

DOI: 10.11686/cyxb2022383

http://cyxb.magtech.com.cn

刘继亮, 赵文智, 王永珍, 等. 禁牧和放牧对祁连山高寒草原秋季大型和中型土壤节肢动物多样性的影响. 草业学报, 2023, 32(8): 214-221.

LIU Ji-liang, ZHAO Wen-zhi, WANG Yong-zhen, *et al.* Effect of fencing and grazing on soil macro- and meso-arthropod diversity in alpine grassland ecosystems in the Qilian Mountains in the fall. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(8): 214-221.

禁牧和放牧对祁连山高寒草原秋季大型和中型土壤节肢动物多样性的影响

刘继亮^{1,2}, 赵文智^{1,2*}, 王永珍^{1,2}, 冯怡琳³, 祁进贤⁴, 李永元⁴

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究所临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 宁夏大学, 宁夏 银川 750021; 4. 祁连山国家公园祁连山管理局, 青海 海北 810499)

摘要: 过度放牧及气候变化引起祁连山高寒草原退化, 而禁牧可以恢复退化高寒草原生态系统, 但长期禁牧会影响高寒草原地上和地下生态系统结构及其功能。本研究以祁连山西段葫芦沟流域典型高寒草原为研究对象, 2021年秋季利用陷阱法和干漏斗法收集了长期围封禁牧和自由放牧区大型和中型土壤节肢动物样品, 确定禁牧对高寒草原大型和中型土壤节肢动物多样性的影响。结果表明, 禁牧与放牧高寒草原秋季大型和中型土壤节肢动物群落组成明显不同。禁牧与放牧高寒草原相比提高了大型土壤节肢动物的密度、类群丰富度和多样性指数, 其中大型土壤节肢动物活动密度在禁牧高寒草原显著高于放牧高寒草原生境; 禁牧与放牧高寒草原相比显著降低了高寒草原中型土壤节肢动物的密度、类群丰富度、多样性指数以及螨类和跳虫密度比值(A/C)。不同土壤节肢动物类群对禁牧和放牧的响应模式不同, 禁牧与放牧高寒草原相比显著提高了高寒草原蜈蚣、蜘蛛和甲虫的活动密度, 降低了蚂蚁的活动密度和跳虫的密度。总之, 高寒草原土壤节肢动物群落及主要类群对禁牧和放牧管理的响应十分敏感, 其数量及多样性变化可以用于指示高寒草原的放牧管理。

关键词: 祁连山; 高寒草原; 禁牧和放牧; 土壤节肢动物; 多样性

Effect of fencing and grazing on soil macro- and meso-arthropod diversity in alpine grassland ecosystems in the Qilian Mountains in the fall

LIU Ji-liang^{1,2}, ZHAO Wen-zhi^{1,2*}, WANG Yong-zhen^{1,2}, FENG Yi-lin³, QI Jin-xian⁴, LI Yong-yuan⁴

1. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Qilian County Forestry and Grassland Bureau, Qilian Mountain National Park Qilian Management Branch, Haibei 810499, China

Abstract: Overgrazing and climate change are resulting in the degradation of alpine grasslands in the Qilian Mountains. Preventing grazing by fencing can restore the degraded alpine grassland ecosystem. However, long-term prevention of grazing will affect the structure and function of above- and below-ground ecosystems in alpine grasslands. In this research, we studied typical alpine grassland in the Hulu watershed of the Qilian Mountains, in which fenced (FH) and grazed alpine grassland habitats (GH) formed a gradient of grazing management. In autumn 2021, soil macro- and meso-arthropods were collected in the long-term FH and GH areas of alpine grassland by

收稿日期: 2022-09-27; 改回日期: 2022-11-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A(XDA23060304) 和国家自然科学基金(41771290) 资助。

作者简介: 刘继亮(1979-), 男, 黑龙江桦南人, 博士。E-mail: liujl707@lzb.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn

pitfall trapping and an improved Tullgren funnel method, and were identified and counted. The soil macro- and meso-arthropod community composition differed significantly between the FH and GH areas of alpine grassland in the fall, and soil meso-arthropod diversity was more sensitive than macro-arthropod diversity to grazing management. Compared with GH areas, the FH areas showed higher values of group richness and Shannon—Wiener index of soil macro-arthropods, and the activity density of soil macro-arthropods was significantly higher in FH areas than in GH areas. Compared with soil macro-arthropods, soil meso-arthropods responded differently to grazing management of alpine grassland. Their values of contrast density, group richness, Shannon—Wiener index, and Acarina/Collembola (A/C) were lower in FH areas than in GH areas. These results show that different soil arthropod taxa respond differently to grazing management of alpine grassland, and this affects the assemblages of soil macro- and meso-arthropods. Furthermore, prevention of grazing in alpine grassland significantly decreased the activity density of centipedes, spiders, and beetles, and reduced the activity density of ants and the density of springtails. In short, soil arthropod communities and major taxa in alpine grassland are sensitive to fencing and grazing management, and their changes in abundance and diversity can be used to indicate grazing management intensity in alpine grassland.

Key words: Qilian Mountains; alpine grassland; fencing and grazing; soil arthropods; diversity

祁连山是中国西北地区重要的生态安全屏障和水源涵养地,在国家生态建设中具有十分重要的战略地位^[1-2]。高寒草原是祁连山重要的植被类型,其中高海拔区形成独立的植被带或灌木和乔木组成的复合植被带^[3-4]。高寒草原是祁连山畜牧业的支柱,其不仅是当地许多少数民族赖以生存的生产资料,还具有调节气候、净化空气、维持生物多样性、保持水土和涵养水源等重要生态功能^[2,4-5]。然而,受到气候变化和人类活动的双重影响,祁连山高寒草原的退化日趋严重,土地生产力也逐渐减低,这对高寒草原生态系统服务功能的正常发挥造成严重威胁^[5-6]。超载放牧是导致草原退化的主要动因,通过围封禁牧和轮牧可以逐步恢复退化高寒草原生物多样性,提高草原初级生产力和土壤肥力^[6-9]。然而,长期围封禁牧也会降低高寒草原和草甸的生物多样性和生态系统服务功能^[10-11]。因而,亟需针对典型的高寒草原生态系统开展围封禁牧生态效应研究,确定禁牧对地上和地下生态系统结构及功能的影响,为祁连山退化草原的恢复管理提供科学依据^[10-11]。

土壤节肢动物是地下生态系统的关键组分,其不仅参与草原生态系统凋落物分解和养分循环过程,还是一些兽类和鸟类的食物资源,在维持高寒草原生态系统动物多样性及功能方面的作用不可忽视^[12-15]。土壤节肢动物对高寒生态系统退化具有较好的指示性,其多样性及其关键类群的数量与植被和土壤环境变化趋势一致,可以指示和评估放牧引起的草原或草甸退化过程中土壤质量和生态系统服务功能的变化^[16-18]。高寒草原或草甸退化过程中,大型和中小型土壤动物及微生物对高寒草原或草甸短期和长期围封的响应模式不同并存在一定的地域差异^[18-21]。高寒草原土壤及植被环境与高寒草甸不同,高寒草原土壤节肢动物群落组成也与高寒草甸存在一定差异,这会影响到高寒草原土壤节肢动物对围封禁牧的响应模式。鉴于此,本研究以祁连山西段南坡葫芦沟小流域为研究区,确定围封禁牧对高寒草原大型和中型土壤节肢动物多样性的影响规律,以为退化高寒草原恢复管理提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山葫芦沟小流域位于黑河上游青海省祁连县境内,流域总面积 23.1 km²,海拔 2960~4800 m。葫芦沟小流域年平均气温为 -1.4 °C,年平均降水量为 680 mm,且随着海拔的升高而增加。葫芦沟小流域海拔跨度 1840 m,植被或景观的垂直分布十分明显。葫芦沟小流域高山寒漠占流域总面积的 53.6%,分布在海拔 3476~4780 m;灌丛和树林分布在海拔 3003~3720 m,呈斑块状或条带状分布,占流域总面积的 12.1%;高寒草原和草甸分布在海拔 2963~4059 m,占流域总面积的 27.3%;其余生境为冰川、河道和河流^[22]。高寒草原在葫芦沟小流域主要

分布在海拔较低的区域,降水量低于其他生境类型,但蒸发量较高,是葫芦沟小流域重要的水源涵养区^[23]。高寒草原和草甸是葫芦沟小流域的主要放牧区,过度放牧(家畜以羊为主,放牧形式为自由放牧)已经导致高寒草原严重退化,狼毒(*Stellera chamaejasme*)等有害草种的比重大幅增加,草原生态系统服务功能降低。2009年5月中国科学院黑河上游生态—水文试验研究站(祁连站)在葫芦沟小流域典型高寒草原分布区建立了围封禁牧样地,长期围封禁牧高寒草原草本盖度增加,枯落物数量也明显增多,草本群落组成及多样性随之发生变化。

1.2 试验设计及样品采集

2021年在葫芦沟小流域长期围封禁牧样地及毗邻高寒草原生境建立大型和中型土壤节肢动物多样性监测样地,围封禁牧样地总面积约10000 m²。禁牧高寒草原围封后无人扰动,自由放牧高寒草原与禁牧区相邻,主要放牧的牲畜是绵羊(*Ovis aries*)。高寒草原地势平坦,植被分布均匀,土层较薄,大型土壤节肢动物中表栖种类较多,利用陷阱法可以获得更多的大型土壤节肢动物类群。在围封禁牧和毗邻的自由放牧区分别设置15个10 m×10 m的采样区,每个采样区埋设一个陷阱收集器收集大型土壤节肢动物样品,在禁牧和放牧高寒草原生境的15个采样区内分别选择10个采集土壤样品(样品面积为10 cm×10 cm,深度为10 cm)带回室内分离中型土壤节肢动物^[24]。参照祁连山南坡草地和林地大型和中型土壤动物月动态变化规律,2021年10月上旬采集大型和中型土壤动物样品(土壤节肢动物的数量及多样性较高)^[25]。大型土壤节肢动物样品在野外利用陷阱收集器连续收集5 d,中型土壤节肢动物采集土壤样品带回室内利用改进干漏斗分离器连续分离5 d。大型和中型土壤节肢动物样品在体式和生物显微镜下确定种属信息并统计个体数量,形态鉴定主要参照土壤动物和昆虫方面的分类资料^[25-29]。蜈蚣(石蜈蚣科Lithobiidae)、蜘蛛(蜘蛛目Araneae)、甲虫(鞘翅目Coleoptera)和蚂蚁(蚁科Formicidae)是高寒草原主要的大型土壤节肢动物类群,螨类(蜱螨目Acarina)和跳虫(弹尾目Collembola)是主要的中型土壤节肢动物类群,蜘蛛、甲虫、螨类和跳虫为幼体难以准确确定种属信息,故在科或亚目的水平统计大型和中型土壤节肢动物个体数量及类群组成。

1.3 数据分析

2021年10月采集的大型和中型土壤节肢动物按照收集器或样方统计其群落组成,计算相对多度。计算大型和中型土壤节肢动物活动密度(每个收集器动物的个体数)或密度(每m²采集的动物个体数)、类群数(每个收集器或每平方米采集的动物类群数)和多样性指数(Shannon—Wiener index),统计分析使用Past 4.01软件包。大型土壤节肢动物按照蜈蚣、蜘蛛、甲虫和蚂蚁统计其活动密度,中型土壤节肢动物按照螨类和跳虫统计密度,计算螨类和跳虫密度比值(A/C)。利用独立样本 t 检验比较围封禁牧和自由放牧高寒草原生境大型和中型土壤节肢动物群落和主要类群数量差异,统计分析使用SPSS 21.0软件包。利用多元方差(permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)分析长期围封禁牧和自由放牧高寒草原大型和中型土壤节肢动物群落组成差异,然后利用相似性百分比(similarity percentage analysis, SIMPER)分析确定围封和禁牧高寒草原大型和中型土壤节肢动物群落的平均相异性和主要动物类群的贡献率,统计分析使用Past 4.01软件包。利用指示种分析(indicator species analysis)确定大型和中型土壤节肢动物类群对长期围封禁牧和自由放牧高寒草原生境的指示性,统计分析使用PC—ORD 5.0软件包。

2 结果与分析

2.1 禁牧和放牧高寒草原大型和中型土壤节肢动物群落组成

高寒草原秋季禁牧和放牧生境共采集321头16类大型土壤节肢动物,蜈蚣、蜘蛛、甲虫和蚂蚁的个体数分别占30.5%、15.0%、27.4%和27.1%。禁牧与放牧高寒草原相比提高了石蜈蚣科(Lithobiidae)、狼蛛科(Lycosidae)、步甲科(Carabidae)幼虫和隐翅虫科(Staphylinidae)幼虫的捕获数量和比重,但降低了蚁科(Formicidae)的捕获数量和比重。禁牧和放牧高寒草原中型土壤节肢动物中螨类采集到3个亚目1097头,跳虫采集到3科563头,螨类和跳虫的个体数分别占33.9%和66.1%。禁牧与放牧高寒草原相比降低了等节跳科(Isotomidae)、球角跳科(Hypogastruridae)和辐螨亚目(Prostigmata)的个体数和比重,提高了革螨亚目(Mesostigmata)的比重。

2.2 禁牧和放牧高寒草原大型和中型土壤节肢动物群落比较

PERMANOVA 分析结果表明,秋季禁牧和放牧高寒草原大型土壤节肢动物群落组成均存在显著差异($F=7.78, P<0.001$),SIMPER 分析结果表明,禁牧和放牧高寒草原大型土壤节肢动物群落的平均相异性为 70.6%,石蜈蚣科、蚁科、狼蛛科、步甲科和隐翅虫科幼虫解释了 2 种生境大型土壤节肢动物群落差异的 83.1%。秋季禁牧和放牧高寒草原生境中型土壤节肢动物群落组成显著不同($F=9.08, P<0.001$),SIMPER 分析结果表明,禁牧和放牧高寒草原中型土壤节肢动物群落的平均相异性为 50.4%,甲螨亚目、等节跳科、球角跳科和辐螨亚目解释了 2 种生境中型土壤节肢动物群落差异的 92.8%。

高寒草原秋季禁牧与自由放牧生境相比,提高了大型土壤节肢动物的活动密度、类群丰富度和多样性指数,其中禁牧生境大型节肢土壤动物活动密度显著高于放牧生境(图 1)。中型土壤节肢动物群落变化与大型土壤节肢动物相反,禁牧高寒草原生境中型土壤节肢动物密度、类群丰富度和多样性指数均显著低于放牧生境(图 1)。此外,研究还发现禁牧高寒草原与放牧相比显著提高了中型土壤节肢动物群落中螨类和跳虫的比值(A/C),禁牧生境 A/C 值是放牧生境的 7.6 倍,表明围封禁牧改变了中型土壤节肢动物的群落结构及生态功能。

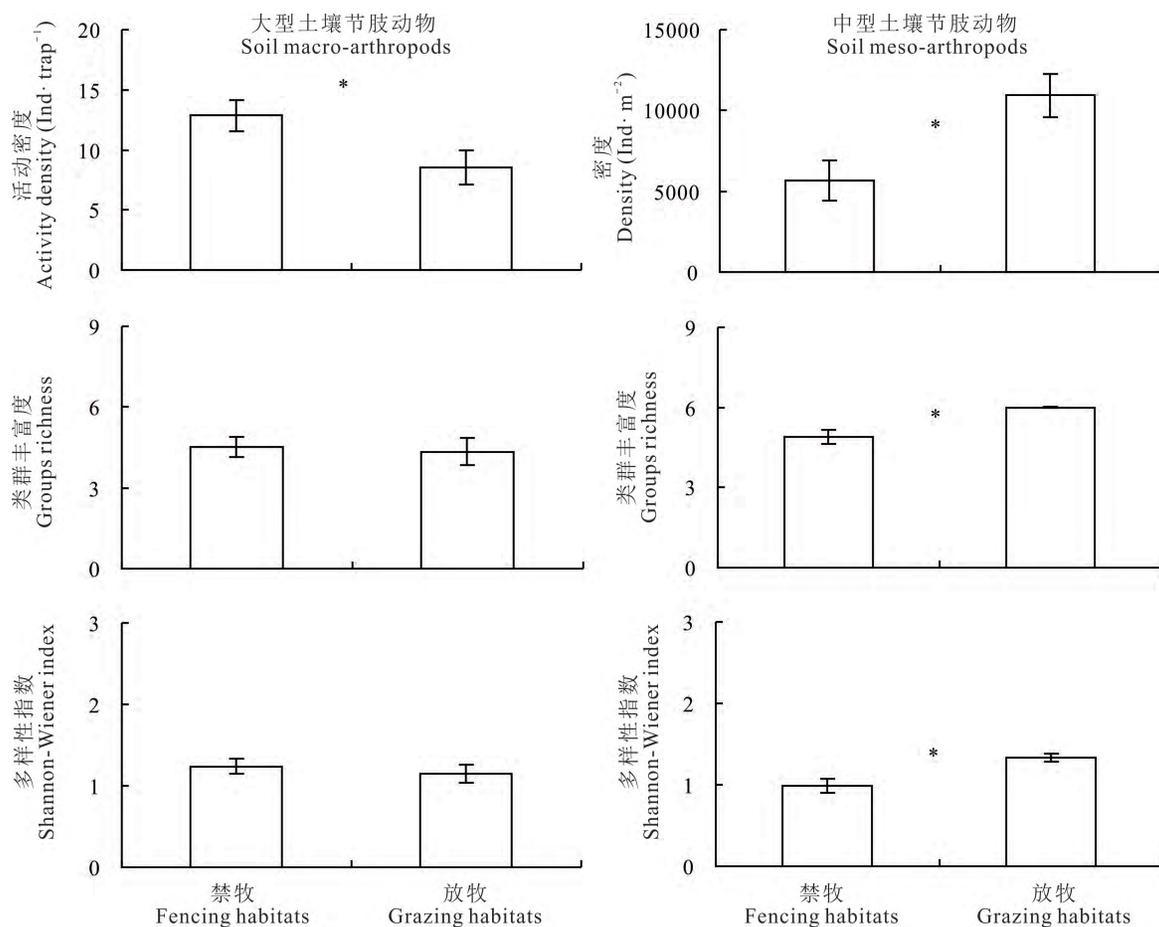


图 1 禁牧和放牧高寒草原秋季大型和中型土壤节肢动物活动密度或密度、类群丰富度和多样性指数比较

Fig. 1 The activity density or density, groups richness, and Shannon-Wiener index of soil macro- and meso-arthropods community at fencing and grazing habitats of alpine grassland in autumn

*: $P<0.05$. 下同 The same below.

2.3 禁牧和放牧高寒草原主要大型和中型土壤节肢动物类群密度比较

蜈蚣、蜘蛛、甲虫和蚂蚁是高寒草原主要的大型土壤动物类群,禁牧高寒草原显著提高了秋季蜈蚣、蜘蛛和甲虫的活动密度,但降低了蚂蚁的活动密度(图 2)。指示种分析结果表明,石蜈蚣科(指示值 $IV=83.7, P<0.001$)、

狼蛛科 ($IV=52.7, P=0.085$)、步甲科 ($IV=53.1, P=0.011$)和隐翅虫科幼虫 ($IV=44.3, P=0.074$) 主要分布在禁牧的高寒草原生境, 它们对禁牧响应十分敏感; 蚁科 ($IV=65.4, P=0.011$) 主要分布在放牧的高寒草原生境, 对放牧响应十分敏感。螨类和跳虫是高寒草原主要的中型土壤节肢动物类群, 禁牧降低了螨类和跳虫的密度, 其中禁牧显著降低了跳虫的密度 (图3)。指示种分析结果表明, 长角跳科 ($IV=63.9, P=0.083$)、等节跳科 ($IV=88.5, P<0.001$)、球角跳科 ($IV=94.2, P<0.001$) 和辐螨亚目 ($IV=68.9, P=0.028$) 主要分布在放牧高寒草原生境, 它们对放牧响应十分敏感。

3 讨论

围封禁牧是恢复高寒山区退化植被的有效途径之一, 土壤水分是影响高寒山区草原和草甸对禁牧及放牧管理响应的主要因素, 也影响植物、土壤生物和土壤对放牧管理的响应模式^[29-30]。疏勒河源区高寒草甸退化过程中, 禁牧对沼泽化草甸大型土壤节肢动物的影响较小, 显著降低了高寒草甸大型土壤节肢动物活动密度, 提高了大型土壤节肢动物多样性, 禁牧对高寒草原化草甸大型土壤节肢动物群落特征变化的影响与高寒草甸相反^[21]。本研究在葫芦沟小流域高寒草原的研究发现, 长期围封禁牧高寒草原 (11年) 与自由放牧草原相比, 大型土壤节肢动物的活动密度显著提高, 该结果与疏勒河源区的草原化草甸对围封禁牧的响应研究结果相近^[21]。大型食草动物或食肉动物存在及数量变化对表栖和土栖土壤节肢动物存在下行控制效应, 禁牧排除大型食草动物恢复植被和土壤环境, 这也会增强资源的上行效应, 提升大型土壤节肢动物的数量及多样性^[31-32]。一项在澳大利亚半干旱牧场的研究发现, 放牧管理 (禁牧和轮牧) 对土壤碳氮的影响随着土壤类型的变化而变化; 放牧管理强度变化可提高多年生植物盖度和多样性, 但对大型土壤节肢动物多样性有负影响^[33]。巴西草地长期禁牧的研究表明, 禁牧降低了草本多样性, 放牧会提高草本多样性、降低草本功能多样性; 植被群落变化会影响植物上栖居的节肢动物的数量及多样性, 但对表栖节肢动物的多样性影响较小^[20]。本研究在高寒草原的研究结果与此不同, 禁牧提高了高寒草原大型土壤节肢动物的活动密度及多样性, 这与大型土壤动物群落组成不同及不同动物类群生理生态特征变化有关。葫芦沟小流域高寒草原秋季大型土壤节肢动物主要由蜈蚣、蜘蛛、甲虫和蚂蚁组成, 禁牧对蜈蚣、蜘蛛和甲虫的活动密度有正影响, 而对蚂蚁的活动密度有负影响, 这与Nishimura等^[34]在半干旱区的研究结果相近。不同土壤节肢动物类群的行为、生理生态特征差异等决定了它们对围封禁牧的响应模式, 从而改变了大型土壤节肢动物群落结构变化。石蜈蚣科和蜘蛛等捕食性节肢动物与迁移活动能力较强的甲虫会因高寒草原禁牧而提高活动密度, 这与放牧扰动降低和食物资源增多有关; 杂食性的蚁科在地下挖掘巢穴栖居则因禁牧而降低其活动密度, 这与它偏好高寒草原植被盖度较低的区域活动有关^[21,34]。

高寒草原中型土壤节肢动物多样性对禁牧的响应较大型土壤节肢动物敏感, 长期禁牧显著降低了高寒草原中型土壤节肢动物密度、类群丰富度和多样性指数, 这与该区大型土壤节肢动物多样性变化对围封禁牧的响应规律相反。青藏高原长期围封草原与放牧草原相比, 土壤微生物的碳代谢活性、多样性和丰富度明显提高; 短期围

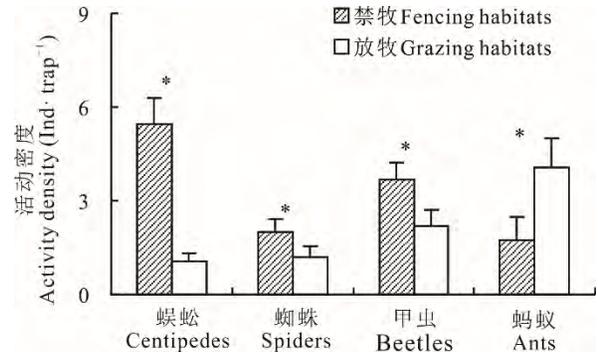


图2 禁牧和放牧高寒草原秋季蜈蚣、蜘蛛、甲虫和蚂蚁活动密度比较

Fig. 2 The activity density of centipedes, spiders, beetles, and ants at fencing and grazing habitats of alpine grassland in autumn

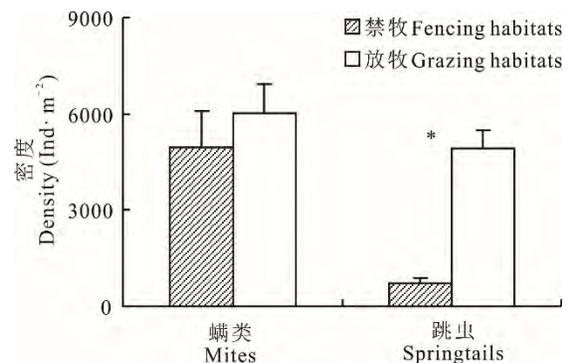


图3 禁牧和放牧高寒草原秋季螨类和跳虫密度比较

Fig. 3 The density of mites and springtails at fencing and grazing habitats of alpine grassland in autumn

封高寒草甸(3年)提高了土壤全氮、磷、钾、有机质含量及土壤保水能力,土壤线虫密度下降,土壤线虫群落中的植食性线虫所占比重呈下降趋势,食真菌线虫比重加大,本研究关于中型土壤节肢动物多样性变化的研究结果与此相近^[35-36]。高寒草甸围封禁牧改善了土壤环境,提高了植物资源的数量及质量,对土壤线虫的资源上行效应也随之增强;高寒草甸和草原围封禁牧会降低中型土壤动物的密度及多样性,这可能与蜘蛛等捕食性节肢动物捕食者的下行效应增强有关^[21,37-38]。高寒草原围封禁牧导致蜘蛛等捕食性土壤节肢动物的活动密度增加,土壤中跳虫的密度显著降低,螨类和跳虫的比值也显著降低,这也表明围封禁牧改变了螨类和跳虫组成的分解食物网的结构。此外,研究还发现大型和中型土壤节肢动物群落及关键类群对高寒草原禁牧和放牧有一定的指示性,它们可以用于指示禁牧或放牧引起高寒草原的生境变化。总之,禁牧高寒草原对大型节肢动物多样性有正影响,而对中型土壤节肢动物多样性有负影响,不同土壤节肢动物类群对围封禁牧的响应模式不同,这会影响高寒草原地下生态系统的结构及功能。

参考文献 References:

- [1] Sun H L, Zheng D, Yao T D, *et al.* Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12.
孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [2] Pan Q M, Sun J M, Yang Y H, *et al.* Issues and solutions on grassland restoration and conservation in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(6): 666-674.
潘庆民, 孙佳美, 杨元合, 等. 我国草原恢复与保护的问题与对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(6): 666-674.
- [3] Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8.
张懿鲤, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-8.
- [4] Yang X T, Fan J, Gai J M, *et al.* Soil physical and chemical properties and vegetation characteristics of different types of grassland in Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 878-886.
杨学亭, 樊军, 盖佳敏, 等. 祁连山不同类型草地的土壤理化性质与植被特征. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 878-886.
- [5] Zhang Q, Ma L, Zhang Z H, *et al.* Ecological restoration of degraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: Degradation status, restoration measures, effects and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7441-7451.
张骞, 马丽, 张中华, 等. 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望. *生态学报*, 2019, 39(20): 7441-7451.
- [6] Li Z Z, Zhao S L. Cause and effect analysis and management strategy of the grassland retrogression in Qilian Mountain. *Chinese Journal of Grassland*, 1989(3): 25-31.
李自珍, 赵松岭. 祁连山区草原退化原因分析及管理对策. *中国草地*, 1989(3): 25-31.
- [7] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, *et al.* Long-term fencing improved soil properties and soil organic carbon storage in an alpine swamp meadow of Western China. *Plant and Soil*, 2010, 332(1/2): 331-337.
- [8] Deng L, Zhang Z N, Shangguan Z P. Long-term fencing effects on plant diversity and soil properties in China. *Soil & Tillage Research*, 2014, 137: 7-15.
- [9] Huang G Z, Xi Y L, Zhao C Y, *et al.* Effects of enclosure on subalpine grassland community structure and productivity in Qilian Mountain. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2020, 56(6): 718-723.
黄国柱, 席亚丽, 赵传燕, 等. 围封对祁连山亚高山草地群落结构与生物量的影响. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(6): 718-723.
- [10] Liu Y, Li B L, Yuan Y C, *et al.* Assessment of grazing exclusion on grassland restoration through the changes of plant community structure of alpine meadow in the Three River Headwater Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7125-7137.
刘岩, 李宝林, 袁焯城, 等. 基于三江源高寒草甸群落结构变化评估围封对草地恢复的影响. *生态学报*, 2021, 41(18): 7125-7137.
- [11] Yao X X, Cai H, Li C H. Effects of fencing and grazing on vegetation community characteristics and soil properties in an alpine meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1): 128-136.
姚喜喜, 才华, 李长慧. 封育和放牧对高寒草甸植被群落特征和土壤特性的影响. *草地学报*, 2021, 29(S1): 128-136.

- [12] Decaëns T, Jiménez J J, Gioia C, *et al.* The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(1): 23–38.
- [13] Wall D H, Nielsen U N, Six J. Soil biodiversity and human health. *Nature*, 2015, 528: 69–76.
- [14] Guerra C A, Berdugo M, Eldridge D J, *et al.* Global hotspots for soil nature conservation. *Nature*, 2022, 610(7933): 693–698.
- [15] Jing X, Sanders N J, Shi Y, *et al.* The links between ecosystem multifunctionality and above and belowground biodiversity are mediated by climate. *Nature Communications*, 2015, <https://doi.org/10.1038/ncomms9159>.
- [16] Wu P F, Zhang H Z, Wang Y. The response of soil macroinvertebrates to alpine meadow degradation in the Qinghai–Tibetan Plateau, China. *Applied Soil Ecology*, 2015, 90: 60–67.
- [17] 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.
- [18] Xue H Y, Luo D Q, Wang H Y, *et al.* Effects of free grazing or enclosure on soil nematodes in alpine meadows in North Tibet, China. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 480–492.
薛会英, 罗大庆, 王鸿源, 等. 藏北高寒草甸土壤线虫群落对围封及自由放牧的响应. *土壤学报*, 2017, 54(2): 480–492.
- [19] Wang C, Tang Y. A global meta-analyses of the response of multi-taxa diversity to grazing intensity in grasslands. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(11): 114003.
- [20] Ferreira P M, Andrade B O, Podgaiski L R, *et al.* Long-term ecological research in southern Brazil grasslands: Effects of grazing exclusion and deferred grazing on plant and arthropod communities. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0227706.
- [21] Wang Y Z, Feng Y L, Lin Y Y, *et al.* Effect of long-term enclosure on ground arthropod diversity of alpine meadow in the Shule River headwaters. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(18): 7495–7506.
王永珍, 冯怡琳, 林永一, 等. 长期围封对疏勒河源区高寒草甸地表节肢动物多样性的影响. *生态学报*, 2022, 42(18): 7495–7506.
- [22] Han C T, Chen R S, Liu J F, *et al.* Hydrological characteristics in non-freezing period at the alpine desert zone of Hulugou Watershed, Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1536–1544.
韩春坛, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 祁连山葫芦沟流域高山寒漠带非冻结期水文特征. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1536–1544.
- [23] Chen R S, Yang Y, Han C T, *et al.* Field experimental research on hydrological function over several typical underlying surfaces in the cold regions of Western China. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(4): 507–514.
陈仁升, 阳勇, 韩春坛, 等. 高寒区典型下垫面水文功能小流域观测试验研究. *地球科学进展*, 2014, 29(4): 507–514.
- [24] Liu J L, Li F R, Liu Q J, *et al.* Seasonal variation of ground dwelling arthropod communities in an arid desert of the middle Heihe River basin. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(5): 161–169.
刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 等. 黑河中游干旱荒漠地面节肢动物群落季节变异规律. *草业学报*, 2010, 19(5): 161–169.
- [25] 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.
- [26] Song D X, Zhu M S, Chen J. *The spiders of China*. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1999.
- [27] Zheng L Y, Gui H. *Insect classification*. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 1999.
郑乐怡, 归鸿. *昆虫分类*. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [28] Yin W Y. *Pictorial keys to soil animal of China*. Beijing: Science Press, 2000.
尹文英. *中国土壤动物检索图鉴*. 北京: 科学出版社, 2000.
- [29] Wang Y F, Lv W W, Xue K, *et al.* Grassland changes and adaptive management on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 668–683.
- [30] Pan T T, Wu Y B, Xu C L, *et al.* Effects of simulated Tibetan sheep and yak trampling and precipitation on the growth of aboveground vegetation in alpine meadow on the eastern Qilian Mountains. *Grassland and Turf*, 2019, 39(1): 60–68.
潘涛涛, 吴玉宝, 徐长林, 等. 模拟条件下藏羊、牦牛践踏和降水对东祁连山高寒草甸地上植被生长的影响. *草原与草坪*, 2019, 39(1): 60–68.
- [31] Cecil E M, Spasojevic M J, Cushman J H. Cascading effects of mammalian herbivores on ground-dwelling arthropods: Variable responses across arthropod groups, habitats and years. *Journal of Animal Ecology*, 2019, 88(9): 1319–1331.
- [32] Contos P, Letnic M. Top-down effects of a large mammalian carnivore in arid Australia extend to epigeic arthropod assemblages. *Journal of Arid Environments*, 2019, 165: 16–27.
- [33] Waters C M, Orgill S E, Melville G J, *et al.* Management of grazing intensity in the semi-arid rangelands of Southern

- Australia: Effects on soil and biodiversity. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(4): 1363–1375.
- [34] Nishimura I, Iwachido Y, Nambu M, *et al.* A fence-line contrast reveals effects of grazing on communities of plants and ground-dwelling arthropods in a Mongolian grassland. *Journal of Arid Environments*, 2022, 203: 104776. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104776>.
- [35] Xue H Y, Luo D Q, Hu F, *et al.* Effect of short-term enclosure on soil nematode communities in an alpine meadow in Northern Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 6139–6148.
薛会英, 罗大庆, 胡锋, 等. 短期围封对西藏北部高寒草甸土壤线虫群落的影响. *生态学报*, 2016, 36(19): 6139–6148.
- [36] Xue Y F, Zong N, He N P, *et al.* Influence of long-term enclosure and free grazing on soil microbial community structure and carbon metabolic diversity of alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2705–2712.
薛亚芳, 宗宁, 何念鹏, 等. 长期围封和自由放牧对高寒草甸土壤微生物群落结构及碳源代谢多样性的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2705–2712.
- [37] Wan B B, Mei X M, Hu Z K, *et al.* Moderate grazing increases the structural complexity of soil micro-food webs by promoting root quantity and quality in a Tibetan alpine meadow. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104161. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104161>.
- [38] Koltz A M, Classen A T, Wright J P. Warming reverses top-down effects of predators on belowground ecosystem function in Arctic tundra. *PNAS*, 2018, 115(32): 7541–7549.