and SW, SM, M and MM represent swamp wetland, swamp meadow, meadow, and mature meadow. TOC, TN, SM, SB, TM, C/N, and pH mean soil organic matter, soil total nitrogen, soil moisture, aboveground biomass, soil temperature, ratio of soil organic matter and soil total nitrogen, and value of pH.

群组成也随生境环境要素改变而发生改变，营养功能群个体数由 5 月腐食性与植食性占优势、7 月植食性与捕食性占优势转换为 9 月腐食性与植食性占优势的转变，显示研究区域地表大型节肢动物群落组成与功能群落明显受温湿度与土壤主要理化性质影响 (Santana et al. 2021)。以狼蛛属、弓背蚁属和蚁属为优势类群的地表大型节肢动物，其个体数占所采集地表大型节肢动物总个体数的 90% 以上，显示大部分地表大型节肢动物种类数量偏少，且分布在有限的空间内，狼蛛属、弓背蚁属和蚁属是甘南高寒草甸最具优势的类群，数量最丰富且在

研究区域分布广泛。

群落多样性分析显示，地表大型节肢动物优势现象明显，分布不均匀，但 Shannon-Weaner 指数 ( $H'$ ) 与 Pielou 指数 ( $J_s$ ) 变化趋势相似，并存在显著的相关关系 ( $r = 0.360, 0.928, P < 0.01$ )，显示研究区域地表节肢动物群落组成相对简单，且在一定的尺度上， $J_s$  指数对研究区域地表节肢动物群落  $H'$  指数的校正能获得较为一致的结果 (王京等 2020)。此外，5 月沼泽化草甸生境与草甸生境之间、7 月沼泽湿地生境与成熟草甸生境之间共有类群大于其他生境之间，且群落相似性最大，这与主坐标分析 (PcoA) 分析的不同生境之间地表大型节肢动物群落组成差异较大相一致，表明生境特征对地表大型节肢动物群落分布影响最大。

地表大型节肢动物群落分布主要受生境因子，如地表温湿度、地上植被以及生境小气候因素和采样时段的影响 (Sylvain et al. 2014)；生境与地上生物量直接或间接影响地表大型节肢动物群落多样性 (Daniel et al. 2022)。研究发现，土壤温、湿度与 pH 值等土壤物理性质对地表大型节肢动物群落变异影响最大，土壤有机质、土壤全氮与 C/N 比等土壤化学性质对地表大型节肢动物群落变异影响最小，但地表大型节肢动物个体数与类群数均与土壤有机质、土壤全氮呈现显著的负相关 ( $-0.491 < r < -0.367, P < 0.05$ )，这与研究区域气候寒冷、土壤过湿导致的生境斑块异质化和节肢动物生境选择偏好有关 (Gallé et al. 2019)；地表大型节肢动物个体数与多样性指数分别与土壤含水量、地表生物量呈显著的负相关 ( $r = -0.529, P < 0.05$ )，而均匀性分布与土壤含水量、土壤温度呈现显著的正相关 ( $r = 0.424, P < 0.01$ ) 和不显著的正相关关系 ( $r = 0.212, P > 0.05$ )，显示高湿度并未通过抑制温度降低地表大型节肢动物群落的丰度 (Aupic-Samain et al. 2021)，但随着地上生物量增加，地表大型节肢动物群落多样性与均匀性受到抑制 (Gallé et al. 2019)。

了解地表节肢动物分布格局是土壤生态学

研究的重要内容之一 (Bestion et al. 2009)。研究发现, 随着采样时段水热条件与地上植被的变化, 地表大型节肢动物群落结构呈现物种间隔离或物种间集群, 并具有一定的时间波动性。基于 FP 算法的 V-ratio 指标和其他算法的 C-score 和 V-ratio 值以及生态位重叠度分析表明, 生境草甸地表大型节肢动物群落为随机性与竞争性的共存格局, 显示种间竞争和环境过滤均不是大型地表节肢动物群落结构的调控因子, 其分布可能与生境草甸地上植物分布不均、地上生物量偏低限制其扩散有关 (Tsafack et al. 2021)。基于 FE 算法的 C-score 值和资源生态位重叠指数表明, 沼泽化草甸生境地表大型节肢动物群落结构为非随机性的物种间集群, 即物种间竞争可能对地表大型节肢动物群落共存起到重要的调控作用 (高梅香等 2014)。分析显示, 地表大型节肢动物对时间与空间资源利用存在差异 (Daniel et al. 2022, Mhlanga et al. 2022), 如植食性的蚁属、杂食性且嗜湿的弓背蚁属以及与蚂蚁进化关系密切的蜘蛛类, 如狼蛛属, 也因可利用资源增加, 其生态位重叠度增大而增加 (Cushing 2012, Salas-López et al. 2022), 而地表甲虫因可适宜资源减少而重新选择适宜生境, 即生境过滤作用改变分布格局 (Pozsgai et al. 2022)。

已有的研究表明, 地表节肢动物既是反映环境变化的生物指示物, 也是监测特定环境要素变化的生态指示物 (Tizado et al. 2016, Borges et al. 2021)。本研究发现, 蚂蚁、蜘蛛个体数对生境要素与采样时段反应敏感 ( $P < 0.05$ ), 但地表甲虫仅个体数对生境变化敏感 ( $P < 0.05$ ), 这与近年研究发现的蜘蛛、蚂蚁与地表甲虫是高寒草甸重要类群与生物指示物相一致 (Balkenhol et al. 2018, Johari et al. 2021, Kędzior et al. 2022)。但因高寒沼泽地区地表甲虫物种丰富度偏低, 不适于用于监测高寒草甸生境要素变化 (Lehmitz et al. 2020), 因此未来可通过地表的蜘蛛、蚂蚁群落特征, 并结合地上植被季相变化监测高寒草甸生态系统质量状

况 (Costantini et al. 2016)。

**致谢** 野外工作得到兰州大学姚佳禾、李昕蔚等同学帮助, 在此表谢忱。

## 参 考 文 献

- Aupic-Samain A, Baldy V, Delcourt N, et al. 2021. Water availability rather than temperature control soil fauna community structure and prey-predator interactions. *Functional Ecology*, 35(7): 1550–1559.
- Balkenhol B, Haase H, Gebauer P, et al. 2018. Steeplebushes conquer the countryside: Influence of invasive plant species on spider communities (Araneae) in former wet meadows. *Biodiversity Conservation*, 27(1): 2257–2274.
- Bestion E, Cote J, Jacob S, et al. 2009. Habitat fragmentation experiments on arthropods: What to do next? *Current Opinion in Insect Science*, 35(10): 117–122.
- Borges F, Oliveira M, Almeida T, et al. 2021. Terrestrial invertebrates as bioindicators in restoration ecology: A global bibliometric survey. *Ecological Indicators*, 125(suppl 4): 107458.
- Costantini E A C, Branquinho C, Nunes A, et al. 2016. Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems. *Solid Earth*, 7(2): 397–414.
- Cushing P E. 2012. Spider-ant associations: An updated review of myrmecomorphy, myrmecophily, and myrmecophagy in spiders. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2012(2): 1–23.
- Daniel G M, Noriega J A, da Silva P G, et al. 2022. Soil type, vegetation cover and temperature determinants of the diversity and structure of Dung Beetle assemblages in a South African open woodland and closed canopy mosaic. *Austral Ecology*, 47(1): 79–91.
- Gallé R, Samu F, Zsigmond A R, et al. 2019. Even the smallest habitat patch matters: On the fauna of peat bogs. *Journal of Insect Conservation*, 23(12): 699–705.
- Huhta V. 2007. The role of soil fauna in ecosystems: A historical review. *Pedobiologia*, 50(6): 489–495.
- Johari A, Hermanto M A, Wulandari T. 2021. Ant diversity inhabited oil palm plantations in a peatland in Sumatra, Indonesia. *Nusantara Bioscience*, 13(2): 158–163.
- Johnston A S A, Sibly R M. 2020. Multiple environmental controls explain global patterns in soil animal communities. *Oecologia*,

- 192(4): 1047–1056.
- Kędzior R, Zarzycki J, Zajac E. 2022. Raised bog biodiversity loss: A case-study of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) as indicators of ecosystem degradation after peat mining. *Land Degradation and Development*, 33(1): 3511–3522.
- Lehmitz R, Haase H, Otte V, et al. 2020. Bioindication in peatlands by means of multi-taxa indicators (Oribatida, Araneae, Carabidae, Vegetation). *Ecological Indicators*, 109(20): 105837.
- Liu X, Chen Y, Li Z, et al. 2021. Driving Forces of the changes in vegetation phenology in the Qinghai-Tibet Plateau. *Remote Sensing*, 13(23): 4952.
- Mhlanga L, Kapembeza C, Sithole R, et al. 2022. Variation in ground insect diversity, composition and abundance across land use types in an African Savanna, Zimbabwe. *Scientific African*, 16(133): e01204.
- Pozsgai G, Quinzo-Ortega L, Littlewood N A. 2022. Grazing impacts on ground beetle (Coleoptera: Carabidae) abundance and diversity on semi-natural grassland. *Insect Conservation and Diversity*, 15(1): 36–47.
- Raven J A. 2022. Interactions between above and below ground plant structures: Mechanisms and ecosystem services. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 9(2): 197–213.
- Salas-López A, Violle C, Munoz F, et al. 2022. Effects of habitat and competition on niche partitioning and community structure in Neotropical ants. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10(6): 863080.
- Santana M da S, Andrade E M, Oliveira V R, et al. 2021. Trophic groups of soil fauna in semiarid: Impacts of land use change, climatic seasonality and environmental variables. *Pedobiologia*, 89(10): 150774.
- Swift M J, Heal O W, Anderson J M. 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Oxford: Blackwell, 1–49.
- Sylvain Z A, Wall D H, Cherwin K L, et al. 2014. Soil animal responses to moisture availability are largely scale, not ecosystem dependent: Insight from a cross-site study. *Global Change Biology*, 20(8): 2631–2643.
- Tizado E J, Núñez-Pérez E. 2016. Terrestrial arthropods in the initial restoration stages of anthracite coal mine spoil heaps in northwestern Spain: Potential usefulness of higher taxa as restoration indicators. *Land Degradation and Development*, 27(4): 1131–1140.
- Truchy A, Göthe E, Angeler D G, et al. 2019. Partitioning spatial, environmental, and community drivers of eco-system functioning. *Landscape Ecology*, 34(3): 2371–2384.
- Tsafack N, Wang X, Xie Y, et al. 2021. Niche overlap and species co-occurrence patterns in carabid communities of the northern Chinese steppes. *ZooKeys*, 1044(7): 929–949.
- Uhey D A, Riskas H L, Smith A D, et al. 2020. Ground-dwelling arthropods of pinyon-juniper woodlands: Arthropod community patterns are driven by climate and overall plant productivity, not host tree species. *PLoS ONE*, 15(8): e0238219.
- Wang R, Wang M, Wang J, et al. 2021. Habitats are more important than temporal shifts in shaping soil bacterial communities on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Microorganisms*, 9(8): 1595.
- 丁新峰, 郝广, 董轲, 等. 2019. 平茬处理对小叶锦鸡儿灌丛邻居植物群落空间格局的影响. *生态学报*, 39(11): 4011–4020.
- 高梅香, 何萍, 孙新, 等. 2014. 环境筛选、扩散限制和生物间相互作用在温带落叶阔叶林土壤跳虫群落构建中的作用. *科学通报*, 59(24): 2426–2438.
- 刘旻霞, 张娅娅, 李全弟, 等. 2021. 甘南高寒草甸植物群落物种多度分布特征. *中国环境科学*, 41(3): 1405–1414.
- 马维伟, 王辉, 李广, 等. 2017. 甘南杂海湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态. *生态学报*, 37(15): 5091–5101.
- 史赞荣, 沈新强, 王云龙. 2016. 海湾鱼类群落物种共存机制——以湄洲湾为例. *中国水产科学*, 23(1): 169–176.
- 王京, 金屿淞, 黄勇杰, 等. 2020. 采伐胁迫对大兴安岭针阔混交林地表节肢动物群落的长期影响. *林业科学*, 56(12): 177–186.
- 王京, 李成一, 卓玛姐, 等. 2022. 基于地表土壤动物与植物完整性指数评估若尔盖沼泽湿地受扰现状. *生态学报*, 42(1): 340–347.
- 王瑞, 王京, 李昕蔚, 等. 2020. 甘南高寒草甸土壤线虫营养功能群的地统计学分析. *动物学杂志*, 55(6): 741–751.
- 杨晓理. 2019. 高寒草甸不同优势植物对土壤线虫群落的直接和间接作用及其机制. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 9–11.
- 姚宝辉, 王缠, 张倩, 等. 2019. 甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化. *水土保持学报*, 33(3): 138–145.
- 尹文英. 1998. *中国土壤动物检索图鉴*. 北京: 科学出版社, 1–392.