

DOI:10.11686/cyxb2021309

http://cyxb.magtech.com.cn

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.

SUN Cai-cai, DONG Quan-min, LIU Wen-ting, *et al.* Effects of grazing modes on the community structure and diversity of soil arthropod in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 62—75.

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

孙彩彩, 董全民, 刘文亭, 冯斌, 时光, 刘玉祯, 俞旻, 张春平, 张小芳, 李彩弟, 杨增增, 杨晓霞*

(青海省畜牧兽医科学院, 青海大学, 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:土壤节肢动物作为土壤生态系统的重要组成部分,对于周围环境的变化十分敏感,可作为环境变化的“指示剂”。放牧作为青藏高原地区高寒草地的主要利用方式,不仅影响土壤理化性质,同时会对生物多样性产生影响,进而影响到以土壤为主要生存场所的土壤节肢动物。为了明确不同放牧家畜及其混合比例对青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落结构及多样性的影响,于2020年7月在青海省海北州海晏县西海镇“高寒草地一家畜系统适应性管理技术平台”,设置中等放牧强度下牦牛单牧(YG)、藏羊单牧(SG)、牦牛藏羊1:2混合放牧(MG1:2)、牦牛藏羊1:4混合放牧(MG1:4)和牦牛藏羊1:6混合放牧(MG1:6)5个放牧样地,以无放牧(CK)为对照样地,采集0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm的土样,利用干漏斗法(Tullgren法)分离土壤节肢动物,并进行鉴定统计。结果表明:1)试验样地分离得到的土壤节肢动物优势类群为螨总科(Acaroidae)和甲螨总科(Oribatida),分别占土壤节肢动物总捕获量的36.67%和41.14%,且在0~5 cm土层数量最多,具有表聚性;2)不同放牧方式对土壤节肢动物的组成、群落结构、密度及多样性存在不同的影响。与对照相比,放牧降低了土壤节肢动物优势类群螨总科的组成比例,而增加了甲螨总科的组成比例;无放牧样地与其他放牧方式样地土壤节肢动物群落结构存在明显差异;土壤节肢动物丰富度指数、多样性指数、类群数均表现为藏羊单牧放牧样地较高,而均匀度指数与之相反;3)土壤节肢动物均匀度指数与土壤全氮、全碳、速效钾呈显著负相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$),而与有机质、pH呈显著正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$);土壤节肢动物丰富度指数与土壤pH呈显著负相关,而与土壤全氮、速效氮、有机质呈显著正相关;土壤节肢动物多样性指数与土壤pH呈显著负相关,而与土壤全氮、速效氮、速效磷、有机质呈显著正相关;土壤节肢动物平均密度、总类群数与土壤pH呈显著负相关,而与土壤全氮、速效氮、速效钾、有机质呈显著正相关;4)土壤全氮、全磷、全碳、速效氮、速效磷在藏羊单牧放牧样地较高;速效钾、有机质在无放牧样地最高;pH、土壤含水量在牦牛藏羊1:6混合放牧样地最高。综上所述,在青藏高原高寒草地生态系统,藏羊单牧对于土壤节肢动物密度、群落组成以及群落多样性的提高具有正向作用。

关键词:高寒草地;放牧方式;土壤节肢动物;群落结构及多样性

Effects of grazing modes on the community structure and diversity of soil arthropod in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau

SUN Cai-cai, DONG Quan-min, LIU Wen-ting, FENG Bin, SHI Guang, LIU Yu-zhen, YU Yang, ZHANG Chun-ping, ZHANG Xiao-fang, LI Cai-di, YANG Zeng-zeng, YANG Xiao-xia*

Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Qinghai Provincial Key Laboratory of Adaptive

收稿日期:2021-08-11;改回日期:2021-09-27

基金项目:青海省科技厅创新团队项目(2021-ZJ-901),青海省科技厅创新平台建设专项(2020-ZJ-T07),国家自然科学基金联合基金项目(U20A2007)和国家自然科学基金地区科学基金项目(32160343)资助。

作者简介:孙彩彩(1998-),女,内蒙古乌兰察布人,在读硕士。E-mail:1084399203@qq.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail:xyyang@qhu.edu.cn

Management on Alpine Grassland, Xining 810016, China

Abstract: Soil arthropods are an important component of the soil ecosystem and have been used as “indicators” of environmental change, because of their sensitivity to changes in the surrounding environment. Grazing is the main use of alpine grassland in the Qinghai—Tibet Plateau. Grazing affects both the physical and chemical properties of the soil, and also the biodiversity, including soil arthropods. This research investigated changes in the soil arthropod community structure and diversity associated with grazing by different animal species. Soil arthropods were sampled in July 2020 from a grazing experiment in an alpine meadow on the Qinghai—Tibetan Plateau. The grazing experiment included two single-species grazing treatments (yak only and Tibetan sheep only; YG, SG), three mixed-grazing (MG) treatments (yak: Tibetan sheep ratios of 1:2, 1:4 and 1:6) and an ungrazed control treatment (CK). Soil samples were collected from 0—5 cm, 5—10 cm, and 10—15 cm soil depths, and the soil arthropods were separated by the dry funnel (Tullgren) method, identified, and the data statistically analysed. It was found that: 1) Of the total sampled soil arthropod population, 36.67% belonged to the taxonomic family Acaroidae and 41.14% belonged to the family Oribatida. The highest densities of arthropods were found in the 0—5 cm soil layer. 2) The composition, community structure, density and diversity of the soil arthropod communities differed between the animal species grazing treatments. Compared with the control, grazing decreased the proportion of Acaroidae, but increased the proportion of Oribatida in the soil arthropod population. There were significant differences in soil arthropod community structure between CK plots and grazed plots. The species richness index, diversity index and the number of soil arthropods were highest, and the evenness index was lowest in the Tibetan sheep grazing treatment. 3) Soil arthropod evenness index was negatively correlated with soil total nitrogen, total carbon and available potassium ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), but positively correlated with soil organic matter and pH ($P < 0.05$ or $P < 0.01$); soil arthropod richness index was negatively correlated with soil pH, but positively correlated with soil total nitrogen, available nitrogen and organic matter contents. Soil arthropod diversity index was negatively correlated with soil pH, but positively correlated with soil total nitrogen, available nitrogen, available phosphorus and organic matter contents. The mean density and the number of groups of soil arthropods were negatively correlated with soil pH, but positively correlated with soil total nitrogen, available nitrogen, available potassium and organic matter. 4) Soil total nitrogen, total phosphorus, total carbon, available nitrogen and available phosphorus levels were higher in the SG treatment. Available phosphorus and organic matter were highest in the CK plots. Soil water content and pH were highest in the MG1:6 treatment. In summary, only Tibetan sheep grazing had a positive effect in increasing soil arthropod density, community composition and community diversity in the alpine grassland ecosystem of the Qinghai—Tibetan Plateau.

Key words: alpine meadow; grazing modes; soil arthropods; community structure and diversity

土壤动物是指部分或全部生命活动在土壤中度过,同时对土壤产生一定影响的动物^[1]。土壤动物作为草地生态系统中数量多、分布范围广、对环境变化最敏感的一类生物,参与草地生态系统的多个过程,被亲切地誉为“草地生态系统工程师”^[2]。土壤节肢动物群落结构不仅受不同种植种类牧草干扰的影响,同时受土壤状况、土壤含水量及 pH 等各方面影响,随种植牧草种类的改变,土壤节肢动物优势群落也发生转变^[3]。放牧作为高寒草地的主要利用方式,不仅可为食草家畜提供食物进而转化为第二性生产力,同时与草地健康息息相关,进而实现高寒草地可持续利用发展^[4]。因此,研究放牧对土壤动物的影响对稳定和保护草地生态系统尤为重要。目前,已有学者研究了关于放牧对土壤动物多方面的影响,如群落结构、多样性等。武崎等^[5]阐述了不同放牧强度下高寒草地不同类群土壤动物(地表节肢动物、土壤节肢动物、土壤线虫)群落结构及多样性的变化趋势,即重度放牧有利

于地表节肢动物存活,中度放牧有利于土壤节肢动物存活,轻度放牧则有利于土壤线虫存活,该研究表明随放牧强度的增加,家畜排泄物增加,而这些排泄物为土壤动物提供更多的养分,同时,家畜对植物的采食有利于幼嫩组织的形成,进而吸引更多的土壤动物。而肖红艳等^[6]对亚高山草甸的研究表明,大型和中小型土壤动物的密度对放牧强度干扰存在不同响应,在中度放牧条件下,中小型土壤动物密度最大,而大型土壤动物密度最小,此外,土壤动物的密度会随土层深度的增加而递减,其中,在中度放牧干扰下,土壤动物表聚性最强。研究还发现放牧季节对土壤动物数量及群落组成具有显著影响,秋季放牧土壤动物个体数量远远高于春季,对植食性土壤动物影响尤为显著^[7-8]。当前虽然对高寒草地放牧与土壤动物的关系展开了相关研究^[5],但是关于不同畜种(牦牛、藏羊)放牧对土壤节肢动物影响的研究还鲜有报道。

青藏高原是全球高寒草地分布的主要区域,也是全球生物多样性保护的34个重点地区之一^[9]。目前关于土壤动物的研究大多集中在内蒙古草原^[8]、四川省高寒草地^[5]、内蒙古科尔沁沙地^[10]等地,在青藏高原关于土壤动物的研究较少。据已有研究发现,青藏高原高寒草地大型、中小型土壤动物类型十分丰富,并且与土壤、植物、环境存在密切的联系,大型土壤动物在维护和稳定草地生态平衡中发挥不可估量的作用^[11],中小型土壤动物对周围环境变化十分敏感,因此可作为环境变化的“指示剂”^[12]。然而,以往的研究大多关注放牧强度^[13-14],且为单一畜种放牧^[8]。有研究发现,不同放牧家畜种类对草地的结构以及功能具有重要影响^[15]。当前在青藏高原高寒草地,牧民更倾向于在同一块草地将不同比例的当地放牧家畜(牦牛、藏羊)进行混合放牧^[16],然而,尚不清楚家畜物种的混合如何影响高寒草地生态系统的结构和功能。土壤节肢动物是草地生态系统的重要组成部分,其在土壤物质循环、改善土壤结构等方面发挥着重要作用^[17]。因此,本研究在青藏高原高寒草地开展了不同放牧家畜(牦牛放牧、藏羊放牧及牦牛藏羊不同比例混合放牧)试验,旨在研究:1)明确牦牛放牧和藏羊放牧对土壤节肢动物群落结构及多样性的影响;2)如果家畜种类对土壤节肢动物群落结构的影响有显著差异,那么牦牛、藏羊以不同比例混合放牧对土壤节肢动物群落结构及多样性的影响如何?本研究可为准确评价放牧对高寒草地生态系统的影响提供可靠依据,促进青藏高原地区生态、经济的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于青海省海北州海晏县西海镇(36°92' N, 100°93' E),海拔3150 m。该地属于高原山地气候,日夜温差大,无绝对无霜期,年平均温度1.5℃,最热7月平均气温12.5℃,最冷1月平均气温-12.9℃。降水主要集中在5—9月,年平均降水量400 mm。该试验点主要生长植物有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、干生苔草(*Carex aridula*)、早熟禾(*Poa annua*)和星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)等。土壤为砂壤土^[18]。

1.2 样地设计

试验样地建立于2014年,设有6个放牧处理,分别为:无放牧(no grazing, CK, 0.05 hm²)、牦牛单牧(yak grazing, YG, 0.26 hm²)、藏羊单牧(tibetan sheep grazing, SG, 0.17 hm²)、牦牛藏羊1:2混合放牧(mixed-grazing with ratios of yak to Tibetan sheep as 1:2, MG1:2, 0.43 hm²)、牦牛藏羊1:4混合放牧(MG1:4, 0.60 hm²)、牦牛藏羊1:6混合放牧(MG1:6, 0.76 hm²),每小区3个重复,共计18个试验小区。由于该试验设计是为了研究家畜类型及其混合比例对草地生态系统结构和功能的影响,因此所有处理采用相同的放牧强度,即中等放牧强度(11.6羊单位·hm⁻²)。于每年暖季(6月)开始放牧,至冷季(10月)结束放牧^[19-20]。于2020年7月25日即连续放牧第7年开展本试验。

1.3 样品的采集与测定

2020年7月25日对6个放牧方式样地的土壤节肢动物进行取样调查。每个放牧小区设置6个采样点,采用直径5 cm的土钻按照0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm进行分层取样,将每一层的6个土壤样品进行混合,从中取2份100 g的土壤样品进行分离鉴定,共采集土样216份。采集的新鲜土样在24 h内于实验室采用干漏斗法(Tullgren法^[4])分离土壤节肢动物,分离时间为48 h,温度控制在35℃左右,使用75%的医用酒精保存分离得到

的土壤动物样品,短期内完成土壤节肢动物鉴定工作。

收集到的土壤动物标本在倒置显微镜(Leica DM4000B,德国)、体式显微镜(Olympus SZX16,日本)下进行鉴定,主要参照《中国土壤动物检索图鉴》^[21]、《昆虫分类检索》^[22]等书进行鉴定,同时统计个体数量。

在进行土壤动物取样的同一天,于土壤节肢动物取样区周围,在相应土层,即 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm 进行土壤取样,每层 3 钻,将土样混合,所采土样用于测定土壤理化性质,包括土壤全氮、全磷、全碳、速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量和 pH,采用土壤水分测定仪(霍尔德 HED-SW,山东)测定土壤含水量。测定方法主要参照《土壤农业化学分析方法》^[23]。

1.4 数据分析

土壤节肢动物多度分析:按照林英华等^[24]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。

通过以下数据分析土壤节肢动物群落多样性。具体计算公式如下:

Shannon—Weinner 多样性指数:

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

Pielou 均匀度指数: $E = H / \ln S$

Margalef 丰富度指数: $D = (S - 1) / \ln N$

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。

使用 IBM SPSS 22.0 通过单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同放牧方式下土壤节肢动物类群数、丰富度、多样性及均匀度间的差异进行分析。使用 RStudio 通过双因素方差分析(two-way ANOVA)对牦牛和藏羊影响下土壤节肢动物数量之间的差异进行分析。通过主成分分析法(principal component analysis, PCA)对不同放牧方式样地的土壤节肢动物群落进行排序,分析土壤节肢动物群落组成结构的差异性。通过相关性分析(correlation analysis)明确土壤节肢动物群落多样性与土壤理化特性的关系。

2 结果与分析

2.1 不同放牧方式样地土壤理化特性

不同放牧方式样地的土壤理化特性具有一定差异(表 1)。不同放牧方式样地的土壤全氮、有机质、pH 以及土壤含水量均无显著差异;土壤全磷含量在 SG 放牧样地最高,在 MG1:4 放牧样地最低;土壤全碳含量在 CK 和 MG1:4 放牧样地较高;而 SG 放牧样地速效氮、速效磷含量显著高于其他放牧样地($P < 0.05$);CK 放牧样地速效钾含量最高,显著高于其他放牧样地

表 1 不同放牧方式样地的土壤理化特性

Table 1 Soil physical and chemical properties under different grazing treatments

处理 Treat- ment	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	全碳 Total carbon (g·kg ⁻¹)	速效氮 Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phospho- rus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	pH	土壤含水量 Soil water content (%)
MG1:2	3.151±0.061a	0.158±0.004abc	39.849±0.662b	144.333±1.700c	4.278±0.022b	109.180±4.486b	45.953±2.212a	8.002±0.013a	15.948±2.094a
MG1:4	3.260±0.051a	0.150±0.004c	42.653±0.553a	155.556±1.425b	3.503±0.071d	96.867±5.051bc	49.223±3.292a	7.987±0.017a	16.031±0.578a
MG1:6	3.261±0.104a	0.159±0.003ab	41.590±0.918ab	158.111±1.961b	4.246±0.029b	86.396±4.641cd	47.637±2.253a	8.071±0.044a	20.050±1.040a
SG	3.382±0.097a	0.163±0.002a	42.149±0.954ab	166.222±2.727a	4.527±0.036a	81.886±5.027d	46.508±3.264a	7.984±0.025a	16.978±0.733a
YG	3.159±0.079a	0.155±0.002abc	39.778±0.666b	155.111±1.207b	3.703±0.049c	77.358±4.134d	47.764±2.240a	8.026±0.027a	19.755±2.643a
CK	3.110±0.152a	0.152±0.003bc	42.372±0.956a	135.667±1.374d	3.449±0.041d	124.677±5.365a	52.244±2.399a	8.010±0.041a	19.755±2.643a

注:数据为平均值±标准误差。同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Data were mean±standard error. Different lowercase letters within the same column indicated significant differences at $P < 0.05$ level.

($P<0.05$)。

2.2 土壤节肢动物群落组成

在研究样地上,分离得到的土壤节肢动物经鉴定隶属于4纲8目28科(表2)。其中以真螨目(Acariformes)的螨总科(Acaroidae)和甲螨总科(Oiibatida)为优势类群,分别占土壤节肢动物总捕获量的36.67%和41.14%;常见类群共有3科,为寄螨科(Parasitoidae)、等节跳科(Isotomidae)和蕈蚊科(Mycetophilidae),分别占土壤节肢动物总捕获量的6.09%、8.05%和1.08%;而其他23科稀有类群共占土壤节肢动物总捕获量的6.97%。

表2 试验样地土壤节肢动物组成
Table 2 Composition of soil arthropod in experimental places

纲 Class	目 Order	科 Family	占比 Proportion (%)
蛛形纲 Arachnida	真螨目 Acariformes	螨总科 Acaroidae	36.67
		走螨总科 Eupodoidae	0.84
		隐额螨科 Cryptognathidae	0.50
		甲螨总科 Oiibatida	41.14
	寄螨目 Parasiformes	蜱科 Ixodidae	0.76
		寄螨科 Parasitoidae	6.09
		厉螨科 Laelapidae	0.31
	蜘蛛目 Araneae	地蛛科 Atypidae	0.06
弹尾纲 Collembola	弹尾目 Collembola	吉圆跳科 Yosiides	0.26
		棘跳科 Onychiuridae	1.33
		等节跳科 Isotomidae	8.05
双尾纲 Diplura	双尾目 Diplura	原铗蛄科 Projapygidae	0.18
昆虫纲 Insecta	缨翅目 Thysanoptera	管蓟马科 Phlaeothripida	0.54
	半翅目 Hemiptera	叶蝉科 Cicadellidae	0.04
	双翅目 Diptera	冬大蚊科 Trichoceridae	0.16
		大蚊科 Tipulidae	0.47
		摇蚊科 Chironomidae	0.02
		蠓科 Ceratopogonidae	0.23
		蚋科 Simuliidae	0.29
		蕈蚊科 Mycetophilidae	1.08
		瘿蚊科 Cecidomyiidae	0.10
		粘蕈蚊科 Cecidomyiidae	0.02
		毛蚊科 Bibionidae	0.46
		长角毛蚊科 Hesperinidae	0.01
		长足虻科 Dolichopodidae	0.12
		蝇科 Muscidae	0.12
		粪蝇科 Scathophagidae	0.15
		扁足蝇科 Platypezide	0.01

2.3 不同放牧方式对土壤节肢动物群落数量和组成的影响

2.3.1 不同放牧方式下土壤节肢动物的数量特征 除双尾目、缨翅目、半翅目以及蜘蛛目外,牦牛和藏羊单独放牧及其混合放牧均对各土壤节肢动物类群产生影响(表3)。在0~5 cm土层,寄螨目(Parasiformes)、弹尾目(Collembola)数量受牦牛放牧、藏羊放牧以及两者混合放牧影响显著($P<0.01$);真螨目(Acariformes)受牦牛放牧及牦牛藏羊混合放牧影响显著($P<0.01$);缨翅目(Thysanoptera)、双翅目(Diptera)、蜘蛛目(Araneae)受藏羊放牧影响显著($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。在5~10 cm土层,真螨目、寄螨目受牦牛放牧、藏羊放牧以及两者混合放牧影响显著($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。

表 3 放牧方式对土壤节肢动物数量影响的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA analysis of the influence of grazing modes on the number of soil arthropods

变量 Variables	处理 Treatment	土层 Soil layer		
		0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm
真螨目 Acariformes	牦牛 Yak	102.45**	36.23**	112.73**
	藏羊 Tibetan sheep	1.42	16.67**	215.90**
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	20.41**	64.37**	187.12**
寄螨目 Parasiformes	牦牛 Yak	14.35**	9.26**	7.66**
	藏羊 Tibetan sheep	101.81**	243.39**	66.78**
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	76.71**	76.66**	27.43**
弹尾目 Collembola	牦牛 Yak	16.73**	12.25**	28.15**
	藏羊 Tibetan sheep	25.74**	0.72	13.17**
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	18.22**	4.38*	0.07
双尾目 Diplura	牦牛 Yak	4.73*	0.15	/
	藏羊 Tibetan sheep	12.67**	0.93	/
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	0.14	1.15	/
缨翅目 Thysanoptera	牦牛 Yak	1.30	6.12	/
	藏羊 Tibetan sheep	6.65*	5.83*	/
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	1.04	0.00*	/
半翅目 Hemiptera	牦牛 Yak	0.04	/	/
	藏羊 Tibetan sheep	0.05	/	/
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	2.77	/	/
双翅目 Diptera	牦牛 Yak	0.02	0.66	18.38**
	藏羊 Tibetan sheep	9.77**	6.20*	7.89**
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	2.61	16.78**	8.40**
蜘蛛目 Araneae	牦牛 Yak	0.52	/	/
	藏羊 Tibetan sheep	4.45*	/	/
	牦牛×藏羊 Yak×Tibetan sheep	0.73	/	/

注：表中数据为 F 值，**表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著；* 表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著；/ 表示该土层该类土壤节肢动物不存在。
Note: The data in the table are F values, **indicates significant difference at $P<0.01$; * indicates significant difference at $P<0.05$; / indicates that the soil arthropod does not exist in this soil layer.

牧影响显著 ($P<0.01$)；弹尾目受牦牛放牧及牦牛藏羊混合放牧影响显著 ($P<0.01$ 或 $P<0.05$)；而双翅目受藏羊放牧及牦牛藏羊混合放牧影响显著 ($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。在 10~15 cm 土层，真螨目、寄螨目、双翅目受牦牛放牧、藏羊放牧以及两者混合放牧影响显著 ($P<0.01$)；弹尾目受牦牛放牧及藏羊放牧影响显著 ($P<0.01$)，但牦牛藏羊混合放牧对弹尾目影响不显著。

土壤节肢动物的数量在不同放牧方式和不同土层间具有明显的变化(图 1)。各处理下土壤节肢动物数量在 0~5 cm 土层最多 ($18\sim25\times10^3$ 只· m^{-2})，随着土层深度的增加土壤节肢动物的数量在减少，说明土壤节肢动物具有“表聚性”。无放牧(CK)样地与其他

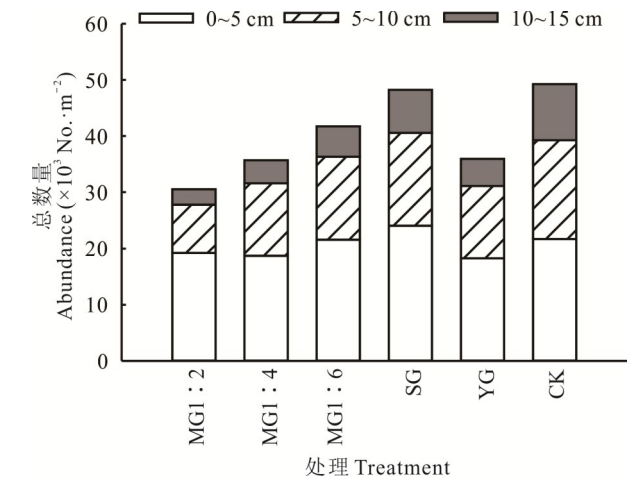


图 1 不同放牧方式对土壤节肢动物数量的影响
Fig. 1 The effects of different grazing modes on soil arthropod abundance

放牧样地相比,土壤节肢动物数量最多,而在剩余5个放牧样地中,呈现出随牦牛所占比重的增加,土壤节肢动物总数量呈现下降的趋势。

2.3.2 不同放牧方式下土壤节肢动物的群落组成 从科的水平对分离到的土壤节肢动物进行鉴定,本试验样地土壤节肢动物主要优势类群有螨总科、甲螨总科。土壤节肢动物优势类群、常见类群以及稀有类群随放牧方式的改变而发生变化(表4),具体为:MG1:2放牧样地土壤节肢动物有19类群,隶属4纲8目,其中优势类群为螨总科、甲螨总科,分别占MG1:2放牧样地土壤节肢动物捕获总量的37.04%、41.33%;常见类群有7类(17.88%),剩余10科稀有类群共占3.75%。MG1:4放牧样地土壤节肢动物有23类群,隶属4纲7目;其中优势类群为螨总

表4 不同放牧方式下土壤节肢动物群落组成比例

Table 4 Composition of soil arthropod communities under different grazing modes (%)

类群 Group	MG1:2	MG1:4	MG1:6	SG	YG	CK
螨总科 Acaroidae	37.04	34.63	34.33	36.03	34.77	41.92
走螨总科 Eupodoidae	1.16	0.72	0.28	1.11	1.10	0.73
隐颞螨科 Cryptognathidae	/	1.30	0.01	0.61	0.78	0.34
甲螨总科 Oribatida	41.33	44.20	42.92	41.38	39.27	38.44
蜱科 Ixodidae	1.52	0.67	0.30	0.82	0.86	0.63
寄螨科 Parasitoidae	2.29	3.96	5.18	4.41	10.74	9.04
厉螨科 Laelapidae	/	0.02	0.32	0.21	0.78	0.46
吉圆跳科 Yosiides	/	0.04	/	/	0.79	0.65
棘跳属 <i>Onychiurus</i>	1.26	0.86	0.82	1.27	0.92	0.23
土跳属 <i>Tullbergia</i>	/	0.05	0.39	0.55	0.98	0.51
驼跳属 <i>Cyphoderus</i>	/	/	0.10	/	/	0.04
等节跳科 Isotomidae	/	/	/	/	0.01	0.01
类符跳属 <i>Folsomina</i>	/	/	/	/	0.10	/
裔符跳属 <i>Folsomides</i>	8.80	11.36	9.23	8.60	3.93	4.76
拟缺跳属 <i>Pseudanurophorus</i>	/	/	/	0.03	0.32	0.04
四刺跳属 <i>Tetracanthella</i>	/	/	/	/	0.75	0.16
库跳属 <i>Coloburella</i>	/	/	0.24	0.11	/	0.46
原缺跳科 Projapygidae	0.44	0.15	0.30	0.27	/	/
管蓟马科 Phlaeothripida	1.38	0.25	0.90	0.55	0.19	0.17
叶蝉科 Cicadellidae	0.27	0.02	/	/	/	0.03
冬大蚊科 Trichoceridae	0.37	/	0.18	0.38	/	0.03
大蚊科 Tipulidae	0.44	0.20	0.77	0.76	0.51	0.11
蠓科 Ceratopogonidae	0.33	0.07	/	/	1.01	0.12
蚋科 Simuliidae	0.40	0.09	0.52	0.24	0.61	/
蕈蚊科 Mycetophilidae	1.47	0.96	1.54	1.38	0.51	0.65
瘿蚊科 Cecidomyiidae	/	0.02	0.15	0.26	/	0.12
粘蕈蚊科 Cecidomyiidae	/	/	/	/	/	0.07
毛蚊科 Bibionidae	0.90	0.29	0.75	0.78	/	0.08
长角毛蚊科 Hesperinidae	/	/	0.08	/	/	/
长足虻科 Dolichopodidae	/	0.01	0.14	0.07	0.56	/
蝇科 Muscidae	0.32	0.01	0.14	0.10	0.18	/
粪蝇科 Scathophagidae	0.16	0.12	0.33	0.08	0.24	/
扁足蝇科 Platypezidae	/	/	0.04	/	/	/
地蛛科 Atypidae	0.12	/	0.04	/	0.09	0.10

注:“/”表示该放牧方式下此类土壤节肢动物不存在。

Note: “/” indicates that such soil arthropods do not exist under the grazing mode.

科、甲螨总科、裔符跳属,共占MG1:4放牧样地土壤节肢动物捕获总量的90.19%;常见类群有2类(5.26%);稀有类群有18类(4.55%)。MG1:6放牧样地土壤节肢动物有26类群,隶属4纲7目;螨总科、甲螨总科为优势类群(77.25%);常见类群有3类(15.95%);其他21类为稀有类群,占MG1:6样地土壤节肢动物捕获总量的6.80%。SG放牧样地土壤节肢动物有23类群,隶属4纲7目;其中优势类群为螨总科、甲螨总科,分别占SG放牧样地土壤节肢动物捕获总量的36.03%、41.38%;常见类群有5类(16.77%),稀有类群有16类(5.82%)。YG放牧样地土壤节肢动物有24类群,隶属3纲6目;螨总科、甲螨总科、寄螨科为优势类群,分别占YG样地土壤节肢动物捕获总量的34.77%、39.27%、10.74%;常见类群有3类(6.04%),稀有类群有18类(9.18%)。CK放牧样地土壤节肢动物有26类群,隶属3纲7目;其中螨总科、甲螨总科为优势类群,分别占41.92%、38.44%;常见类群有2类(13.80%);其他22类为稀有类群,共占CK样地土壤节肢动物捕获总量的5.84%。

2.3.3 不同放牧方式下土壤节肢动物的群落结构 不同放牧方式对不同土层的土壤节肢动物群落结构具有明显的影响(图2)。0~5 cm土层, MG1:2、MG1:6和SG放牧样地土壤节肢动物群落结构无明显差异,但这3个放牧样地与MG1:4、YG具有明显差异;5~10 cm土层, SG与MG1:6放牧样地土壤节肢动物群落结构相似度较大,并与MG1:2、MG1:4、YG具有一定差异;10~15 cm土层, MG1:2与MG1:4放牧样地土壤节肢动物群落结构无明显差异,但与MG1:6、SG、YG具有明显差异。3个土层土壤节肢动物群落结构变化总特点是:CK样地与其他放牧样地均有明显差异,即不同放牧方式对土壤节肢动物群落结构具有明显影响。

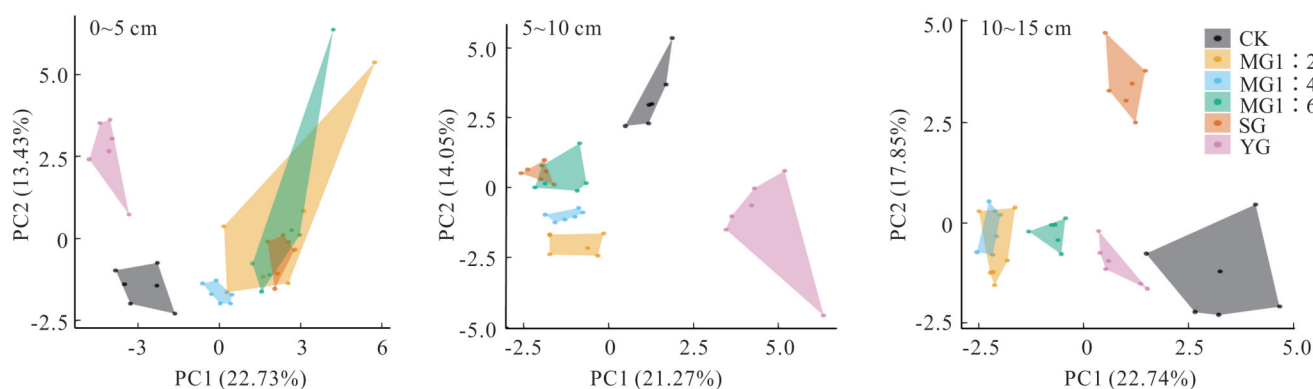


图2 不同放牧方式下土壤节肢动物群落PCA排序图

Fig. 2 PCA ordination diagrams of soil arthropod communities under different grazing modes

2.3.4 不同放牧方式下土壤节肢动物的多样性 如图3所示,在0~5 cm土层,与CK放牧样地相比, MG1:2放牧样地土壤节肢动物丰富度指数显著降低($P < 0.05$),而其他放牧样地间差异不显著;在5~10 cm土层, YG、MG1:2放牧样地与CK放牧样地相比差异显著($P < 0.05$),而MG1:4、MG1:6、SG放牧样地与CK放牧样地相比差异不显著;而在10~15 cm土层, MG1:4放牧样地土壤节肢动物丰富度指数最高。

在0~5 cm土层, CK放牧样地与MG1:2放牧样地土壤节肢动物类群数差异显著($P < 0.05$),而与其他放牧样地差异不显著;在5~10 cm土层, CK放牧样地土壤节肢动物类群数显著高于MG1:2、MG1:4放牧样地($P < 0.05$),但与MG1:6、SG、YG放牧样地相比差异不显著;在10~15 cm土层, SG、CK放牧样地土壤节肢动物类群数显著高于其他放牧样地($P < 0.05$)。

在0~5 cm土层, YG与SG放牧样地土壤节肢动物多样性指数差异不显著,但YG显著高于CK($P < 0.05$);在5~10 cm土层, YG放牧样地土壤节肢动物多样性指数与其他样地相比差异显著($P < 0.05$);在10~15 cm土层, MG1:4放牧样地土壤节肢动物多样性指数显著低于其他样地,其他放牧样地间差异不显著。

在0~5 cm土层,不同比例家畜混合放牧样地土壤节肢动物均匀度指数差异显著($P < 0.05$),表现为MG1:2 > MG1:6 > MG1:4, YG、SG与CK放牧样地相比差异显著,但两者之间不显著;在5~10 cm土层, MG1:2放牧样地土壤节肢动物均匀度指数显著高于其他放牧样地($P < 0.05$);在10~15 cm土层, MG1:4与MG1:2、MG1:6

放牧样地土壤节肢动物均匀度指数差异不显著,但MG1:2与MG1:6放牧样地差异显著,SG、YG放牧样地与CK相比差异显著($P<0.05$)。

2.4 土壤节肢动物群落与土壤理化性质的关系

相关性分析结果表明(表5),土壤节肢动物均匀度指数与有机质呈极显著正相关($P<0.01$),与全氮呈显著负相关($P<0.05$),与全碳、速效钾呈极显著负相关($P<0.01$);丰富度指数与全氮、速效氮、有机质呈极显著正相关($P<0.01$),与pH呈极显著负相关($P<0.01$);多样性指数与全氮呈显著正相关($P<0.05$),与速效氮、速效磷、有机质呈极显著正相关($P<0.01$),与pH呈极显著负相关($P<0.01$);土壤节肢动物平均密度与全氮、速效氮、速效钾、有机质呈极显著正相关($P<0.01$),与pH呈极显著负相关($P<0.01$);总类群数与全氮、速效氮和有机质呈极显著正相关($P<0.01$),与速效钾呈显著正相关($P<0.05$),与pH呈极显著负相关($P<0.01$)。

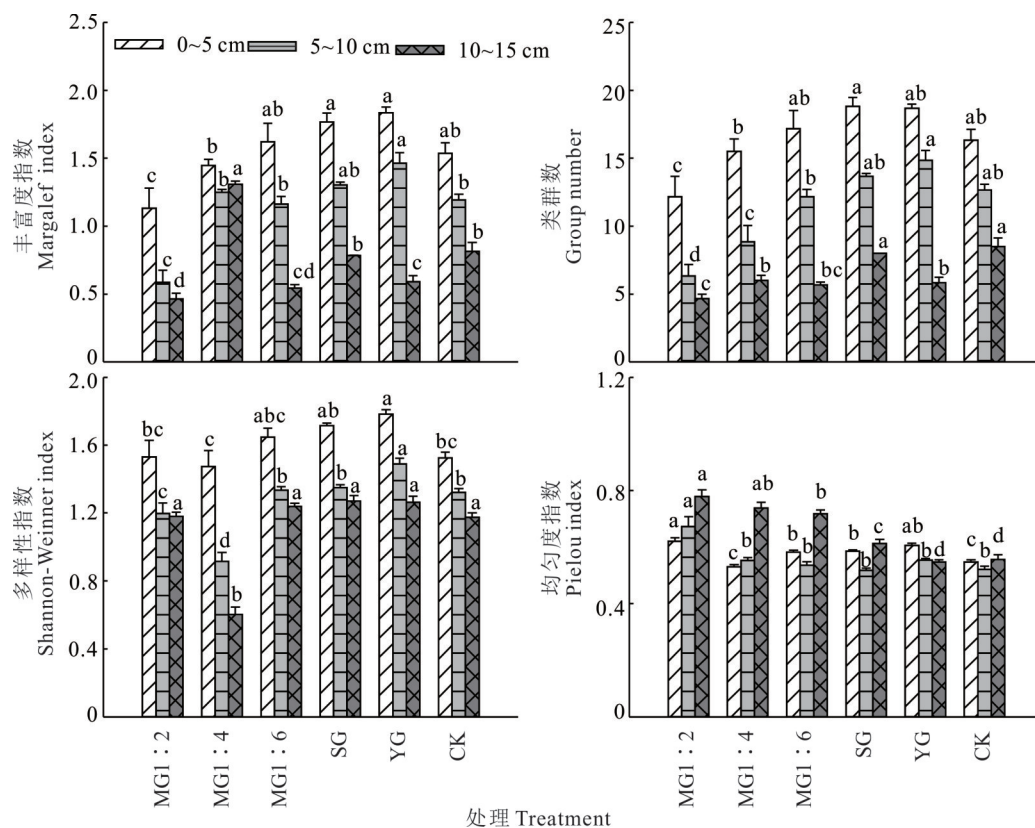


图3 不同放牧方式土壤节肢动物群落密度和多样性

Fig. 3 Densities and diversity of soil arthropod communities under different grazing modes

不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letter indicated significant differences among treatments at $P<0.05$ level.

表5 土壤节肢动物群落多样性与土壤理化特性的相关系数

Table 5 Correlation index between soil arthropods community diversity and soil physical and chemical properties

群落多样性 Community diversities	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全碳 Total carbon	速效氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	有机质 Organic matter	pH	土壤含水量 Soil water content
均匀度指数 Pielou index	-0.29*	0.02	-0.35**	-0.22	0.05	-0.35**	0.41**	0.32*	0.05
丰富度指数 Margalef index	0.46**	0.06	0.22	0.53**	-0.01	0.24	0.52**	-0.59**	0
多样性指数 Shannon-Weinner index	0.30*	0.15	-0.10	0.38**	0.45**	0.22	0.43**	-0.38**	0.15
平均密度 Mean density	0.56**	0.06	0.22	0.42**	0.22	0.53**	0.61**	-0.64**	-0.04
总类群数 Group number	0.47**	0.08	0.15	0.50**	0.19	0.32*	0.59**	-0.59**	0.06

注: *表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, **表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

Note: * indicate a significant correlation at the $P<0.05$ level, ** indicate a very significant correlation at the $P<0.01$ level.

3 讨论

3.1 青藏高原高寒草地土壤节肢动物的一般特征

与热带^[25]、亚热带地区^[26]土壤节肢动物相比,青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落结构较为简单,其主要优势类群为螨总科和甲螨总科,群落多样性较低,且在组成方面具有较大的差异^[27],而与寒温带^[28]、温带等^[8]地区相比,也具有较大的差异,如群落组成、个体密度及类群数等。因此,土壤节肢动物的组成、群落结构以及分布与海拔、温度、气候等环境因子有较强的相关性。

本研究发现,不同放牧方式下土壤节肢动物均具有表聚性,这与前人研究结果一致^[29]。一方面,表层土壤中分布着大量的植物根系,可以为土壤节肢动物带来丰富的食物,另一方面,土壤节肢动物分布在表层土壤中,既可以获得丰富的养分、光照以及食物,同时能避免天敌的捕食^[30]。本研究中,混合放牧样地(MG1:2、MG1:4、MG1:6)表层土的土壤节肢动物所占比例高于单独放牧(SG、YG)及无放牧(CK)样地,导致此现象发生的可能原因是相比于单一家畜放牧,混合放牧地上植被生物量、植物物种多样性有明显的增加,同时土壤节肢动物的多样性和丰富度也有明显的提高^[31]。

3.2 不同放牧方式对青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落组成的影响

不同类群的土壤节肢动物数量受放牧方式的影响不同。本研究发现,真螨目数量随藏羊比重的增加有明显的增加趋势,在SG放牧样地数量最多;寄螨目在CK、YG放牧样地数量较多,其他4个放牧处理随藏羊比重的增加寄螨目数量也随之增加,表现出 $MG1:2 < MG1:4 < MG1:6 < SG$ 的趋势;弹尾目数量随牦牛比重的降低而减少;双尾目、缨翅目、半翅目、双翅目以及蜘蛛目受牦牛放牧、藏羊放牧以及牦牛藏羊混合放牧影响不明显。产生这一现象的主要原因是:牦牛、藏羊通过排泄行为,实现营养物质的重新分配、转移等,进而对高寒草地的养分循环产生影响,为土壤节肢动物的生存提供有利的条件;另外,放牧家畜的畜蹄践踏会加大植被与土壤的接触面积,加速了地上植被的分解速率,提高了营养物质归还到土壤的速率,从而改变土壤节肢动物的生存环境,进而对土壤节肢动物产生影响^[32-33]。

不同放牧方式下青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落组成有所差异。6种不同放牧方式样地的土壤节肢动物主要类群差异较小,但其组成具有较大的差异。6种不同放牧方式样地土壤节肢动物优势类群为螨总科、甲螨总科,而YG放牧样地优势类群增加了寄螨科,MG1:4放牧样地优势类群增加了裔符跳属,一些常见类群逐渐成为稀有类群,而稀有类群逐渐成为常见类群。这主要是由于各放牧样地放牧家畜类型及家畜数量的不同所导致,如牦牛粪便堆积可以增加土壤有机质以及含水量^[34],而藏羊粪便体积较小,含水量较低,纤维含量较高^[35],相比于牦牛粪便,其对土壤养分归还量较小。

3.3 不同放牧方式对青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落结构及多样性的影响

不同放牧方式对土壤节肢动物群落结构具有重要影响。本研究发现,YG与SG两个放牧样地土壤节肢动物群落结构有明显差异,产生差异的原因可能是牦牛、藏羊采食习性具有差异,从而影响草地物种组成,进而影响土壤节肢动物的食物来源^[36]。而不同家畜比例混合放牧(MG1:2、MG1:4、MG1:6)对于土壤节肢动物群落组成及结构亦产生不同影响,其原因可能是:第一方面,牦牛和藏羊生理以及解剖结构存在一定差异^[37],相比于藏羊,牦牛对于纤维素的消化率较高,因此在不同比例混合放牧条件下,牦牛采食纤维素含量较高的茎秆,从而促进藏羊对一些幼嫩植被的采食^[38],造成地上植被产生差异,从而对土壤中的营养物质及土壤节肢动物的生存环境产生影响。第二方面,牦牛、藏羊粪便不同,由于分解、沉积等作用给草地和土壤归还不同的营养物质,以此影响土壤节肢动物食物来源,从而对土壤节肢动物的群落结构产生影响^[39]。

本研究发现SG放牧样地土壤节肢动物平均密度、总类群数及Shannon—Weinner多样性指数均较大,这与武崎等^[5]的研究结果略有差异,原因可能是该研究是不同放牧强度下单一畜种对土壤节肢动物的影响,而本研究是在同一放牧强度下不同畜种对土壤节肢动物的影响。而在不同比例家畜混合放牧方式下,土壤节肢动物平均密度、总类群数及Shannon—Weinner多样性指数均表现为MG1:6放牧样地最高,而MG1:4与MG1:2土壤节肢动物平均密度差异不显著,导致此现象的原因是MG1:6放牧样地家畜数量最多,大量的家畜粪便为土壤节肢动物

提供一定的物质及营养基础^[40]。另外,已有研究表明土壤节肢动物群落多样性与土壤化学特性存在一定关系,土壤化学特性影响着土壤节肢动物的群落结构及分布,而土壤节肢动物也可以通过自身的活动从而影响土壤化学特性,因此土壤化学特性与土壤节肢动物之间是相互影响的^[41]。本研究发现,土壤全氮、速效氮、速效钾、有机质、pH与土壤节肢动物群落多样性存在一定关系,但是不同放牧方式样地土壤化学特性存在差异,表明不同放牧方式样地土壤环境因子的差异可以影响土壤节肢动物的群落多样性。本研究还发现,土壤pH值与土壤节肢动物丰富度指数、多样性指数、平均密度以及总类群数存在显著负相关关系,与均匀度指数存在正相关关系,这与已有研究结果相符^[42-43],该结果说明土壤pH值可以作为影响高寒草地土壤节肢动物群落多样性的一个因子。土壤速效钾含量与土壤节肢动物平均密度和总类群数存在显著正相关关系,表明土壤速效钾含量是影响土壤节肢动物群落的重要因子,这与已有研究结果相符^[44],有关研究发现在一定范围内,提高土壤中钾的含量,可以增加植物对于氮元素的吸收,从而提高植物的品质以及生物量^[45-46],而植物作为土壤节肢动物食物的主要来源,所以,在一定范围内土壤中的钾含量可以增加土壤节肢动物的密度和类群数。

4 结论

本研究结果表明,青藏高原高寒草地土壤节肢动物主要优势类群为螨总科和甲螨总科,不同放牧方式对青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落结构、密度以及多样性的影响存在一定差异。藏羊单牧对提高土壤节肢动物的密度、类群数及多样性具有正向作用。由于本研究仅仅是对植被生长旺期的土壤节肢动物进行调查分析,所得结论对于青藏高原高寒草地土壤节肢动物与不同放牧方式之间的关系仅有了初步的认识。实际上,不同放牧方式对于土壤节肢动物的影响是通过多方面作用的,关于此方面应当日后开展更深入的研究,需要进行长期研究青藏高原高寒草地土壤节肢动物对于不同放牧方式的响应机制。

参考文献 References:

- [1] Yin W Y. Soil animals in China. Beijing: Science Press, 2000.
尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Zhang R Z, Cui Z D. Soil animals and terrestrial ecosystems. Chinese Journal of Ecology, 1983(4): 23-26.
张荣祖, 崔振东. 土壤动物与陆地生态系统. 生态学杂志, 1983(4): 23-26.
- [3] Bezemer T M, Dam N M V. Linking aboveground and belowground interactions via induced plant defenses. Trends in Ecology & Evolution, 2005, 20(11): 617-624.
- [4] Li Y, Wu P F, Long W, *et al.* Effects of different forage species on soil arthropod communities on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7697-7708.
李雨, 吴鹏飞, 龙伟, 等. 高寒地区种植不同种类牧草对土壤节肢动物群落的影响. 生态学报, 2019, 39(20): 7697-7708.
- [5] Wu Q, Wu P F, Wang Q, *et al.* Effects of grazing intensity on the community structure and diversity of different soil fauna in alpine meadow. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1826-1834.
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.
- [6] Xiao H Y, Liu H, Li B, *et al.* A study on the influence of grazing disturbance on soil fauna communities in subalpine meadows. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(2): 26-33.
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.
- [7] Fonderflick J, Besnard A, Beuret A, *et al.* The impact of grazing management on Orthoptera abundance varies over the season in Mediterranean steppe-like grassland. Acta Oecologica, 2014, 60: 7-16.
- [8] Liu X, Zhao D, Chen J W, *et al.* Effects of grazing and mowing on macrofauna communities in a typical steppe of Inner Mongolia. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 1869-1878.
刘霞, 赵东, 程建伟, 等. 放牧和刈割对内蒙古典型草原大型土壤动物的影响. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1869-1878.
- [9] Zhang Z H, Zhou H K, Zhao X Q, *et al.* Relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau. Biodiversity Science, 2018, 26(2): 111-129.
张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. 生物多样性, 2018, 26(2): 111-129.
- [10] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y. Changes in functional groups of soil macro-faunal community in degraded sandy grassland under

- post-grazing natural restoration in Hoqin Sand Land. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(12): 1794—1798.
- 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 放牧干扰后自然恢复沙质草地大型土壤动物功能群变化特征. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1794—1798.
- [11] Gao Y M. Effects of alpine meadow degradation on epigeic arthropod diversity in Zoigê. Chengdu: Southwest Minzu University, 2015.
- 高艳美. 若尔盖高寒草甸退化对表栖性节肢动物多样性的影响. 成都: 西南民族大学, 2015.
- [12] Zhang H Z, Wu P F, Yang D X, *et al.* Dynamics of soil meso-and microfauna communities in Zoigê alpine meadows on the eastern edge of Qinghai—Tibet Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4385—4397.
- 张洪芝, 吴鹏飞, 杨大星, 等. 青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化. *生态学报*, 2011, 31(15): 4385—4397.
- [13] Yang Z N, Zhu Q, Zhan W, *et al.* The linkage between vegetation and soil nutrients and their variation under different grazing intensities in an alpine meadow on the eastern Qinghai—Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2018, 110: 128—136.
- [14] Ma W, Ding K, Li Z. Comparison of soil carbon and nitrogen stocks at grazing-excluded and yak grazed alpine meadow sites in Qinghai—Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 203—211.
- [15] Hilario M C, Wrage-Mönnig N, Isselstein J. Behavioral patterns of (co-)grazing cattle and sheep on swards differing in plant diversity. *Applied Animal Behaviour Science*, 2017, 191(6): 17—23.
- [16] Dong Q M, Zhao X Q, Wu G L, *et al.* Optimization yak grazing stocking rate in an alpine grassland of Qinghai—Tibetan Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5): 2497—2503.
- [17] Yin X Q, Song B, Dong W H, *et al.* A review on the eco-geography of soil fauna in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 91—102.
- 殷秀琴, 宋博, 董炜华, 等. 我国土壤动物生态地理研究进展. *地理学报*, 2010, 65(1): 91—102.
- [18] Yang X X, Dong Q M, 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.
- [19] Feng B, Yang X X, Dong Q M, *et al.* Response of major species to grazing mode in an alpine grassland. *Pratacultural Science*, 2021, 38(3): 531—543.
- 冯斌, 杨晓霞, 董全民, 等. 高寒草地主要物种对放牧方式的响应. *草业科学*, 2021, 38(3): 531—543.
- [20] Zhang Y F, Yang X X, Dong Q M, *et al.* Effects of mixed grazing of yak and Tibetan sheep on feed intake of grazing livestock and plant compensation growth. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(6): 1607—1614.
- 张艳芬, 杨晓霞, 董全民, 等. 牦牛和藏羊混合放牧对放牧家畜采食量和植物补偿性生长的影响. *草地学报*, 2019, 27(6): 1607—1614.
- [21] Yin W Y. Pictorial keys to soil animals of China. Beijing: Science Press, 1998.
- 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [22] Li H X, Sui J Z, Zhou S X, *et al.* Insect taxonomic retrieval. Beijing: China Agriculture Press, 1987.
- 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.
- [23] Lu R K. Soil argrochemistry analysis protocols. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] Lin Y H, Zhang F D, Yang X Y, *et al.* Study on the relationship between agricultural soil fauna and soil physicochemical properties. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(6): 871—877.
- 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.
- [25] Li X H, Liu S R, Wei X, *et al.* Soil microarthropod diversity in six subtropical forest plantations. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1458—1468.
- 李小涵, 刘世荣, 魏雪, 等. 南亚热带6种人工林小型土壤节肢动物群落多样性. *生态学杂志*, 2021, 40(5): 1458—1468.
- [26] Xu G L, Fang B Z, Zhou L X, *et al.* Effects of forest rehabilitation managements on soil fauna community in southern subtropical Heshan. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2016, 15(5): 56—66.
- 徐国良, 方碧真, 周丽霞, 等. 广东鹤山南亚热带植被重建对土壤动物群落的影响. *广州大学学报(自然科学版)*, 2016, 15(5): 56—66.
- [27] Sun C C, Dong Q M, Liu W T, *et al.* Research progress on community structure and diversity of grassland soil animals. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2021, 51(3): 57—61.

- 孙彩彩, 董全民, 刘文昌, 等. 草地土壤动物群落结构及多样性的研究进展. 青海畜牧兽医杂志, 2021, 51(3): 57—61.
- [28] Zhang W, Gu C L, Li F, *et al.* Wetland soil faunal community characteristics on different types of tundra environment in Daxing'an Mountain. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(5): 101—104.
- 张武, 顾成林, 李富, 等. 大兴安岭不同冻土环境湿地土壤动物群落特征. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 101—104.
- [29] Du Z Y, Cai Y J, Wang X D, *et al.* Research progress on yak grazing behavior and its influence on the soil properties of alpine grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(7): 186—197.
- 杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 放牧牦牛行为及其对高寒草地土壤特性的影响研究进展. 草业学报, 2019, 28(7): 186—197.
- [30] Du W C. Grazing management effects on intaking behaviour and body weight of Tibetan sheep. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- 杜鹤辰. 放牧管理对藏羊采食行为与体重的影响. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [31] Cui L W, Liu S R, Liu X L, *et al.* Soil meso-micro faunal diversity in different restoration types of forest ecosystems in Miyaluo. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6): 1153—1162.
- 崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 等. 米亚罗林区不同森林恢复方式下中小型土壤动物多样性. 生态学杂志, 2011, 30(6): 1153—1162.
- [32] Tie L H, Bai W Y, Feng M S, *et al.* Effects of reforming low-efficient cypress forest on meso-and micro-soil faunal community. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(5): 767—773.
- 铁烈华, 白文玉, 冯茂松, 等. 不同改造措施对柏木低效林中小型土壤动物群落结构的影响. 生态与农村环境学报, 2016, 32(5): 767—773.
- [33] Liu J, Feng C, Wang D, *et al.* Impacts of grazing by different large herbivores in grassland depend on plant species diversity. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4): 1053—1062.
- [34] Cai Y J, Du Y Z, Yan Y, *et al.* Greater stimulation of greenhouse gas emissions by stored yak urine than urea in an alpine steppe soil from the Qinghai-Tibetan Plateau: A laboratory study. *Grassland Science*, 2017, 63(3): 196—207.
- [35] La H, Luo Z H, Li H. Analysis on treatment and resource utilization of yak and tibetan sheep manure in Qinghai pastoral area. *Animal Industry and Environment*, 2019(8): 50—52.
- 拉环, 罗增海, 李浩. 青海牧区牦牛藏羊粪便处理及资源化利用浅析. 畜牧业环境, 2019(8): 50—52.
- [36] Zhong Z W, Wang D L, Zhu H, *et al.* Positive interactions between large herbivores and grasshoppers, and their consequences for grassland plant diversity. *Ecology*, 2014, 95(4): 1055—1064.
- [37] Brelin B. Mixed grazing with sheep and cattle compared with single grazing. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 1979, 9: 113—120.
- [38] Zhang Y F. Effects of grazing regime on feed intake and apparent digestibility of yak and Tibetan sheep. Xining: QingHai University, 2020.
- 张艳芬. 放牧方式对牦牛和藏羊采食量和表观消化率影响的研究. 西宁: 青海大学, 2020.
- [39] Scrimgeour G J, Kendall S. Effects of livestock grazing on benthic invertebrates from a native grassland ecosystem. *Freshwater Biology*, 2010, 48(2): 347—362.
- [40] Bueno C G, Jiménez J J. Livestock grazing activities and wild boar rooting affect alpine earthworm communities in the Central Pyrenees (Spain). *Applied Soil Ecology*, 2014, 83: 71—78.
- [41] Luo J M, Yin X R, Ye Y J, *et al.* Response of soil large-and mesofauna to edaphic characterization along vegetation second succession sequence of inland saline marsh. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 287—295.
- 罗金明, 尹雄锐, 叶雅杰, 等. 大中型土壤动物对内陆盐沼退化序列环境的指示研究. 草业学报, 2014, 23(2): 287—295.
- [42] Li W N, Hu Q L, Hao Z, *et al.* Study on the diversity of small and medium-sized soil animals in spring in the Yellow River wetland of Shaanxi Province under different land use patterns. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(13): 47—50.
- 李维娜, 胡庆玲, 郝转, 等. 陕西省黄河湿地春季不同土地利用方式下中小型土壤动物多样性研究. 湖北农业科学, 2020, 59(13): 47—50.
- [43] Ren X T, Qin F C, Wang D H, *et al.* Community composition and structure of soil animals under cropping patterns in orchards of loess residual plateau and gully area. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(1): 188—194.
- 任小同, 秦富仓, 王迪海, 等. 残塬沟壑区果园复合种植对土壤动物群落特征的影响. 中国土壤与肥料, 2020(1): 188—194.

- [44] Long W, Gao Y M, Wu P F. Effects of alpine meadow degradation on epigeic arthropod communities in Zoigê. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1):128–138.
龙伟, 高艳美, 吴鹏飞. 若尔盖高寒草甸退化对表栖节肢动物群落的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 128–138.
- [45] Chen Q L, Li Z, Li J P, *et al.* Effects of NPK application on degraded grassland productivity and community structure on Bashang plateau. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2020, 43(5): 63–70.
陈奇乐, 李智, 李瑾璞, 等. 氮磷钾配施对坝上退化草地生产力及群落特征的影响. *河北农业大学学报*, 2020, 43(5): 63–70.
- [46] Jin Y, Liang C Z, Cui L J. Effects of different nutrient additions on the stoichiometric characteristics of leaves of dominant plants in grassland communities. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(2): 59–65.
金月, 梁存柱, 崔利剑. 不同养分添加对草地群落优势植物叶片化学计量特征的影响. *北方农业学报*, 2019, 47(2): 59–65.