

孙彩彩, 董全民, 杨晓霞, 等. 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

Sun CC, Dong QM, Yang XX, *et al.* Effects of yak and Tibetan sheep grazing on soil arthropods community in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 3127–3134

## 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

孙彩彩 董全民 杨晓霞\* 冯斌 时光 吕卫东

(青海大学畜牧兽医科学院/三江源区高寒草地生态教育部重点实验室/青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 西宁 810016)

**摘要** 基于青海省海北藏族自治州海晏县的“高寒草地-家畜系统适应性管理技术平台”,开展了牦牛和藏羊放牧对高寒草甸土壤节肢动物影响研究。结果表明:试验共得到土壤节肢动物隶属4纲8目26科,其中优势类群为螨总科和甲螨总科;放牧牦牛和藏羊均会降低土壤节肢动物多度,但会提高土壤节肢动物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数;放牧牦牛可显著提高捕食性土壤节肢动物功能群类群数,放牧牦牛和藏羊均可显著提高腐食性土壤节肢动物功能群类群数,但对杂食性和植食性土壤节肢动物功能群的类群数无显著影响;放牧牦牛和藏羊均显著降低了土壤螨类的多度;土壤容重、速效钾和速效氮是影响土壤节肢动物群落组成的主要环境因子。

**关键词** 高寒草甸;土壤节肢动物;群落多样性;功能群

**Effects of yak and Tibetan sheep grazing on soil arthropods community in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau, China.** SUN Caicai, DONG Quanmin, YANG Xiaoxia\*, FENG Bin, SHI Guang, LYU Weidong (*Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University/Key Laboratory of Alpine Grassland Ecosystem in the Three-River-Source, Ministry of Education/Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive Management on Alpine Grassland, Xining 810016, China*).

**Abstract:** We investigated the responses of community structure of soil arthropods to yak and Tibetan sheep grazing based on a manipulated grazing experiment at the alpine meadow livestock Adaptive Management Platform, which locates in Haiyan County, Qinghai Province. The results showed that the obtained soil arthropods belonged to 26 families, 8 orders, and 4 classes, with Acaroidae and Oribatida as the dominant groups. Yak and Tibetan sheep grazing decreased the abundance but increased Shannon index, Margalef index and Pielou index of soil arthropods. Yak grazing significantly increased the quantity of the predatory soil arthropod groups. Yak and Tibetan sheep grazing significantly increased the quantity of the detritivore soil arthropod groups, but did not affect the quantity of the omnivorous and phytophagous soil arthropod groups. Yak and Tibetan sheep grazing significantly reduced the abundance of soil mites. Soil bulk density, available potassium, and available nitrogen were the main abiotic factors affecting soil arthropods community composition.

**Key words:** alpine meadow; soil arthropod; community diversity; functional group.

青藏高原是我国重点生态保护与修复区域,由于海拔高、面积大,有“地球第三极”的美称。高寒草甸是青藏高原最重要的一种生态系统,面积 $1.33\times 10^8\text{ hm}^2$ ,约占我国草地总面积的30%,不仅是

我国绿色生态保护屏障,还是我国畜牧业生产的重要基地,在维护生物多样性、防范水土流失、调节气候等方面均发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。放牧作为高寒草甸最广泛、最直接的利用方式,是影响草地植被、其他食草动物群落组成及多样性的重要过程<sup>[2-3]</sup>。放牧会使草地地上生物量降低<sup>[4]</sup>,植被组成及群落结构发生改变,同时会影响枯落物及动物粪尿归还数量<sup>[5]</sup>,使土壤紧实度增加并影响土壤含水量<sup>[6]</sup>,对土壤化学特性及其他生物过程产生影响,最终对整

本文由青海省科技厅创新团队项目(2021-ZJ-901)、国家自然科学基金联合基金项目(U20A2007)、国家自然科学基金地区科学基金项目(32160343)和2021年度中国科学院“西部之光”人才培养计划项目资助。

2023-03-16 收稿, 2023-09-12 接受。

\* 通信作者 E-mail: xxyang@qhu.edu.cn

个草地生态系统产生影响<sup>[7]</sup>。

土壤节肢动物在生态系统中扮演着消费者、分解者两种角色,具有数量大、分布广、种类多、生殖潜能大等特点<sup>[8-9]</sup>。与植被、土壤、微生物等研究对象相比,人们对土壤节肢动物的了解较少<sup>[10]</sup>,导致土壤节肢动物在生态系统中发挥的作用往往被人们忽略。实际上,土壤节肢动物与其他生物,如地表节肢动物、土壤线虫、微生物等共同作用于养分循环和枯落物分解,是生态系统能量流动的重要参与者<sup>[11]</sup>,而且土壤节肢动物能在小尺度范围内对于环境变化(土壤、植物群落等)在第一时间做出响应,因此,土壤节肢动物作为生态系统变化的敏感性指标,可以作为沙化草地的“指示剂”对环境变化进行监测,以此评价生态系统的整体状况<sup>[12-14]</sup>。土壤节肢动物与大型食草动物均是草地生物多样性的重要组分,牦牛和藏羊由于食性具有差异,导致枯落物数量、质量以及植物群落发生变化,从而对土壤节肢动物赖以生存的环境产生影响,进而影响其分布和组成<sup>[15]</sup>。如绵羊更倾向于采食优质牧草,而牛的采食范围更广泛<sup>[16]</sup>。此外,不同放牧家畜对土壤紧实度影响不同,而杂食性土壤动物数量会由于土壤紧实度的增加而减少<sup>[17]</sup>。另有研究表明,不同家畜粪便碳氮含量差异较大<sup>[18]</sup>,这也会影响土壤节肢动物组成与分布。

当前在青藏高原地区,关于土壤节肢动物的研究较为缺乏,这势必会影响我们对生态系统结构及功能的深入了解。牦牛和藏羊是青藏高原地区最重要的两种家畜,本研究以青海省海北藏族自治州海晏县西海镇高寒草甸为对象,在牧草利用率为 50% 左右的前提下,设置牦牛单牧、藏羊单牧处理,以无放牧处理作为对照,研究牦牛和藏羊对土壤节肢动物群落多样性、功能群的影响,揭示在不同放牧家畜影响下土壤节肢动物的变化规律,旨在为青藏高原高寒草甸的合理利用和科学管理提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究在青海省科技基础条件平台“高寒草地-家畜系统适应性管理技术平台”开展。研究平台位于青海省海北藏族自治州海晏县西海镇(36°44′—37°39′ N, 100°23′—101°20′ E, 海拔 3150 m)。研究区属高原大陆性气候,年均温 1.5 °C,年降水量 400 mm,主要集中在 5—9 月。植物非生长季从 10 月持续到来年 4 月,时间长而寒冷,而生长季仅有 5 个

月,日夜温差大,无绝对无霜期。土壤为沙壤土。草地类型为草原化草甸,主要优势植物有紫花针茅(*Stipa purpurea*)、早熟禾(*Poa annua*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、干生苔草(*Carex aridula*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)等<sup>[19]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 放牧处理** 为降低各放牧处理间的差异及空间异质性的影响,在放牧试验开始前,选择地块连续、地势较平坦、环境条件较均一的草地。为保证放牧试验的一致性,选择同龄、体重相近的公牦牛和公藏羊。在放牧前给家畜进行驱虫处理,整个放牧期间不进行补饲,隔一天添加一次饮用水,以保证家畜的正常活动<sup>[20]</sup>。于 2014 年开始放牧,每年于暖季(6 月)开始,至冷季(10 月)结束,根据牧草实际生长状况动态调整放牧天数,使牧草利用率始终维持在 50% 左右,当牧草利用率达到 50% 时,将放牧家畜赶至邻近草地放牧。设置 3 个处理,分别为牦牛单牧、藏羊单牧及无放牧处理,每处理 3 个重复,共 9 个试验小区,试验地具体情况见表 1。因本研究关注的是不同放牧家畜(牦牛、藏羊)对土壤节肢动物的影响,为保证放牧强度的一致性(中等放牧强度),故放牧小区面积不同。

**1.2.2 土壤节肢动物的取样、分离及鉴定** 土壤节肢动物取样在 2020 年 7 月 25 日进行。每个试验小区按照“对角线法则”设置 9 个采样点,使用直径为 5 cm 的土钻采集 0~15 cm 土层土壤,将 9 个土壤样品充分混匀,从中称取 2 份 100 g 的土壤进行土壤节肢动物的分离、鉴定。每处理 6 份土壤样品,共采集土样 18 份。

采集的新鲜土样放在室内通风、阴凉处,在一周之内通过干漏斗法(Tullgren 法)完成土壤节肢动物分离工作,分离时间为 48 h,后保存在 75% 的酒精溶液中<sup>[21]</sup>。根据《中国土壤动物检索图鉴》<sup>[22]</sup>、《昆

表 1 放牧试验设计

Table 1 Grazing experiment design

处理 Treatment	牦牛数量 Number of yak (heads)	藏羊数量 Number of Tibetan sheep (heads)	小区面积 Area of plots (hm <sup>2</sup> )	小区数 Number of plots
无放牧 No grazing	0	0	0.05	3
藏羊单牧 Tibetan sheep grazing	0	2	0.17	3
牦牛单牧 Yak grazing	1	0	0.26	3

虫分类检索》<sup>[23]</sup>、《蜚螨学》<sup>[24]</sup>等,通过倒置显微镜(Leica DM4000B)、体式显微镜(Olympus SZX16)进行鉴定,统计土壤节肢动物多度及类群数,同时根据动物食性<sup>[25-26]</sup>将土壤节肢动物划分为植食性(phytophagous, Ph)、捕食性(predatory, Pr)、杂食性(omnivorous, Om)、腐食性(detritivore, De)4个功能群。

**1.2.3 植物和土壤样品的取样与测定** 植物取样与土壤节肢动物取样同期开展,每个小区随机调查3个0.5 m×0.5 m样方,记录每个样方中物种数、群落盖度、植株平均高度,植物样品齐地面剪回,在70℃的烘箱烘干至恒重,测定植物生物量。

在土壤节肢动物取样区周围,使用容积为100 cm<sup>3</sup>的环刀采集0~15 cm土层样品,用于土壤容重测定,剩余混合土样用于土壤速效氮、速效磷、速效钾的测定,测定方法参照《土壤农化分析》<sup>[27]</sup>。使用土壤水分测定仪测定土壤含水量。

### 1.3 数据处理

土壤节肢动物多度分析参考林英华等<sup>[28]</sup>的方法,将个体数量占总采集数量的10%以上者定义为优势类群,占1%~10%者为常见类群,不足1%者为稀有类群。

土壤节肢动物群落 Shannon 多样性指数( $H$ )、Pielou 均匀度指数( $E$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )的计算公式如下:

$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$E = H / \ln S$$

$$D = (S-1) / \ln N$$

式中: $N$ 为总个体数; $S$ 为类群数; $P_i$ 为第*i*种类群个体数在群落总个体数中所占比例。

土壤容重(BD, g·cm<sup>-3</sup>)的计算公式如下:

$$BD = (M_1 - M_2) / V$$

式中: $M_1$ 为铝盒重量(g)+烘干后土壤样品重量(g); $M_2$ 为铝盒重量(g); $V$ 为取样环刀的容积(100 cm<sup>3</sup>)。

数据的统计分析和作图在 Excel 2019、SPSS 22.0、SigmaPlot 12.5、R 语言、Canoco 5 软件中完成。使用 SPSS 22.0 软件利用单因素方差分析(one-way ANOVA)对牦牛单牧、藏羊单牧、无放牧处理之间土壤节肢动物丰富度、多样性及均匀度指数的差异进行分析( $\alpha=0.05$ )。使用 SigmaPlot 12.5 绘制土壤节肢动物功能群类群图。使用 R 语言通过相关性分析分析各处理土壤节肢动物功能群与环境因子之间

的关系。通过“vegan”和“tidyverse”包对土壤节肢动物群落进行非度量多维尺度分析(NMDS)。借助线性模型的冗余分析(redundancy analysis, RDA)研究土壤节肢动物不同类群多度分布与环境因子的关系。通过蒙特卡洛置换检验(Monte-Carlo permutation test)明确各环境因子对土壤节肢动物群落多度的贡献率。

## 2 结果与分析

### 2.1 牦牛和藏羊对土壤节肢动物群落特征的影响

牦牛和藏羊对高寒草甸土壤节肢动物群落组成以及各纲、目、科的多度均产生影响(表2)。本研究获得的土壤节肢动物样本经鉴定隶属4纲8目26科。从土壤节肢动物纲水平看,蛛形纲(Arachnida)在高寒草甸放牧地上占有绝对优势,包括3目8科。从目水平看,真螨目(Acariformes)为优势类群,在藏羊单牧(SG)、牦牛单牧(YG)、无放牧(CK)处理,分别占土壤节肢动物捕获总数量的79.1%、75.9%、81.4%。从科水平看,3个放牧处理土壤节肢动物优势类群主要为螨总科(Acaroidae)和甲螨总科(Oribatida),常见类群数表现为SG(5科)>YG(4科)>CK(2科),而稀有类群数表现为CK(17科)>SG(13科)>YG(12科)。

土壤节肢动物的群落组成及数量在不同放牧处理间具有显著差异(表2)。CK下土壤节肢动物科类群数最高,为21科,占总获得类群数的80.8%,SG、YG处理下土壤节肢动物类群数分别为20和19科,占总类群数的76.9%和73.1%。CK下土壤节肢动物类群不仅多,而且密度最大,为49230头·m<sup>-2</sup>,YG处理下土壤节肢动物密度显著低于CK和SG。不同处理土壤节肢动物群落组成具有一定差异,真螨目、寄螨目(Parasiformes)、弹尾目(Collembola)、缨翅目(Thysanoptera)在不同处理中均有分布,仅弹尾目圆跳科(Sminthurididae)在SG处理未调查到。双尾目(Diplura)原铗蚋科(Projapygidae)为SG处理特有类群,半翅目(Hemiptera)叶蝉科(Cicadellidae)为CK中特有类群,YG处理无特有类群。不同放牧处理间土壤节肢动物多样性指数、均匀度指数表现为YG>SG>CK( $P<0.05$ ),SG处理和CK土壤节肢动物丰富度指数差异显著,与YG处理差异不显著。

通过NMDS对土壤节肢动物群落相似性进行分析(图1),结果表明,SG处理与YG、CK处理土壤节肢动物群落结构差异较大,相似性较小,而YG、



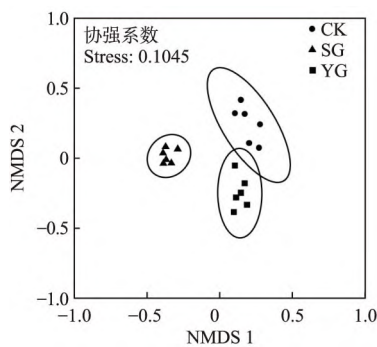
表 2 不同放牧处理土壤节肢动物群落组成、密度和多度  
Table 2 Composition, density and abundance of soil arthropod groups in different grazing treatments

类群(纲/目/科) Group( class/order/family)	功能群 Functional group	处理 Treatment					
		CK		SG		YG	
		密度 Density (ind · m <sup>-2</sup> )	多度 Abundance	密度 Density (ind · m <sup>-2</sup> )	多度 Abundance	密度 Density (ind · m <sup>-2</sup> )	多度 Abundance
蛛形纲 Arachnida							
真螨目 Acariformes							
螨总科 Acaroidae	Om	20638	+++	17367	+++	12490	+++
走螨科 Eupodoidae	Om	362	+	535	++	395	++
隐颚螨科 Cryptognathidae	Om	167	+	295	+	282	+
甲螨总科 Oribatida	Om	18927	+++	19945	+++	14107	+++
寄螨目 Parasiformes							
蜱科 Ixodoidea	Om	308	+	393	+	310	+
寄螨科 Parasitidae	Om	4448	++	2125	++	3860	+++
厉螨科 Laelapidae	Om	225	+	102	+	282	+
蜘蛛目 Araneae							
地蛛科 Atypidae	Pr	48	+			33	+
弹尾纲 Collembola							
弹尾目 Collembola							
圆跳科 Sminthuridae	Om	320	+			283	+
棘跳科 Onychiuridae	Om	383	+	877	++	683	++
等节跳科 Isotomidae	Om	2673	++	4213	++	1832	++
双尾纲 Diplura							
双尾目 Diplura							
原铗叭科 Projapygidae	De			130	+		
昆虫纲 Insecta							
缨翅目 Thysanoptera							
管蓟马科 Phlaeothripidae	Ph	83	+	267	+	67	+
半翅目 Hemiptera							
叶蝉科 Cicadellidae	Ph	13	+				
双翅目 Diptera							
冬大蚊科 Trichoceridae	De	17	+	182	+		
大蚊科 Tipulidae	De	53	+	367	+	185	+
摇蚊科 Chironomidae	De	50	+				
蠓科 Ceratopogonidae	Pr	57	+			363	++
蚋科 Simuliidae	De			117	+	218	+
蕈蚊科 Mycetophilidae	Om	322	+	665	++	185	+
瘿蚊科 Cecidomyiidae	Om	60	+	125	+		
粘蕈蚊科 Cecidomyiidae	Om	37	+				
毛蚊科 Bibionidae	De	40	+	375	+		
长足虻科 Dolichopodidae	Pr			35	+	202	+
蝇科 Muscidae	De			50	+	65	+
粪蝇科 Scathophagidae	De			37	+	85	+
密度 Density (×10 <sup>3</sup> ind · m <sup>-2</sup> )		49.23±0.48a		48.20±0.50a		35.93±0.50b	
Shannon 多样性指数 Shannon diversity index		1.38±0.02c		1.53±0.01b		1.60±0.03a	
Margalef 丰富度指数 Margalef richness index		1.33±0.06b		1.51±0.03a		1.46±0.05ab	
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		0.50±0.01c		0.54±0.00b		0.57±0.01a	
螨类/跳虫 Mites/collembola		13.34		7.97		11.49	

同行不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercase letters in the same row indicated significant difference among different treatments at 0.05 level. CK: 无放牧 No grazing; SG: 藏羊单牧 Tibetan sheep grazing; YG: 牦牛单牧 Yak grazing. 土壤节肢动物多度划分 Soil arthropods abundance classification: +++ 优势类群 Dominant groups ( $>10\%$ ); ++ 常见类群 Common groups ( $1\% \sim 10\%$ ); + 稀有类群 Rare groups ( $<1\%$ ). Ph: 植食性 Phytophagous; Pr: 捕食性 Predatory; Om: 杂食性 Omnivorous; De: 腐食性 Detritivore. 下同 The same below.

CK 处理的土壤节肢动物群落结构特征较为相似,即 YG、CK 处理土壤节肢动物群落之间组织水平及稳定性较为一致。

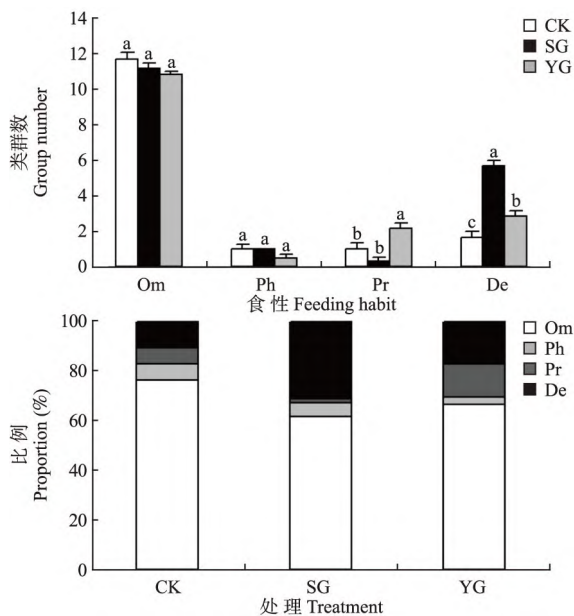
2.2 牦牛和藏羊对土壤节肢动物功能群的影响  
土壤节肢动物功能群类群数在不同放牧处理下具有差异(图2)。杂食性、植食性土壤节肢动物类



**图 1** 不同放牧处理土壤节肢动物群落非度量多维尺度分析(NMDS)

**Fig.1** Non-metric multidimensional scaling analysis (NMDS) of soil arthropods community in different grazing treatments.

CK: 无放牧 No grazing; SG: 藏羊单牧 Tibetan sheep grazing; YG: 牦牛单牧 Yak grazing. 下同 The same below.



**图 2** 不同放牧处理对土壤节肢动物功能群的影响

**Fig.2** Effects of different grazing treatments on functional group of soil arthropods.

不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercase letters indicated significant difference among different treatments at 0.05 level. 下同 The same below. Ph: 植食性 Phytophagous; Pr: 捕食性 Predatory; Om: 杂食性 Omnivorous; De: 腐食性 Detritivore.

群数在 SG、YG、CK 处理间差异不显著,捕食性土壤节肢动物类群数在 YG 处理显著高于 SG 和 CK 处理,而腐食性土壤节肢动物类群数则在 SG 处理最多,CK 最少,且差异显著。

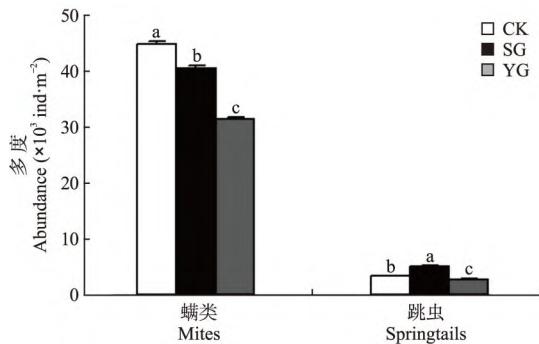
土壤节肢动物功能群比例在不同放牧处理间具有差异(图 2)。杂食性土壤节肢动物数量在 3 个处理下均占有绝对优势(占土壤节肢动物总数的 61.5%~76.1%),主要以真螨目、寄螨目和弹尾目组成,其在总土壤节肢动物中所占比例表现为 CK

(76.1%)>YG (66.3%)>SG (61.5%)。双尾目原铗胝科、双翅目冬大蚊科 (Trichoceridae)、大蚊科 (Tipulidae) 和蕈蚊科 (Mycetophilidae) 是腐食性土壤节肢动物的主要类群,其所占比例为 SG (31.2%)>YG (17.3%)>CK (10.9%)。捕食性土壤节肢动物在 YG 下占比最多 (13.3%),而在 SG 下占比最少 (1.8%),主要类群为双翅目和蜘蛛目。植食性土壤节肢动物占比最少,在 3 个处理下占比均不足 10%,主要以缨翅目管蓟马科 (Phlaeothripidae)、半翅目叶蝉科 (Cicadellidae) 为主。

螨类和跳虫作为高寒草甸土壤节肢动物中最主要的类群,不同放牧处理对土壤螨类、跳虫影响不同(图 3),放牧牦牛和藏羊显著降低了土壤螨类的多度。

**2.3 土壤节肢动物群落与环境因子之间的关系**

由表 3 可知,不同放牧处理下,杂食性土壤节肢



**图 3** 不同放牧处理对螨类和跳虫多度的影响

**Fig.3** Effects of different grazing treatments on the abundance of mites and springtails.

**表 3** 不同放牧处理下土壤节肢动物功能群与环境因子的相关系数

**Table 3** Correlation coefficients between soil arthropod functional groups and environmental factors in different grazing treatments

环境因子 Environmental factor	Om	Ph	Pr	De
AN	-0.229	0.617 **	-0.007	0.923 **
AP	0.134	0.766 **	0.328	0.950 **
AK	0.595 **	-0.124	-0.356	-0.553 *
SM	-0.593 **	-0.152	0.385	-0.073
BD	0.098	0.733 **	-0.322	0.908 **
CO	0.583 *	0.408	-0.360	0.112
BI	0.289	0.129	-0.131	-0.124
HE	0.599 **	-0.279	-0.405	-0.541 *
RI	-0.050	0.032	-0.096	0.140

AN: 土壤速效氮 Soil available nitrogen; AP: 土壤速效磷 Soil available phosphorus; AK: 土壤速效钾 Soil available potassium; SM: 土壤含水量 Soil moisture; BD: 土壤容重 Soil bulk density; CO: 群落盖度 Community coverage; BI: 植物生物量 Plant biomass; HE: 植株平均高度 Plant average height; RI: 物种数 Species number. \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ . 下同 The same below.

动物与土壤速效钾、植株平均高度呈显著正相关,与土壤含水量呈显著负相关,与群落盖度呈正相关;植食性土壤节肢动物与土壤速效氮、速效磷、容重呈显著正相关;腐食性土壤节肢动物与土壤速效氮、速效磷、容重呈显著正相关,与土壤速效钾、植株平均高度呈负相关。

首先对各环境因子进行共线性筛选,然后对各放牧处理下土壤节肢动物多度与环境因子进行冗余分析(表4),结果表明土壤节肢动物多度与环境因子在轴1和轴2的相关系数为0.9729和0.9336,轴1和轴2的特征值占总特征值的69.0%(轴1特征值为48.7%,轴2特征值为20.3%)。蒙特卡洛检验表明,环境因子对土壤节肢动物的影响显著,即环境因子可以较好地解释土壤节肢动物的整体变化。

由表5和图4可知,土壤容重、土壤速效钾和土壤速效氮对土壤节肢动物多度影响显著,其贡献率分别为53.1%、21.7%和7.4%。与第1排序轴相关性较大的环境因子是土壤容重和土壤速效氮;与第2排序轴相关性较大的环境因子是土壤速效钾。土壤容重对走螨科、蜱科影响较大,土壤速效钾对摇蚊

表4 不同放牧处理下土壤节肢动物多度与环境因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients for soil arthropod functional groups and environmental factors in different grazing treatments

项目 Item	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2	轴3 Axis 3	轴4 Axis 4
特征值 Eigenvalue	0.487	0.203	0.038	0.027
累计解释率 Cumulative explained (%)	48.7	69.0	72.8	75.5
相关系数 Correlation coefficient	0.9729	0.9336	0.9462	0.8675

表5 环境因子对不同放牧处理下土壤节肢动物群落组成相对贡献

Table 5 Relative contribution of environmental factors to soil arthropod community composition in different grazing treatments

项目 Item	解释率 Explanation (%)	贡献率 Contribution (%)	F	P
BD	43.0	53.1	12.1	0.002
AK	17.6	21.7	6.7	0.002
AN	6.0	7.4	2.5	0.022
HE	3.9	4.8	1.7	0.092
SM	3.5	4.3	1.6	0.120
RI	3.2	4.0	1.6	0.144
BI	1.7	2.1	0.8	0.590
CO	2.1	2.6	1.0	0.460

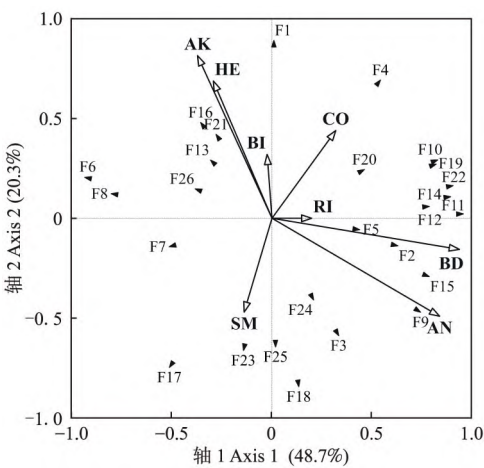


图4 土壤节肢动物群落组成与环境因子关系的冗余分析(RDA)

Fig.4 Redundancy analysis (RDA) between soil arthropods community composition and environmental factors.

F1: 螨总科 Acaroidae; F2: 走螨科 Eupodidae; F3: 隐颚螨科 Cryptognathidae; F4: 甲螨总科 Oribatida; F5: 蜱科 Ixodoidea; F6: 寄螨科 Parasitidae; F7: 厉螨科 Laelapidae; F8: 圆跳科 Sminthuridae; F9: 棘跳科 Onychiuridae; F10: 等节跳科 Isotomidae; F11: 原铗跳科 Propjapygidae; F12: 管蓟马科 Phlaeothripidae; F13: 叶蝉科 Cicadellidae; F14: 冬大蚊科 Trichoceridae; F15: 大蚊科 Tipulidae; F16: 摇蚊科 Chironomidae; F17: 蠓科 Ceratopogonidae; F18: 蚋科 Simuliidae; F19: 蕈蚊科 Mycetophilidae; F20: 瘿蚊科 Cecidomyiidae; F21: 粘蕈蚊科 Sciopodidae; F22: 毛蚊科 Bibionidae; F23: 长足虻科 Dolichopodidae; F24: 蝇科 Muscidae; F25: 粪蝇科 Scathophagidae; F26: 地蛛科 Atypidae. AN: 土壤速效氮 Soil available nitrogen; AP: 土壤速效磷 Soil available phosphorus; AK: 土壤速效钾 Soil available potassium; SM: 土壤含水量 Soil moisture; BD: 土壤容重 Soil bulk density; CO: 群落盖度 Community coverage; BI: 植物生物量 Plant biomass; HE: 植株平均高度 Plant average height; RI: 物种数 Species number.

科、粘蕈蚊科影响较大,土壤速效氮对棘跳科影响较大。螨总科多度与第2排序轴呈正相关,甲螨总科多度与第1、2排序轴呈正相关。

3 讨论

3.1 牦牛和藏羊对土壤节肢动物群落特征的影响

土壤节肢动物的类群数、多度在不同放牧处理间存在差异,这与高寒草甸在牦牛和藏羊影响下形成的植物群落、土壤环境以及为土壤节肢动物提供的食物资源和生存环境有关。与无放牧处理相比,放牧牦牛、藏羊对土壤节肢动物类群数的增加起积极作用,但使土壤节肢动物多度降低。导致该现象的原因可能是与无放牧处理相比,在牦牛单牧、藏羊单牧处理下家畜排泄物增加,提高了植物群落的复杂性<sup>[29-30]</sup>,为土壤节肢动物提供了丰富的食物资源和多元的生存环境。

放牧是高寒草甸最主要的一种利用方式<sup>[31]</sup>,对于草地造成的影响主要表现为地上生物量降低、枯



落物量减少,土壤容重增加、土壤孔隙减少,也使植物组成发生变化<sup>[32]</sup>。植物群落是影响土壤节肢动物群落组成的重要因素,不同植物群落营养物质存在较大差异,可以为土壤节肢动物提供多种食物资源<sup>[33]</sup>,当植物群落多样性降低时,土壤节肢动物多样性及复杂性均会随之降低<sup>[34]</sup>,放牧还通过影响土壤理化特性对土壤节肢动物多样性产生间接影响<sup>[35-36]</sup>。研究表明,在中等放牧强度下,土壤节肢动物多样性最高<sup>[37-38]</sup>。本研究发现,在牧草利用率50%左右,即同一放牧强度下,与无放牧相比,放牧牦牛和藏羊均能提高土壤节肢动物的多样性,其原因可能是牦牛、藏羊的排泄行为和践踏作用加快植物残体向土壤归还养分的速率,为土壤节肢动物提供了更大的生存空间。

### 3.2 牦牛和藏羊放牧对土壤节肢动物功能群的影响

杂食性、植食性土壤节肢动物类群数在不同放牧处理间差异不显著,说明牦牛和藏羊对土壤节肢动物功能群影响有限,也从侧面反映出高寒草甸土壤食物网稳定性较强。此外,放牧家畜使草地植物群落发生改变,对土壤节肢动物食谱也产生相应的影响。本研究中,藏羊单牧和牦牛单牧显著增加了以双尾目、双翅目为主的腐食性土壤节肢动物的类群数,这可能是由于腐食性土壤节肢动物以分解后的动植物残体、枯落物为食<sup>[39]</sup>,而牦牛和藏羊的践踏作用提高了枯落物归还土壤的速率,加快腐殖质的形成<sup>[40]</sup>,为腐食性土壤节肢动物提供更多的食物资源。另外,植食性土壤节肢动物与捕食性土壤节肢动物类群数呈现此消彼长的趋势,原因是捕食性土壤节肢动物有一部分食物来源是植食性土壤节肢动物<sup>[41]</sup>,两者的数量和类群数会维持在一个较稳定的水平。此外,螨类和跳虫多度在不同放牧处理下变化不同,从侧面体现出放牧对螨类及跳虫组成的分解食物网具有影响。

## 4 结 论

牦牛和藏羊对青藏高原高寒草甸土壤节肢动物群落组成、结构等均具有明显影响。放牧会降低土壤节肢动物多度,但会提高土壤节肢动物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数。放牧家畜不同,土壤节肢动物群落结构发生明显的变化。土壤容重、土壤速效钾和土壤速效氮是影响土壤节肢动物群落组成的主要环境因子。不同放牧家畜影响下,土壤节肢动物群落及土壤生态系统均会发生相应的变化,

因此,研究地上与地下间的相互作用对于调控草地生态系统具有重要意义,在未来工作中应在多尺度、多时间序列上对土壤节肢动物群落展开研究。

### 参考文献

- [1] 陈槐,鞠佩君,张江,等. 青藏高原高寒草地生态系统变化的归因分析. 科学通报, 2020, **65**(22): 2406-2418
- [2] Wang L, Delgado-Baquerizo M, Wang DL, et al. Diversifying livestock promotes multidiversity and multifunctionality in managed grasslands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**: 6187-6192
- [3] Eldridge DJ, Poore AGB, Ruiz-Colmenero M, et al. Ecosystem structure, function and composition in rangelands are negatively affected by livestock grazing. *Ecological Applications*, 2016, **26**: 1273-1283
- [4] 任强,艾鹭,胡健,等. 不同强度牦牛放牧对青藏高原高寒草地土壤和植物生物量的影响. 生态学报, 2021, **41**(17): 6862-6870
- [5] 陈蔚,刘任涛,常海涛,等. 放牧对草地枯落物分解和土壤动物群落及其相互关系的影响. 生态学杂志, 2020, **39**(10): 3482-3491
- [6] 郭建英,董智,李锦荣,等. 放牧强度对荒漠草原土壤物理性质及其侵蚀产沙的影响. 中国草地学报, 2019, **41**(3): 74-82
- [7] Krzic M, Broersma K, Thompson DJ, et al. Soil properties and species diversity of grazed crested wheatgrass and native rangelands. *Journal of Range Management*, 2000, **53**: 353-358
- [8] 马尚飞,红梅,赵巴音那木拉,等. 模拟氮沉降对草甸草原中小型土壤节肢动物群落的影响. 土壤, 2021, **53**(4): 755-763
- [9] 邱月,吴鹏飞,魏雪. 三种人工草地小型土壤节肢动物群落多样性动态及其差异. 草业学报, 2020, **29**(5): 21-32
- [10] Seastedt TR, Crossley DA. Influence of arthropods on ecosystems. *Bioscience*, 1984, **34**: 157-161
- [11] Whitford WG. The importance of the biodiversity of soil biota in arid ecosystems. *Biodiversity & Conservation*, 1996, **5**: 185-195
- [12] 臧建成,孙涛,洪大伟,等. 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
- [13] Maryam KJ, Alireza S, Mohammad A, et al. Oribatid mite communities in contaminated soils nearby a lead and zinc smelting plant in Zanjan, Iran. *Systematic & Applied Acarology*, 2015, **20**: 251-262
- [14] 刘继亮,赵文智,李锋瑞,等. 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
- [15] Hans S, Felix L, Karl A. Nutrient redistribution by grazing cattle drives patterns of topsoil N and P stocks in a low-input pasture ecosystem. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, **88**: 183-195
- [16] Peter D, John S, David IM, et al. The effects of live-

- stock grazing on foliar arthropods associated with bird diet in upland grasslands of Scotland. *Journal of Applied Ecology*, 2008, **45**: 279–287
- [17] Mikola J, Setälä H, Virkajärvi P, *et al.* Defoliation and patchy nutrient return drive grazing effects on plant and soil properties in a dairy cow pasture. *Ecological Monographs*, 2009, **79**: 221–244
- [18] Wang JZ, Wang DL, Li CQ, *et al.* Feces nitrogen release induced by different large herbivores in a dry grassland. *Ecological Applications*, 2018, **28**: 201–211
- [19] 孙彩彩, 董全民, 刘文亭, 等. 放牧方式对青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落结构和多样性的影响. *草业学报*, 2022, **31**(2): 62–75
- [20] Yang XX, Dong QM, Chu H, *et al.* Different responses of soil element contents and their stoichiometry (C:N:P) to yak grazing and Tibetan sheep grazing in an alpine grassland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, **285**: 106628
- [21] 《土壤动物研究方法手册》编写组. 土壤动物研究方法手册. 北京: 中国林业出版社, 1998
- [22] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998
- [23] 李鸿兴, 隋敬之, 周士秀, 等. 昆虫分类检索. 北京: 中国农业出版社, 1987
- [24] 李隆术, 李云端. 蜚蠊学. 重庆: 重庆出版社, 1989: 64–277
- [25] Holtkamp R, Kardol P, van Der Wal A, *et al.* Soil food web structure during ecosystem development after land abandonment. *Applied Soil Ecology*, 2008, **39**: 23–34
- [26] 林英华, 孙家宝, 刘海良, 等. 黑龙江帽儿山土壤动物群落组成与多样性分析. *林业科学*, 2006, **42**(4): 71–77
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000
- [28] 林英华, 张夫道, 杨学云, 等. 农田土壤动物与土壤理化性质关系的研究. *中国农业科学*, 2004, **37**(6): 871–877
- [29] Zhu H, Wang DL, Wang L, *et al.* The effects of large herbivore grazing on meadow steppe plant and insect diversity. *Journal of Applied Ecology*, 2012, **49**: 1075–1083
- [30] Lobo JM, Hortal J, Cabrero-Sañudo FJ. Regional and local influence of grazing activity on the diversity of a semi-arid dung beetle community. *Diversity and Distributions*, 2006, **12**: 111–123
- [31] 郑大川, 周杰, 李思雨, 等. 耕地和林地土壤动物群落组成和多样性的差异——中国区域的整合分析. *生态学报*, 2021, **41**(17): 6718–6727
- [32] 侯扶江, 常生华, 于应文, 等. 放牧家畜的践踏作用研究评述. *生态学报*, 2004, **24**(4): 784–789
- [33] 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 等. 基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1131–1137
- [34] Eisenhauer N, Migunova VD, Ackermann M, *et al.* Changes in plant species richness induce functional shifts in soil nematode communities in experimental grassland. *PLoS One*, 2018, **6**(9): e24087
- [35] Cakir M, Makineci E. Humus characteristics and seasonal changes of soil arthropod communities in a natural sessile oak (*Quercus petraea* L.) stand and adjacent Austrian pine (*Pinus nigra* Arnold) plantation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**: 8943–8955
- [36] 罗金明, 尹雄锐, 叶雅杰, 等. 大中型土壤动物对内陆盐沼沿退化序列环境的指示研究. *草业学报*, 2014, **23**(2): 287–295
- [37] 武崎, 吴鹏飞, 王群, 等. 放牧强度对高寒草地不同类群土壤动物的群落结构和多样性的影响. *中国农业科学*, 2016, **49**(9): 1826–1834
- [38] 肖红艳, 刘红, 李波, 等. 放牧干扰对亚高山草甸土壤动物群落影响的研究. *草业学报*, 2012, **21**(2): 26–33
- [39] 何振. 南方不同森林类型土壤节肢动物多样性研究. 博士论文. 北京: 中国林业科学研究院, 2018
- [40] 宋美娟, 徐长林, 王琳, 等. 放牧家畜对东祁连山高寒灌丛草地枯落物层及水文功能的影响. *草业科学*, 2021, **38**(9): 1683–1693
- [41] 李琦聪. 不同施肥措施对土壤微节肢动物群落特征及其摄食活性的影响. 硕士论文. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022

作者简介 孙彩彩, 女, 1998 年生, 博士研究生。主要从事地下生态学研究。E-mail: 1084399203@qq.com

责任编辑 肖 红