

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2024.04.023

引用格式:孙彩彩,安海涛,杨晓霞,等.放牧对中小型土壤动物群落结构影响的 Meta 分析[J].草地学报,2024,32(4):1194-1203

SUN Cai-cai, AN Hai-tao, YANG Xiao-xia, et al. Impacts of Grazing on the Community Structure of Meso-micro Soil Fauna: A Meta-Analysis[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(4): 1194-1203

放牧对中小型土壤动物群落结构影响的 Meta 分析

孙彩彩, 安海涛, 杨晓霞, 吕卫东, 刘文亭, 董全民*

(青海大学畜牧兽医科学院, 青海省畜牧兽医科学院/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, 青海 西宁 810016)

摘要:中小型土壤动物是地下生态系统重要的参与者,在地下生态系统物质循环和能量流动过程中均扮演着重要角色。本研究通过对 40 篇文献进行 Meta 分析,探讨放牧对中小型土壤动物群落结构变化的影响,结果表明:(1)放牧会提高中小型土壤动物丰度,但会降低物种数和多样性指数。(2)放牧通过影响植物群落和土壤理化性质,进而间接影响中小型土壤动物的群落结构。(3)相关性分析表明,在围封处理下,中小型土壤动物丰度与土壤含水量、速效钾呈正相关;在放牧处理下,中小型土壤动物丰度与土壤含水量、速效钾、全磷呈显著正相关($P < 0.01$)。(4)结构方程模型结果显示,在围封处理下,土壤全氮对中小型土壤动物丰度产生显著正效应(标准化回归系数 $\beta = 0.19, P < 0.05$)。综上所述,中小型土壤动物作为地下生态系统的重要参与者,其对放牧的响应方式,有利于为各地区制定更合理且科学的放牧方式。

关键词:放牧;中小型土壤动物;群落结构;Meta 分析

中图分类号:Q938.1+3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2024)04-1194-10

Impacts of Grazing on the Community Structure of Meso-micro Soil Fauna: A Meta-Analysis

SUN Cai-cai, AN Hai-tao, YANG Xiao-xia, LYU Wei-dong, LIU Wen-ting, DONG Quan-min*

(Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine/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, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: As the key component of the belowground ecosystem, meso-micro soil fauna play an important role in the material cycle and energy flow of underground ecosystem. We aimed to assess the influence of grazing on the community structure of Meso-micro soil fauna using Meta-analysis. The results showed that: (1) Grazing increased the abundance of Meso-micro soil fauna, but decreased the number of species and the diversity index. (2) Grazing indirectly affected the community structure of Meso-micro soil fauna, through its influence on plant communities and soil physicochemical properties. (3) Correlation analysis showed that the abundance of Meso-micro soil fauna was positively correlated with soil moisture and available potassium ($P < 0.05$) in enclosure treatment group, whereas the abundance of Meso-micro soil fauna was significantly positively correlated with soil moisture, available potassium, and total phosphorus ($P < 0.01$) in grazing treatment group. (4) Structural equation models showed that soil total nitrogen had positive effect on the abundance of Meso-micro soil fauna in enclosure treatment. In summary, as an important participant of the underground ecosystem, Meso-micro soil fauna response to grazing was conducive to formulating more reasonable and scientific grazing methods for various regions.

Key words: Grazing; Meso-micro soil fauna; Community structure; Meta-analysis

收稿日期:2023-10-25;修回日期:2023-12-01

基金项目: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);2021年度中国科学院“西部之光”人才培养计划;海北州牦牛藏羊产业技术研发与集成示范项目资助

作者简介:孙彩彩(1998-),女,汉族,内蒙古乌兰察布人,博士研究生,主要从事草地生态与环境保护研究,E-mail:1084399203@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:qmdong@qhu.edu.cn

土壤动物是指生活在土壤当中,且其生命活动的全部过程或者部分过程在土壤中完成,并且对土壤产生一定影响的动物^[1]。通常,土壤动物包括节肢动物、环节动物、线形动物、原生动物、扁形动物、软体动物和缓步动物^[2],其中,螨类、跳虫和线虫是土壤动物中主要的三大类群,统称为中小型土壤动物^[3]。中小型土壤动物不仅数量多,而且分布广,是生态系统中重要的生物组分^[4]。这些中小型土壤动物通过与其他生物因素和非生物因素的相互作用与相互影响,进而在生态系统中扮演着重要的角色^[5-6]。更重要的是,中小型土壤动物作为土壤食物网中重要的生物组分,影响土壤食物网的结构及微生物群落组成^[7-8],同时对植被生长、土壤养分的循环和利用具有重要作用^[9]。

放牧作为草地最主要的人为干扰方式之一,是植物生产向动物生产最直接的转化方式^[10]。在放牧过程中,家畜通过选择性采食、践踏和粪尿排泄等作用进而对草地生态系统产生影响,而中小型土壤动物对外界环境的变化非常敏感,因此放牧对以土壤为主要生活场所的中小型土壤动物的群落结构产生重要影响^[11-12],主要包括以下三个方面的影响:第一,放牧家畜的采食行为。放牧家畜采食草地优势物种有利于增加其他物种的多样性^[13];第二,放牧家畜直接作用于草地生态系统,使草地生态系统内部资源再分配^[14];第三,放牧家畜使植物群落异质性发生改变进而影响中小型土壤动物的群落^[15]。赵巴音那木拉等^[16]以草甸草原为研究对象,对不同利用方式下的中小型土壤动物群落进行研究,研究发现放牧会降低中小型土壤动物的数量、类群数以及多样性指数。刘任涛等^[17]对不同放牧强度影响下自然恢复沙质草地的土壤动物群落进行研究,研究发现,放牧不仅会降低土壤动物的类群,还会降低个体数量和多样性,而且这种影响是长期的。中小型土壤动物作为草地生态系统中重要组成成分,在草地生态系统合理利用与科学管理过程中更应当给予高度的重视。为了系统地了解放牧影响下中小型土壤动物群落结构变化的特征,本研究在总结以往关于放牧对中小型土壤动物影响相关研究的基础上,以中小型土壤动物丰度、物种数、Shannon 多样性指数、丰富度指数、均匀度指数为重要指标,系统

地分析放牧影响下中小型土壤动物群落结构变化,以期放牧草地生物多样性的保护以及合理利用提供可靠的依据。

根据结构多样性假说,在一个生态系统中,植物多样性越高,其所具有的结构多样性也会处于较高的水平^[18]。基于放牧影响,结构多样性降低,草地植物群落组成发生变化,放牧家畜的取食可能会使植物异质性降低,进而影响到中小型土壤动物的分布及多样性^[19]。因此,本文提出如下假设:放牧会降低中小型土壤动物的类群数、丰度及多样性指数,进而对中小型土壤动物的群落结构产生影响。

1 材料与方法

1.1 数据获取及纳入标准

本研究以中国知网(China National Knowledge Infrastructure(CNKI))与 Web of Science 数据库作为本研究检索数据的来源,检索时间为 2002 年 1 月 1 日—2022 年 10 月 31 日。在中国知网数据库中以“土壤节肢动物”“中小型节肢动物”“土壤线虫”“土壤螨类”“土壤跳虫”“中小型土壤动物”为关键词进行检索,共检索到 1 574 篇文献,然后在结果中检索“放牧”关键词,获得中文文献 42 篇;在 Web of Science 数据库中以“soil arthropod”“microarthropod”“soil nematode”“soil mite”“soil springtail”“meso-micro soil fauna”为关键词进行检索,共检索文献数量 2 975 篇,在结果中检索“graze OR grazed OR grazing”,获得英文文献 65 篇。本研究设置以下标准对检索到的文献进行筛选:(1)一篇文献中必须同时包含处理组(放牧)和对照组(围封)两个处理,且处理组和对照组两者设立年限相同;(2)文献必须为研究性文章,剔除综述类文章;(3)文献中至少包含中小型土壤动物“物种数”、“丰度”、“Shannon 多样性指数”、“丰富度指数”、“均匀度指数”多指标中的任一指标。经过上述标准筛选,最终纳入本研究的中英文文献数量为 40 篇,基本信息如表 1 所示,中小型土壤动物群落结构相关指标样本量如表 2 所示。另外,原始文献图中数据通过 GetData 软件获取,表中数据直接进行读取。

表 1 放牧对中小型土壤动物影响的相关文献

Table 1 Literature related to the effects of grazing on Meso-micro soil fauna

文献题目 Title of literature	年份 Year
不同放牧方式对松嫩草地土壤线虫群落特征的影响	2014
不同放牧强度对典型草原土壤线虫群落的影响	2015
不同放牧强度对短花针茅荒漠草原土壤线虫群落组成及多样性的影响	2021
不同放牧强度对温带典型草原土壤微食物网的影响	2022
不同干扰对羊草植株与根际土壤线虫群落及线虫区系的影响	2016
藏北高寒草甸土壤线虫群落对围封及自由放牧的响应	2017
短花针茅荒漠草原不同放牧强度土壤线虫群落研究	2020
短期围封对西藏北部高寒草甸土壤线虫群落的影响	2016
放牧、封育对沙地灌丛内外节肢动物群落的影响	2017
放牧对羊草根际土壤线虫群落及区系的影响	2019
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	2022
放牧和季节对锡林郭勒草原干生中小型土壤动物群落的影响	2011
放牧后自然恢复沙质草地土壤节肢动物群落结构与多样性	2010
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	2016
放牧与施氮对草甸草原土壤线虫群落的作用研究	2016
高寒草甸土壤线虫对放牧强度的响应及机制	2017
季节性轮牧和刈割对内蒙古典型草原土壤线虫的影响	2019
青藏高原高寒草地植物群落与土壤线虫相互关系研究	2020
松嫩草原中度退化草地不同植被恢复方式下土壤跳虫群落特征比较	2008
松嫩草原中度退化草地不同植被恢复方式下土壤线虫的群落特征	2008
松嫩草原中度退化草地不同植被恢复方式下土壤螨类群落特征的差异	2007
围封、放牧、刈割对内蒙古典型草原土壤线虫群落的影响	2022
西藏北部高寒草甸土壤线虫群落特征研究	2015
植被恢复方式对松嫩草原重度退化草地土壤线虫群落特征的影响	2007
中国北方主要草地土壤线虫群落特征及对家畜放牧的响应	2021
Seasonal dynamics of mites (Acari) in pastures and meadows in Poland, with species analysis of Oribatida	2020
Cattle grazing mitigates the negative impacts of nitrogen addition on soil nematode communities	2020
Nematode communities indicate anthropogenic alterations to soil dynamics across diverse grasslands	2021
Changes in plant and arthropod functional traits mediate land use and precipitation effects on grassland production	2022
Land use alters relationships of grassland productivity with plant and arthropod diversity in Inner Mongolian grassland	2020
Long-term cattle grazing shifts the ecological state of forest soils	2022
Ground Beetle (Coleoptera:Carabidae) Responses to Cattle Grazing, Grassland Restoration, and Habitat across a Precipitation Gradient	2022
Livestock grazing promotes ecosystem multifunctionality of a coastal salt marsh	2021
Exploring the optimal grazing intensity in desert steppe based on soil nematode community and function	2022
Effects of stocking rate on the interannual patterns of ecosystem biomass and soil nitrogen mineralization in a meadow steppe of northeast China	2020
Shrublands Ground-Dwelling Arthropods: Their Response to Management	2021
Effect of grazing intensity on plant-parasitic nematodes in an integrated crop – livestock system with low plant diversity	2021
Seasonal patterns of the abundance of ground-dwelling arthropod guilds and their responses to livestock grazing in a semi-arid steppe	2021
The effect of grazing by geese, goats, and fallow deer on soil mites (Acari)	2020
Moderate grazing increases the structural complexity of soil micro-food webs by promoting root quantity and quality in a Tibetan alpine meadow	2021

1.2 数据处理

为了系统且较为全面的认识放牧影响下中小型土壤动物群落结构的变化,分析放牧影响下不同因子(土壤理化性质、植物群落特征)与中小型土壤动物群落结构之间的关系,借助 Meta 分析对大量的数据进行处理,相关指标处理方法如下所示:

为了衡量各个指标比重的重要性,在本研究过

程中,将标准差(Standard deviation, SD)作为重要判断依据,如果中小型土壤动物相关文献中某一指标以标准差的形式出现,则直接用于分析,如果某一指标以标准误(Standard error, SE)的形式出现,则通过以下公式进行相应的换算^[20]:

$$SD = SE \sqrt{n}$$

式中:SD 为标准差,SE 为标准误,n 为样本量。

表2 放牧对中小型土壤动物群落结构、植物及土壤因子的影响的样本数据量

Table 2 Sample data size of the grazing impacts on Meso-micro soil fauna community structure, plant and soil factors

项目 Items	文献篇数 Number of articles	数据数量 Data groups	
		放牧 Grazed	围封 Enclosed
土壤全磷 Soil total phosphorus	5	13	7
土壤全氮 Soil total nitrogen	22	101	57
土壤铵态氮 Ammonium nitrogen	7	40	15
土壤硝态氮 Nitrate nitrogen	8	46	17
土壤速效磷 Soil available phosphorus	8	27	12
土壤速效钾 Soil available potassium	6	24	10
土壤有机质 Soil Organic matter	21	104	57
土壤含水量 Soil moisture	19	99	45
土壤容重 Soil bulk density	8	43	29
土壤 pH 值	23	112	59
植物多样性指数 Plant Shannon-Wiener index	4	8	7
植物丰富度 Plant richness	9	41	20
植物群落盖度 Plant coverage	4	16	6
植物群落生物量 Plant biomass	6	44	20
中小型土壤动物丰度 Meso-micro soil fauna abundance	20	97	54
中小型土壤动物物种数 Meso-micro soil fauna richness	19	71	34
中小型土壤动物多样性指数 Meso-micro soil fauna Shannon-Wiener index	33	150	77
中小型土壤动物丰富度指数 Meso-micro soil fauna Margalef index	20	96	48
中小型土壤动物均匀度指数 Meso-micro soil fauna Pielou index	24	101	49

效应值能够较好的衡量处理对指标的效应,量化变量之间的联系,本研究通过效应值 $\ln R$ 表示放牧影响下中小型土壤动物群落结构指标及环境因子的变化,公式为^[21]:

$$\ln R = \ln \frac{X_t}{X_c} = \ln X_t - \ln X_c$$

式中: X_t , X_c 分别表示放牧和围封处理下某一指标的平均值。

采用加权平均效应值 (RR_{++}) 描述各指标整体的变化大小,为得到加权平均效应值,需要对每一研究的方差 V_i 和权重 ω_i 进行确定,计算公式为^[21]:

$$V_i = \frac{S_t^2}{N_t X_t^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_c^2}$$

$$\omega_i = \frac{1}{V_i}$$

式中: S_t , S_c 分别表示放牧和围封处理下中小型土壤动物各数据的标准差; N_t , N_c 分别表示放牧和围封处理下试验的重复数; ω_i 表示某个研究的权重; V_i 为某一研究内方差。

加权平均效应值 RR_{++} 计算公式为^[20-21]:

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^k \omega_i}$$

式中: $\ln R_i$ 表示每个指标的自然对数响应比; k 表示此次分析研究的数量。

加权平均效应值 RR_{++} 的总体标准误 $S(RR_{++})$ 计算公式为:

$$S(RR_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i}}$$

加权平均效应值 RR_{++} 的 95% 的置信区间 (CI) 计算公式为:

$$CI = RR_{++} \pm 1.96 \times S(RR_{++})$$

通过百分比变化率 (P_c) 可以更直观的描述结果,计算公式为:

$$P_c = (e^{RR_{++}} - 1) \times 100\%$$

1.3 数据分析

本试验数据均借助 R 4.2.2 的 metafor 包分析完成。在数据分析前对各指标效应值进行异质性检验,最终检验结果表明,所有指标间均存在显著异质性,说明纳入到本研究各指标的平均值差异较大,即各研究之间的变异是由随机误差引起的,因此,本研究采用随机效应模型 (Randomized effects model) 进行 Meta 分析。下文所有数据分析及绘图均在 R 4.2.2 中完成。

2 结果与分析

2.1 放牧对中小型土壤动物群落结构、植物及土壤因子的影响

放牧对中小型土壤动物群落结构和不同因子影响程度不同 (图 1)。放牧显著提高了土壤 pH 值 (5.52%)、土壤速效钾 (61.62%) 含量,显著降低了植物群落生物量 (38.26%) ($P < 0.05$)。放牧会降低中小型土壤动物物种数、Shannon 多样性指数、丰富度指数,但会提高中小型土壤动物丰度、均匀度指数,影响在统计上均不显著。

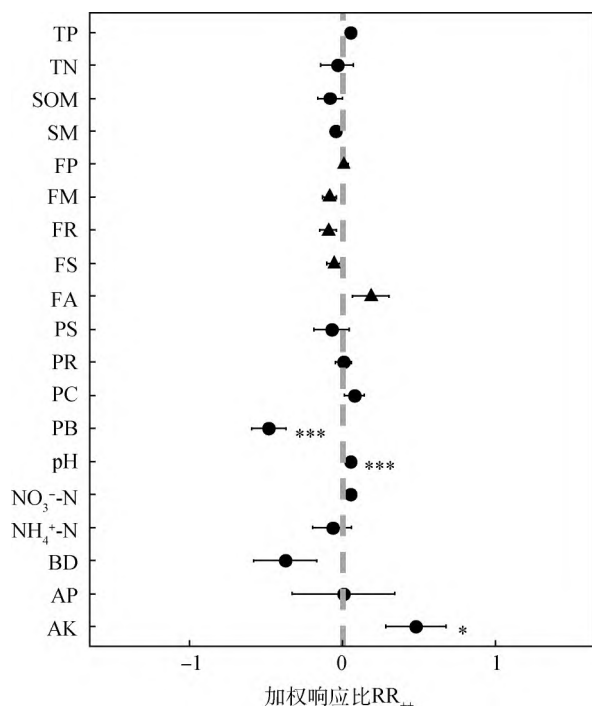


图 1 放牧对中小型土壤动物群落特征和不同因子的影响

Fig. 1 Effect of grazing on community characteristics and different factors of Meso-micro soil fauna

注: TP, 土壤全磷; TN, 土壤全氮; $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 土壤铵态氮; $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 土壤硝态氮; AP, 土壤速效磷; AK, 土壤速效钾; SOM, 土壤有机质; SM, 土壤含水量; BD, 土壤容重; pH, 土壤 pH 值; PS, 植物多样性指数; PR, 植物丰富度; PC, 植物群落盖度; PB, 植物群落生物量; FA, 中小型土壤动物丰度; FR, 中小型土壤动物物种数; FS, 中小型土壤动物多样性指数; FM, 中小型土壤动物丰富度指数; FP, 中小型土壤动物均匀度指数。*** 表示 $P < 0.001$; ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$ 。下同

Note: TP, Soil total phosphorus; TN, Soil total nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$, Nitrate nitrogen; AP, Soil available phosphorus; AK, Soil available potassium; SOM, Soil Organic matter; SM, Soil moisture; BD, Soil bulk density; pH, pH; PS, Plant Shannon-Wiener index; PR, Plant richness; PC, Plant coverage; PB, Plant biomass; FA, Meso-micro soil fauna abundance; FR, Meso-micro soil fauna richness; FS, Meso-micro soil fauna Shannon-Wiener index; FM, Meso-micro soil fauna Margalef index; FP, Meso-micro soil fauna Pielou index. *** indicates $P < 0.001$; ** indicates $P < 0.01$; * indicates $P < 0.05$. The same as below

2.2 放牧影响下不同因子对中小型土壤动物物种数、丰度及多样性的影响

对围封和放牧处理下不同因子对中小型土壤动物物种数、丰度的重要性进行分析(图 2)。对于中小型土壤动物物种数,在围封处理下,影响中小型土

壤动物物种数的因子有 6 个,而在放牧处理下,影响中小型土壤动物物种数的因子有 7 个。对于中小型土壤动物丰度,在围封处理下,影响中小型土壤动物丰度的因子有 4 个,分别为:土壤全磷($P < 0.01$)、土壤硝态氮、土壤速效磷和土壤速效钾($P < 0.05$);在放牧处理下,影响中小型土壤动物丰度的因子有 2 个,分别为:土壤速效钾、土壤全磷($P < 0.01$)。

对围封和放牧处理下不同因子对中小型土壤动物多样性的重要性进行分析(图 3)。对于中小型土壤动物 Shannon 多样性指数,在围封处理下,影响中小型土壤动物 Shannon 多样性指数的因子包括 7 个;而在放牧处理下,影响因子有 11 个。对于中小型土壤动物丰富度指数,在围封、放牧处理下,影响中小型土壤动物丰富度指数的因子均有 6 个,其中植物群落生物量、植物丰富度、土壤硝态氮是围封和放牧处理下影响中小型土壤动物丰富度指数的关键因子。对于中小型土壤动物均匀度指数,在围封处理,影响中小型土壤动物均匀度指数的因子包括 4 个;而在放牧处理,影响中小型土壤动物均匀度指数的因子有 8 个。

2.3 中小型土壤动物群落结构与不同因子的潜在关系

相关性分析结果表明,中小型土壤动物群落结构各指标与各因子之间存在不同的关系(图 4)。在围封处理下,中小型土壤动物丰度与土壤速效钾、土壤含水量呈正相关($P < 0.05$);中小型土壤动物 Shannon 多样性指数与土壤 pH 值呈显著负相关($P < 0.01$);中小型土壤动物丰富度指数与植物群落生物量呈显著正相关,与土壤含水量呈显著负相关($P < 0.01$),与土壤硝态氮、土壤 pH 值呈负相关($P < 0.05$);中小型土壤动物均匀度指数与土壤全磷、土壤含水量呈显著正相关($P < 0.01$)。

在放牧处理下,中小型土壤动物丰度与土壤全磷、土壤速效钾、土壤含水量呈显著正相关($P < 0.01$);中小型土壤动物丰富度指数与植物群落生物量呈显著正相关($P < 0.01$),与土壤有机质、土壤含水量呈显著负相关($P < 0.01$),与土壤容重呈负相关($P < 0.05$);中小型土壤动物均匀度指数与土壤全磷、土壤含水量呈显著正相关($P < 0.01$)。

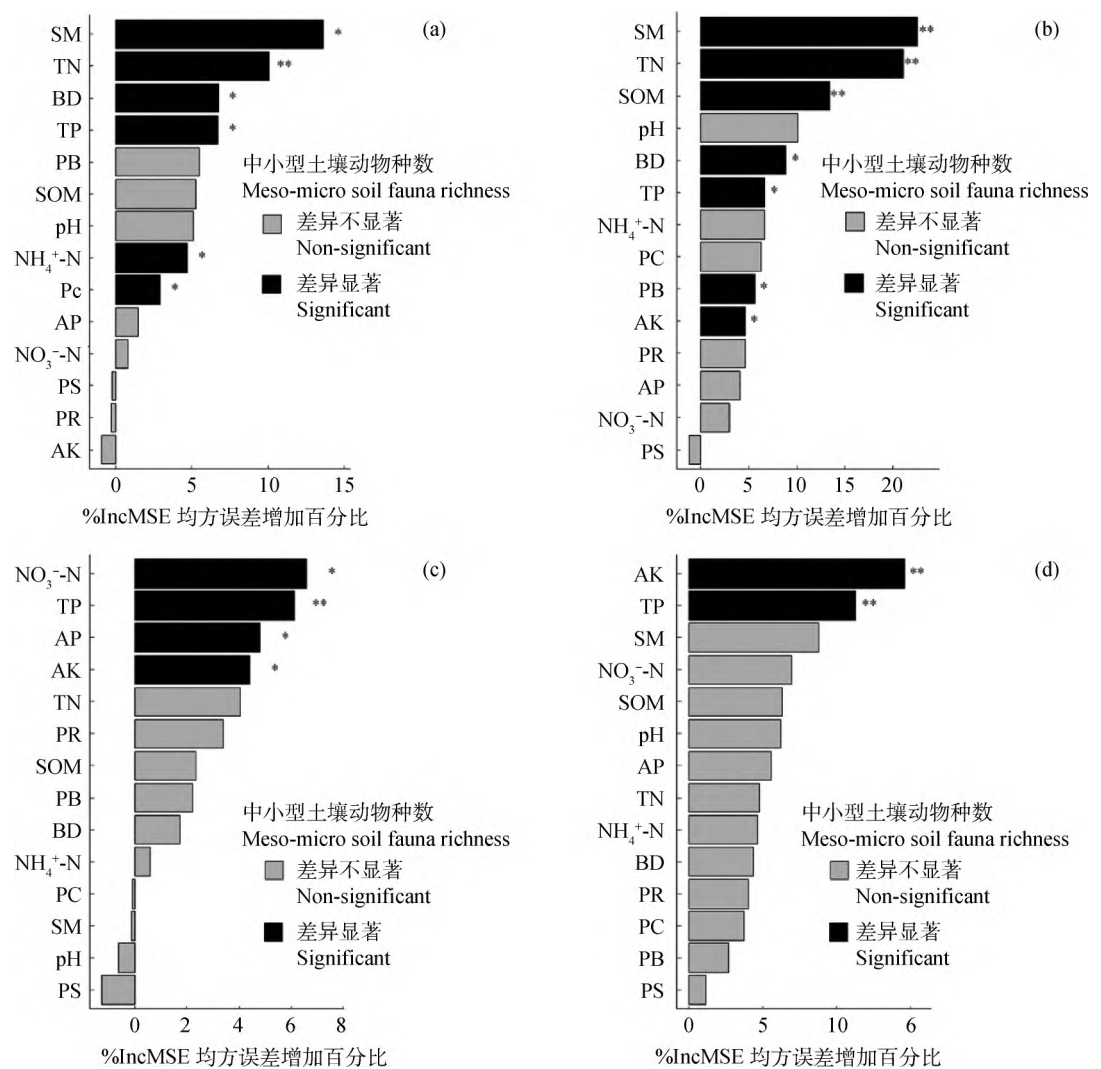


图 2 放牧影响下不同因子对中小型土壤动物物种数和丰度的随机森林模型分析

Fig. 2 Random forest model analysis of different factors on the richness and abundance of Meso-micro soil fauna under grazing influence

注:图 a,c 为围封处理,图 b,d 为放牧处理
Note: Figures a and c are enclosed treatments, figures b and d are grazed treatments

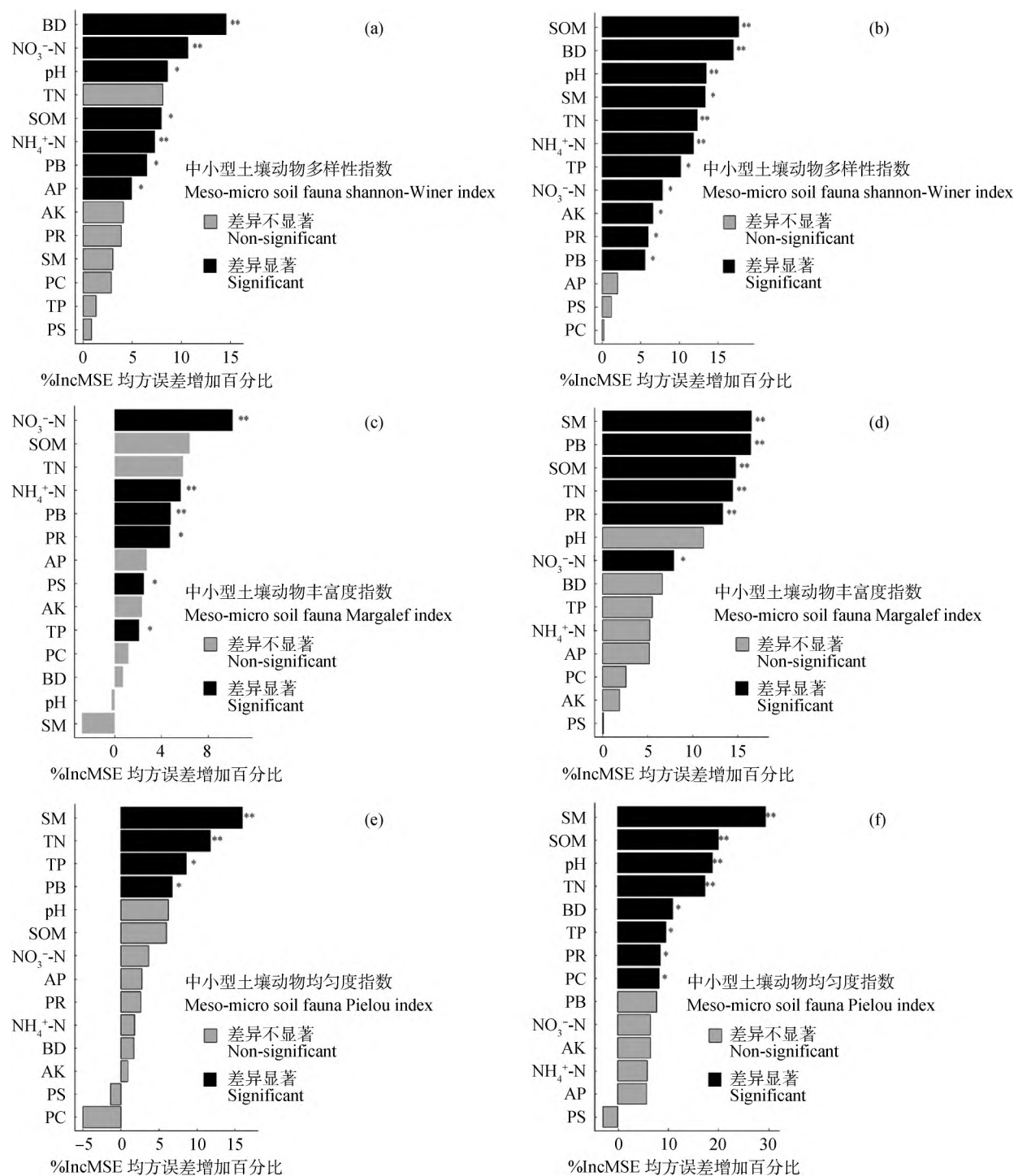


图 3 放牧影响下不同因子对中小型土壤动物多样性的随机森林模型分析

Fig. 3 Random forest model analysis of different factors on the diversity of Meso-micro soil fauna under grazing influence

注:图 a,c,e 为围封处理,图 b,d,f 为放牧处理

Note: Figures a, c and e are enclosed treatments, and figures b, d and f are grazed treatments

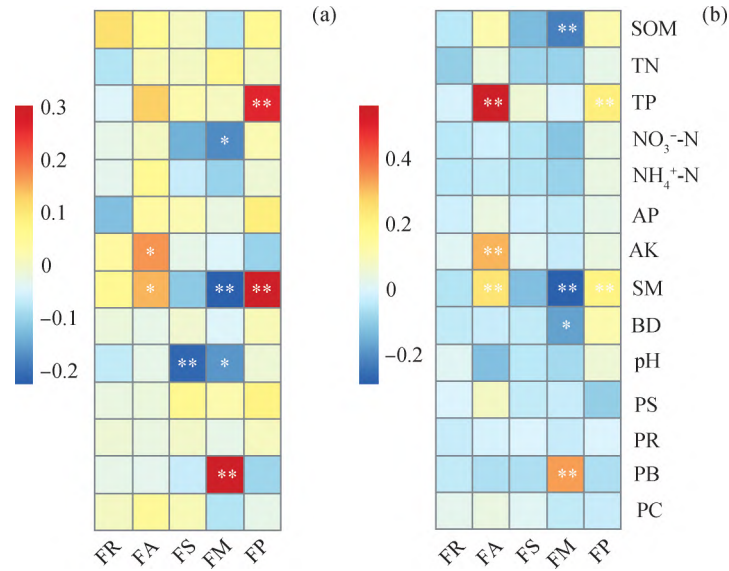


图4 中小型土壤动物与环境因子之间的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between Meso-micro soil fauna and environmental factors

注:图 a 为围封处理,图 b 为放牧处理。红色—负相关,蓝色—正相关,且颜色越深相关系数越大。“**”表示 $P < 0.01$;“*”表示 $P < 0.05$
 Note: Figure a is enclosed treatment and figure b is grazed treatment. Red, negative correlation; blue, positive correlation, the darker the color or the greater the number of correlations. “**” means $P < 0.01$; “*” means $P < 0.05$

为了进一步阐明围封与放牧处理下中小型土壤动物群落结构与不同因子之间潜在的关系,因此,本研究建立了围封和放牧处理下中小型土壤动物物种数、丰度与各因子的结构方程模型。在围封和放牧处理下,中小型土壤动物物种数均显著影响中小型土壤动物丰度($P < 0.05$)。在围封处理下,土壤全氮对中小型土壤动物丰度产生显著正效应(标准化回归系数

$\beta = 0.19, P < 0.05$);而在放牧处理下,土壤全氮对中小型土壤动物丰度产生负效应,但不显著。围封和放牧两个处理共性的结果为,土壤速效钾和土壤全磷对中小型土壤动物丰度产生显著正效应($P < 0.05$)。土壤 pH 值也对中小型土壤动物丰度产生正效应,但不显著,在围封处理下,土壤 pH 值显著影响土壤速效钾含量,进而显著影响中小型土壤动物丰度。

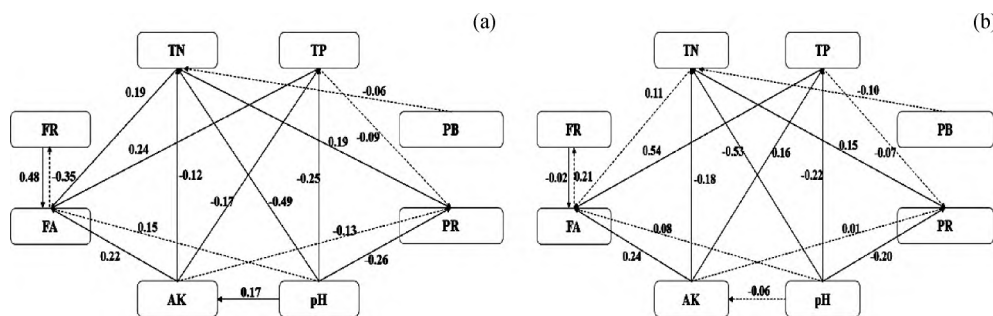


图5 中小型土壤动物与环境因子的结构方程模型分析

Fig. 5 Structural equation modeling analysis of Meso-micro soil fauna with environmental factors

注:图 a 为围封处理, $\chi^2 = 18.064, df = 12, P = 0.114$;图 b 为放牧处理, $\chi^2 = 5.623, df = 12, P = 0.934$ 。图中实线表示 $P < 0.05$,虚线表示 $P > 0.05$ 。TP,土壤全磷;TN,土壤全氮; NH_4^+-N ,土壤铵态氮; NO_3^--N ,土壤硝态氮;AP,土壤速效磷;AK,土壤速效钾;SOM,土壤有机质;SM,土壤含水量;BD,土壤容重;pH,土壤 pH 值;PS,植物多样性指数;PR,植物丰富度;PC,植物群落盖度;PB,植物群落生物量;FA,中小型土壤动物丰度;FR,中小型土壤动物物种数;FS,中小型土壤动物多样性指数;FM,中小型土壤动物丰富度指数;FP,中小型土壤动物均匀度指数

Note: Figure a is enclosed treatment, $\chi^2 = 18.064, df = 12, P = 0.114$; figure b is grazed treatment, $\chi^2 = 5.623, df = 12, P = 0.934$. The solid lines indicate a significant effect ($P < 0.05$), and the dotted lines indicate a non-significant effect ($P > 0.05$). TP, Soil total phosphorus; TN, Soil total nitrogen; NH_4^+-N , Ammonium nitrogen; NO_3^--N , Nitrate nitrogen; AP, Soil available phosphorus; AK, Soil available potassium; SOM, Soil Organic matter; SM, Soil moisture; BD, Soil bulk density; pH, pH; PS, Plant Shannon-Wiener index; PR, Plant richness; PC, Plant coverage; PB, Plant biomass; FA, Meso-micro soil fauna abundance; FR, Meso-micro soil fauna richness; FS, Meso-micro soil fauna Shannon-Wiener index; FM, Meso-micro soil fauna Margalef index; FP, Meso-micro soil fauna Pielou index

3 讨论

3.1 放牧对中小型土壤动物丰度的影响

放牧家畜的选择性采食、践踏和粪尿排泄使草地环境发生相应的变化,例如水土流失、草地地面裸露、地上生物量降低、土壤养分变化等^[22-23],进而会影响以土壤为主要生存场所的中小型土壤动物的丰度^[24]。刘霞等^[25]以内蒙古典型草原为研究对象,研究放牧对土壤动物的影响,研究结果表明:放牧会降低土壤动物的丰度,同时使土壤动物多样性降低;而 Baker^[26]的研究表明,放牧对中小型土壤动物丰度的提高具有正向作用。本研究通过整合分析研究发现,从整体上看,放牧可以提高中小型土壤动物的丰度,这与本文提出的第一个假设相反,其主要原因是放牧家畜粪、尿排泄向土壤返还,能为中小型土壤动物提供更加丰富的食物资源^[27]。此外,放牧家畜排泄物下覆盖的土壤,其养分含量往往比未覆盖的土壤养分含量高,产生“肥岛效应”,为中小型土壤动物提供良好的生存环境^[28]。因此,丰富的食物资源以及良好的生存环境能为中小型土壤动物的生存、繁殖等提供较好的条件^[29],从而对中小型土壤动物丰度产生正向影响。

3.2 放牧对中小型土壤动物物种数和多样性的影响

中小型土壤动物其组成、数量以及分布往往会受到植物群落结构、土壤养分质量、枯落物质量影响^[30]。实际上,无论是地下生态系统还是地上生态系统都是协同进化的^[31],地上植物群落的变化必然会对土壤养分质量产生相应的影响,进而间接地影响到中小型土壤动物的群落结构^[32-33]。随着环境的变化(例如放牧影响下草地退化、草地石漠化等),中小型土壤动物的多样性、类群数往往呈现下降的趋势^[34-36]。这与本研究结果一致,本研究通过整合分析发现,放牧显著降低了植物群落生物量,但显著增加了土壤 pH 值含量,土壤 pH 值与土壤养分的有效性息息相关,会对土壤养分含量多少,存在的状态以及有效性产生重要的影响。草地退化意味着草地生态系统内部失衡、植物群落结构由复杂变为单一、养分质量下降等,促使中小型土壤动物生存的环境及空间受限。此外,放牧可以通过多种作用途径进而影响中小型土壤动物的物种数和多样性。第一,家畜的采食会显著降低植物群落生物量和植物多样性,而植物多样性与植食性中小型土壤动物物种数

和多样性息息相关^[37]。通常,植物多样性较高的情况下,植食性中小型土壤动物物种数较多、多样性较高。第二,家畜的践踏、排泄行为会影响土壤理化性质的变化及枯落物的浅埋,而枯落物的浅埋有利于土壤微生物分解面积的增加^[38],此外,放牧家畜的践踏作用会使土壤物理结构发生变化,导致土壤生物生存环境遭受扰动,改变其垂直分布^[39],进而间接的影响中小型土壤动物的物种数及多样性^[40]。

4 结论

本研究通过 Meta 分析评价了放牧对中小型土壤动物群落结构的影响,结果表明:放牧家畜会影响土壤理化性质及植物群落结构,进而对以土壤为主要生存环境、以碎屑和有机质等为主要食物的中小型土壤动物群落结构产生影响。放牧会提高中小型土壤动物的丰度,但会降低其物种数和多样性,进而改变中小型土壤动物的群落结构。综上,放牧作为复杂的扰动,通过多种途径对中小型土壤动物群落结构产生影响,因此,更应长期探究放牧对中小型土壤动物群落结构影响的直接机制。

参考文献

- [1] 尹文英. 中国土壤动物[M]. 北京:科学出版社,2000:35-36
- [2] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京:科学出版社,1992:52
- [3] DEHARVENG L. Recent advances in Collembola systematics[J]. *Pedobiologia*, 2004, 48(5): 415-433
- [4] 梁志伟,红梅,德海山,等. 氮沉降与降雨变化下中小型土壤动物对凋落物分解的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4279-4288
- [5] BARDGETT R, WARDLE D A. Aboveground-Belowground linkages: biotic interactions, ecosystem processes, and global change[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 92(26): 222-222
- [6] 邵元虎,张卫信,刘胜杰,等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6614-6625
- [7] GARCA-PALACIOS P, MAESTRE F T, KATTGE J, et al. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(8): 1045-1053
- [8] 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[J]. *草业学报*, 2022, 31(2): 62-75
- [9] 倪惠菁,苏文会,范少辉,等. 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 863-872
- [10] 董全民,赵新全,李世雄,等. 基于高寒草地放牧系统次级生产

- 力的优化放牧强度研究[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 919-923
- [11] 孙彩彩, 董全民, 刘文亭, 等. 草地土壤动物群落结构及多样性的研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2021, 51(3): 57-61
- [12] 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[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3482-3491
- [13] 李娜, 唐士明, 郭建英, 等. 放牧对内蒙古草地植物群落特征影响的 meta 分析[J]. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1256-1269
- [14] 刘玉祯, 赵新全, 董全民, 等. 放牧对草地生态系统结构与功能影响的研究进展[J]. 草地学报, 2023, 31(8): 2253-2262
- [15] 白悦, 刘晨, 黄月, 等. 科尔沁沙质草地植物群落高度空间异质性对不同放牧方式的响应[J]. 植物生态学报, 2022, 46(4): 394-404
- [16] 赵巴音那木拉, 兴安, 刘鹏飞, 等. 放牧和刘割对草甸草原中小型土壤动物群落的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(3): 218-225
- [17] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 放牧后自然恢复沙质草地土壤节肢动物群落结构与多样性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2849-2855
- [18] LAWTON J H. Plant architecture and the diversity of phytophagous insects[J]. Annual Review of Entomology, 1983, (28): 23-39
- [19] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 牦牛放牧率与小高草高寒草甸暖季草地上、地下生物量相关分析[J]. 草业科学, 2005, 22(5): 65-71
- [20] 才璐, 王林林, 罗珠珠, 等. 中国苜蓿施肥产量效应的 Meta 分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 838-848
- [21] YU Y Y, NEIL C T, GONG Y G, et al. Benefits and limitations to straw and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: A meta-analysis across hydrothermal gradients[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 99(9): 138-147
- [22] 赵敏, 赵坤, 王赞博, 等. 长期放牧干扰降低了短花针茅荒漠草原植物多样性[J]. 草业学报, 2023, 32(9): 39-49
- [23] 牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 等. 放牧强度对高寒草甸土壤理化性状和植物功能群的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5006-5016
- [24] LIU L, LI S, WILSON G W T, et al. Nematode communities indicate anthropogenic alterations to soil dynamics across diverse grasslands[J]. Ecological Indicators, 2021, 132(5): 108338
- [25] 刘霞, 赵东, 程建伟, 等. 放牧和刘割对内蒙古典型草原大型土壤动物的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1869-1878
- [26] BAKER G. Recognising and responding to the influences of agriculture and other land-use practice on soil fauna in Australia[J]. Applied Soil Ecology, 1998, 9(1-3): 303-310
- [27] 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[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1826-1834
- [28] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 204-211
- [29] 赵乌英嘎, 红梅, 赵巴音那木拉, 等. 不同耕作方式下黑土区农田中小型土壤动物群落特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 39-45
- [30] LIU C, SONG X X, WANG L, et al. Effects of grazing on soil nitrogen spatial heterogeneity depend on herbivore assemblage and pre-grazing plant diversity[J]. Journal of Applied Ecology, 2016, 53(1): 242-250
- [31] 崔猛, 冯媛媛, 王新宇, 等. 不同放牧方式对松嫩草地地下、地上生物量及其分配比例的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2021, 53(4): 144-150
- [32] 宋理洪, 武海涛, 吴东辉. 我国农田生态系统土壤动物生态学进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2898-2906
- [33] 吴廷娟. 全球变化对土壤动物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 581-588
- [34] 刘任涛, 朱凡, 赵哈林. 北方农牧交错区土地利用覆盖变化对大型土壤动物群落结构的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(4): 643-649
- [35] 吕世海, 卢欣石, 高吉喜. 呼伦贝尔草地风蚀沙化土壤动物对环境退化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2055-2060
- [36] ZHU H, WANG D L, WANG L, et al. The effects of large herbivore grazing on meadow steppe plant and insect diversity[J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 49(5): 1075-1083
- [37] ROOT R. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (*Brassica oleracea*) [J]. Ecological Monographs, 1973, 43(1): 114-115
- [38] MANHAES C M, GAMARODRIGUES E F, MOCO M K, et al. Meso- and macrofauna in the soil and litter of leguminous trees in a degraded pasture in Brazil[J]. Agroforestry Systems, 2013, 87(5): 993-1004
- [39] LEZAMA F, PARUELO, JOSE M, et al. Disentangling grazing effects: trampling, defoliation and urine deposition[J]. Applied Vegetation Science, 2016, 19(4): 557-566
- [40] WANG K H, MCSORLEY R, BOHLEN P, et al. Cattle grazing increases microbial biomass and alters soil nematode communities in subtropical pastures[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(7): 1956-1965

(责任编辑 刘婷婷)