

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.022

引用格式:冯金磊,屈晓婉,张若冰,等.刈割对半干旱草地土壤线虫群落结构的影响[J].草地学报,2026,34(2):601–610

FENG Jin-lei, QU Xiao-wan, ZHANG Ruo-bing, et al. Effects of Clipping on Soil Nematode Community Structure in Semi-arid Grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):601–610

刈割对半干旱草地土壤线虫群落结构的影响

冯金磊¹, 屈晓婉², 张若冰¹, 李江艳¹, 贾颖欣¹, 张玉丹¹, 苏鹏^{1*}, 王益博³,
邱林⁴, 苗原¹, 王冬¹

(1. 河南大学生命科学学院, 河南 开封 475004; 2. 广东水保生态工程咨询有限公司, 广东 广州 510640;
3. 河南灵宝市特色农业发展中心, 河南 三门峡 472500; 4. 河南省信阳市林业科学研究所, 河南 信阳 464031)

摘要:土壤线虫作为草地生态系统物质循环与能量流动的关键指示生物,其群落动态对地上-地下生态过程具有重要意义。刈割是我国半干旱草原常见的土地利用方式,但其对土壤线虫群落组成与结构的影响机制尚不明晰。本试验选取内蒙古典型草地,以优势种不同的6个植物群落为研究对象,探究刈割对土壤线虫群落组成、结构及功能足迹的影响,旨在为促进草地土壤科学管理提供理论依据。研究结果表明:与对照相比,刈割显著增加了土壤线虫总丰度、食细菌线虫相对丰度、成熟度指数和瓦斯乐斯卡指数,显著降低了植物寄生线虫相对丰度、营养多样性指数、Shannon-Wiener指数、均匀度指数和富集指数($P < 0.05$)。区系分析表明,刈割增加了土壤线虫的功能足迹及食物网结构化程度,降低了富集指数。硝态氮含量、凋落物量及总碳含量是影响土壤线虫群落组成的关键环境因子。刈割改变了线虫群落结构,降低了对植物生长发育具有阻碍作用的植物寄生线虫数量,有利于土壤养分功能的提高并促进植物群落生长。研究表明,刈割是一种利于典型草地土壤线虫群落结构与组成维持的合理管理措施。

关键词:半干旱草地;刈割;土壤线虫;区系分析;生物多样性

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0601-10

Effects of Clipping on Soil Nematode Community Structure in Semi-arid Grasslands

FENG Jin-lei¹, QU Xiao-wan², ZHANG Ruo-bing¹, LI Jiang-yan¹, JIA Ying-xin¹, ZHANG Yu-dan¹,
SU Peng^{1*}, WANG Yi-bo³, QIU Lin⁴, Miao Yuan¹, WANG Dong¹

(1. School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng, Henan Province 475004, China; 2. Guangdong Shuibao Ecological Engineering Consulting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong Province 510640, China; 3. The Characteristic Agricultural Development Center, Lingbao County, Sanmenxia, Henan Province 472500, China; 4. The Forest Science Research Institute of Xinyang, Xinyang, Henan Province 464031, China)

Abstract: Soil nematodes are pivotal for material cycling and energy flow in grassland ecosystems. Clipping is a widespread grassland management practice in northern China. However, the mechanisms by which clipping affects the composition and structure of soil nematode communities remain unclear. nematode functional footprints across plant communities remain poorly understood. This experiment examined how clipping influenced soil nematode composition, structure, and functional footprint across six plant communities in the typical steppe of Inner Mongolia, providing a theoretical basis for grassland ecosystem management. Clipping significantly increased the total abundance of soil nematodes, the relative abundance of bacterivores, the maturity index, and the Wasilewska index. At the same time, it reduced the relative abundance of plant parasitic nematodes, the nutritional diversity index, the Shannon-Wiener index, the evenness index, and the enrichment index. Fauna analysis revealed that clipping increased the functional footprint of soil nematodes and food web complexity,

收稿日期:2024-12-06;修回日期:2025-04-03

基金项目:河南省自然科学基金项目(242300421102);河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2024GGJS018);信阳生态研究院开放基金项目(2023XYQN11)资助

作者简介:冯金磊(1999-),男,汉族,山东济南人,硕士研究生,主要从事恢复生态学研究, E-mail: fengjl1999@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: 15503785877@163.com

while it reduced the enrichment index. Soil nematode community composition was significantly affected by soil nitrate nitrogen content, total carbon content, and litter mass. Our results demonstrated that clipping restructured nematode community composition, reducing plant parasitic nematodes' abundance, thereby improving soil nutrient functions and promoting plant growth. This study concludes that clipping effectively maintains soil nematode community structure in typical steppe, offering a science-based framework for sustainable grassland management in northern China.

Key words: Semi-arid grassland; Clipping; Soil nematodes; Fauna analysis; Biodiversity

土壤线虫在土壤食物网中占据多个营养级,在促进养分循环、维持土壤生物多样性以及改善土壤质量等方面发挥着重要作用^[1-2]。根据线虫的营养类型和结构特征,可将线虫划分为四种营养类群:食细菌、食真菌、植物寄生以及杂食-捕食性线虫^[3]。由于土壤线虫结构与组成对环境变化的敏感性,常被用作土壤健康和生态系统稳定性评估的生物指标^[4]。其中,线虫成熟度指数等生态指标可定量表征线虫群落结构和功能属性,进而评估土壤生态系统功能^[5]。Ferris^[6]于2010年提出了线虫代谢足迹(Nematode metabolic footprint, NMF)概念,即通过度量线虫的代谢活性和土壤食物网功能反映线虫的碳代谢过程,通过区系分析评估食物网的有效资源状况估算线虫对生态系统服务和功能的贡献。草地作为全球面积最大的陆地生态系统,其生态服务价值与资源禀赋对人类社会至关重要^[7]。但是,草地生态系统土壤线虫群落结构与组成对刈割、放牧等草地利用方式的变化响应敏感^[8]。

我国北方半干旱草地在涵养水源、防风固沙以及生物多样性保护等方面发挥着重要作用^[9-10]。刈割作为我国北方草地管理的主要利用方式,改变草地生产力,影响土壤线虫的食物来源,并通过土壤微环境影响土壤线虫的生长与活动^[11]。研究表明,刈割降低了松嫩草原碱化羊草草地线虫群落个体丰度及类群丰富度^[12],但有助于贝加尔针茅草原食物网连通及食物链增长^[13]。不同植物群落通过根系分泌物、凋落物分解、养分循环等过程对土壤线虫产生差异化调控效应^[14-15]。土壤线虫与植物之间存在紧密联系,植物不仅为线虫提供生存所需的食物来源,还为其创造了适宜的繁殖环境,线虫则将土壤中的有机物等养分分解矿化,供给植物及其他土壤生物生长发育^[16]。刈割通过改变土壤养分含量、影响植物生长状况以及凋落物的质量及数量,从而影响土壤线虫群落^[17]。

我国北方半干旱草地由于气候及地形差异,草地优势物种多样,形成了以羊草、冰草及冷蒿等多种优势类型植物群落草地。前期研究多集中于刈割

对单一植物群落土壤线虫群落与结构的影响,缺乏从多个植物群落角度评价土壤线虫组成与结构的响应^[12-13]。内蒙古典型草地是我国北方半干旱草地的主体,不仅是当地经济基础,也是我国重要的生态屏障^[18]。在当前半干旱气候环境条件下,研究刈割对半干旱草地多个植物群落土壤线虫组成与结构的影响,可为草地生态系统的可持续管理及生物多样性保护提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县(42°11' N, 116°28' E, 海拔约1324 m),属中温带半干旱季风气候,年平均气温2.6℃,年平均降水量383.7 mm,降水主要集中在6—8月,夏季温暖潮湿,冬季寒冷干燥。土壤类型为栗钙土,有机质含量较低。地带性植被为典型温带草地,主要植物有羊草(*Leymus Chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、针茅(*Stipa capillata*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、细叶韭(*Allium tenuissimum*)等。

1.2 试验设计

本试验选取优势物种分别为羊草、冰草、针茅、菊叶委陵菜、冷蒿以及胡枝子的植物群落作为研究对象。2005年开始,在每个植物群落随机设置4个地势平坦、坡度坡向一致的样地,每个样地包括2个10 m×10 m的试验区,分别为刈割和对照处理。每年9月上旬,当植株开始黄化时,在刈割区将土壤表面以上5 cm的植物去除一次^[19]。每个植物群落样地的对照区和刈割区之间的距离小于20 m。研究包括24个样地、48个试验区。

1.3 样品采集与处理

2020年9月上旬,在每个小区随机设置一个

0.5 m×0.5 m样方,使用样方法与目视法调查植被覆盖度(Cover),记录各冠层垂直投影占样方面积的百分比。收集凋落物并放于烘箱65℃持续烘干48 h,称重以确定凋落物量(Litter mass)。采用直径7 cm土钻在每个样方随机选取五个样点,采集0~10 cm深度的土壤样品。将收集到的土壤样品混合均匀后,用2 mm孔径的筛网过滤以去除石头和植物碎根等杂物。随后将土壤样品分成两部分,一部分用于分析土壤理化性质,另一部分存放于4℃冷藏环境,用于后续土壤线虫的测定。

土壤含水量(Soil water content, SWC)采用重量分析法测定;硝态氮含量(Soil nitrate nitrogen content, NO₃⁻-N)采用比色法利用紫外分光光度计(UV-1900)测定;土壤pH值采用电位法(水土比为2.5:1)利用pH计(Mettler Toledo FE28-Standard pH Meter)测定;土壤总碳(Soil total carbon content, TC)和总氮含量(Soil total nitrogen content, TN)采用燃烧法利用半常量元素分析仪(Elementar vario MACRO CUBE, Elementar Co., Hanau, Germany)测定;土壤容重采用环刀法测量,具体步骤参考《土壤农化分析》第三版^[20]。

1.4 土壤线虫的分离与鉴定

用改良的贝尔曼漏斗法在50 g新鲜土壤中分离提取线虫48 h^[21],采用离心管收集线虫悬浮液,置于离心机中以2500 r·min⁻¹离心5 min,用滴管移除离心管底部5 mL外的所有上层液体,并在65℃下对线虫进行热杀处理3 min。待冷却至室温后,滴加4%浓度三乙醇胺-福尔马林固定液,混合摇匀后备用。依据尹文英^[22]《中国土壤动物图鉴》对土壤线虫进行鉴定,在光学显微镜(×100~400)下统计线虫数量后,随机选取100条鉴定到属(小于100条全部鉴定)。根据线虫食性、头部形态学及尾部特征划分线虫类群^[23]:食细菌线虫、食真菌线虫、植物寄生线虫和杂食-捕食线虫。

1.5 线虫生态指数计算

(1) 线虫总丰度(Total nematode abundance):根据土壤质量含水量,计算每100 g干土中土壤线虫数量。

(2) 线虫丰富度(Generic richness, GR):表示样地中线虫群落物种数量,本试验指已鉴定线虫属的数量。

(3) 香农-维纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity, H'): $H' = -\sum_{i=1}^s p_i \times \ln p_i$, 式中 p_i 表示线虫群落第 i 个物种数量占总数量的比例^[23]。

(4) 均匀度指数(Evenness index, J'): $J' = \frac{H'}{\ln S}$, 式中 S 为鉴定土壤线虫分类单元属的数量。

(5) 成熟度指数(Maturity index, MI): $I_M = \sum v_i \times f_i$, 式中 v_i 为第 i 类群的c-p值, f_i 为自由生活线虫类群 i 占样本线虫总数的比例。

(6) 富集指数(Enrichment index, EI): $I_E = 100 \left(\frac{e}{e+b} \right)$

(7) 结构指数(Structure index, SI): $I_S = 100 \left(\frac{s}{s+b} \right)$

式中 b 为包括BF₂和FF₂类群的基础食物网组分, e 为包括BF₁和FF₂类群的富集组分, s 为包括BF₃-BF₅、FF₃-FF₅和OP₃-OP₅类群的结构组分^[24]。

(8) 瓦斯乐斯卡指数(Wasilewska index, WI): $I_W = (B_a + F_u)/P_p$,

式中 B_a 、 F_u 和 P_p 分别为食细菌线虫、食真菌线虫和植物寄生线虫的数量。

1.6 线虫代谢足迹与区系分析

根据Ferris^[6]“线虫-植物专家信息系统”(http://plpnemweb.ucdavis.edu/nemaplex)中列出的线虫生物量(鲜重, W)计算线虫代谢足迹。

$$I_{NMF} = \sum [0.1N_t \times (W_t/m_t) + 0.273(W_t^{0.75})]$$

式中, N_t 表示 t 类线虫的个体数量; m_t 和 W_t 分别表示 t 类线虫c-p值和生物量。

依据计算得出的富集足迹(F_e)和结构足迹(F_s),以(SI, EI)为中心坐标点,在A, B, C, D 4个象限中绘制出4个坐标点:(SI, EI-0.5 F_e /k)、(SI+0.5 F_s /k, EI)、(SI, EI+0.5 F_e /k)和(SI-0.5 F_s /k, EI),其中 k 为转换常数^[25]。依次连接4个坐标点,线虫的功能代谢足迹即为圈定的四边形区域的面积。

1.7 统计分析

数据分析与统计使用R软件(version 4.2.3)处理,所有数据进行正态检验(Shapiro-Wilk)和方差齐性检验(Levene's 检验),通过单因素方差分析

(One-way ANOVA analysis)检验刈割对土壤线虫丰度、土壤线虫各营养类群相对丰度、土壤线虫的群落结构指数的差异显著性($P<0.05$),采用邓肯多重范围检验(Duncan's multiple range test)不同草地类型间的差异,并以线虫属群落结构为响应变量,环境因子为解释变量,进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。所有数据测定结果均用平均值±标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 刈割对土壤线虫总丰度和各营养类群相对丰度的影响

刈割显著改变了土壤线虫总丰度、食细菌线虫相对丰度以及植物寄生线虫相对丰度($P<0.05$,

表 1,图 1 和图 2a,c)。对照处理线虫总丰度为 1499 ind·(100 g)⁻¹ dry soil,刈割处理线虫总丰度为 2235 ind·(100 g)⁻¹ dry soil。与对照相比,刈割处理土壤线虫总丰度、食细菌线虫相对丰度分别显著提高了 49.11% 和 18.37%;植物寄生线虫相对丰度降低了 30.45%。

与对照相比,刈割处理羊草群落草地土壤线虫总丰度和食真菌线虫相对丰度分别显著增加了 82.35% 和 136.67%;针茅群落草地土壤食真菌线虫相对丰度显著降低了 51.43%;菊叶委陵菜群落草地土壤食细菌线虫相对丰度显著增加了 62.42%,杂食-捕食线虫相对丰度显著降低了 45.98%;胡枝子群落草地土壤线虫总丰度和食真菌线虫相对丰度分别显著增加了 233.40% 和 64.15%($P<0.05$,表 1,图 1 和图 2a-b,d)。

表 1 刈割对土壤线虫总丰度、各营养类群相对丰度、群落结构指标的影响方差分析表

Table 1 One-way ANOVA analysis of the effects of clipping on total abundance of soil nematodes, relative abundance of each trophic group, and community structure index

响应变量 Response variables	羊草 <i>Leymus Chinensis</i>	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	针茅 <i>Stipa capillata</i>	菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	总物种 Total
线虫总丰度 Nematode abundance	<0.01	0.14	0.80	0.08	0.12	0.02	0.02
食细菌线虫相对丰度 Relative abundance of bacterivores nematodes	0.83	0.78	0.05	0.02	0.13	0.85	0.01
食真菌线虫相对丰度 Relative abundance of fungivores nematodes	0.04	1.00	0.03	0.93	0.64	<0.01	0.55
植物寄生线虫相对丰度 Relative abundance of plant parasitic nematodes	0.07	0.63	0.09	0.06	0.07	0.93	<0.01
杂食-捕食线虫相对丰度 Relative abundance of omnivores/predators nematodes	0.65	0.17	0.16	0.02	0.41	0.13	0.45
营养多样性 Trophic diversity	0.43	0.53	0.04	0.02	0.19	0.67	0.03
香农-维纳指数 Shannon-Wiener index	0.52	0.83	0.07	0.15	0.24	0.88	0.04
均匀度指数 Evenness index	0.49	0.60	0.10	0.16	0.17	0.22	0.01
丰富度指数 Richness index	0.59	0.21	0.91	0.07	0.66	0.58	0.45
成熟度指数 Maturity index	0.17	0.17	0.02	0.25	0.04	0.31	<0.01
植物寄生线虫成熟度指数 Plant parasite index	0.09	0.92	0.07	0.06	0.08	0.90	<0.01
结构指数 Structure index	0.31	0.36	0.09	0.43	0.88	0.62	0.95
瓦斯乐斯卡指数 Wasilewska index	0.16	0.90	0.16	0.02	0.12	0.41	<0.01

注:表中数字为方差分析所得 P 值, $P<0.05$ 代表差异显著,即表中加粗数字

Note: The numerical values in the table represent P-values derived from ANOVA, where bolded numbers indicate statistically significant differences ($P<0.05$)

2.2 刈割对土壤线虫群落结构指数的影响

刈割对 6 种植物群落草地土壤线虫群落的营养多样性、Shannon-Wiener 多样性、均匀度指数、植物寄生线虫成熟度指数、土壤线虫成熟度指数和瓦斯乐斯卡指数有显著影响($P<0.05$,表 1,图 3b-d 和图 4a-b,d)。与对照相比,刈割处理下营养多样性指数、Shannon-Wiener 多样性、均匀度指数和植物寄生线虫成熟度指数,分别显著降低了 10.40%,

6.32%,6.17% 和 26.41%,成熟度指数和瓦斯乐斯卡指数显著增加了 9.21% 和 124.38%。

刈割处理针茅群落草地土壤线虫营养多样性指数显著降低了 22.22%,成熟度指数增加了 23.05%;菊叶委陵菜群落草地土壤线虫营养多样性指数显著降低了 33.17%,瓦斯乐斯卡指数增加了 226.57%;冷蒿群落草地土壤线虫成熟度指数显著增加了 13.67%($P<0.05$,表 1,图 3b 和图 4a,d)。

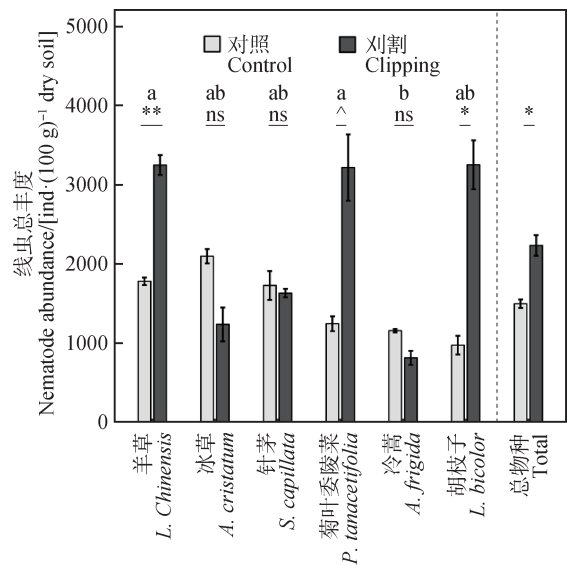


图 1 刈割对 6 种植物群落土壤线虫总丰度的影响 (平均值±均值标准误)

Fig. 1 Effects of clipping on the total abundance of soil nematodes in six plant communities (Mean±SE)

注:不同小写字母表示不同植物群落之间差异显著,ns $P>0.1$, * $P<0.1$, ** $P<0.05$, *** $P<0.001$,表示相同植物群落之间对照与刈割之间的差异

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among six plant communities, ns $P>0.1$, * $P<0.1$, ** $P<0.05$, *** $P<0.001$, * indicates differences between control and clipping treatments among the same plant community types

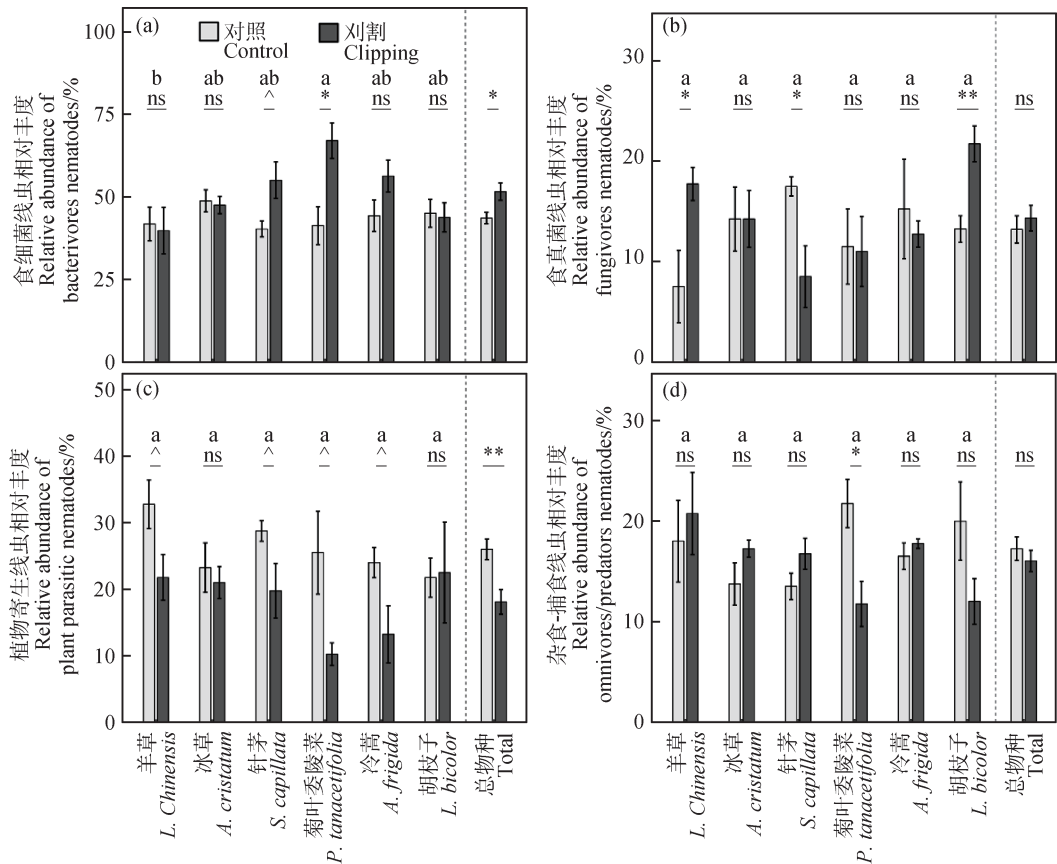


图 2 刈割对 6 种植物群落各营养类群相对丰度的影响 (平均值±均值标准误)

Fig. 2 Effects of clipping on the relative abundance of trophic groups in six plant communities (Mean±SE)

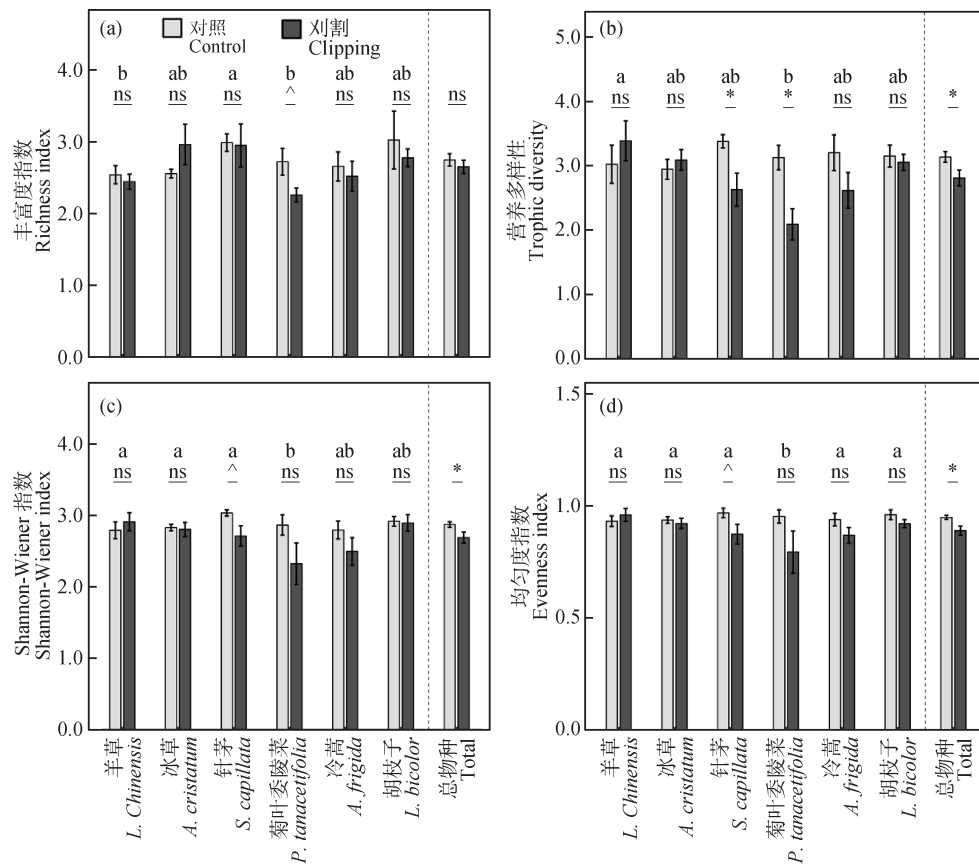


图3 刈割对6种植物群落土壤线虫群落多样性指数的影响(平均值±均值标准误)

Fig. 3 Effects of clipping on the diversity index of soil nematode communities in six plant communities (Mean±SE)

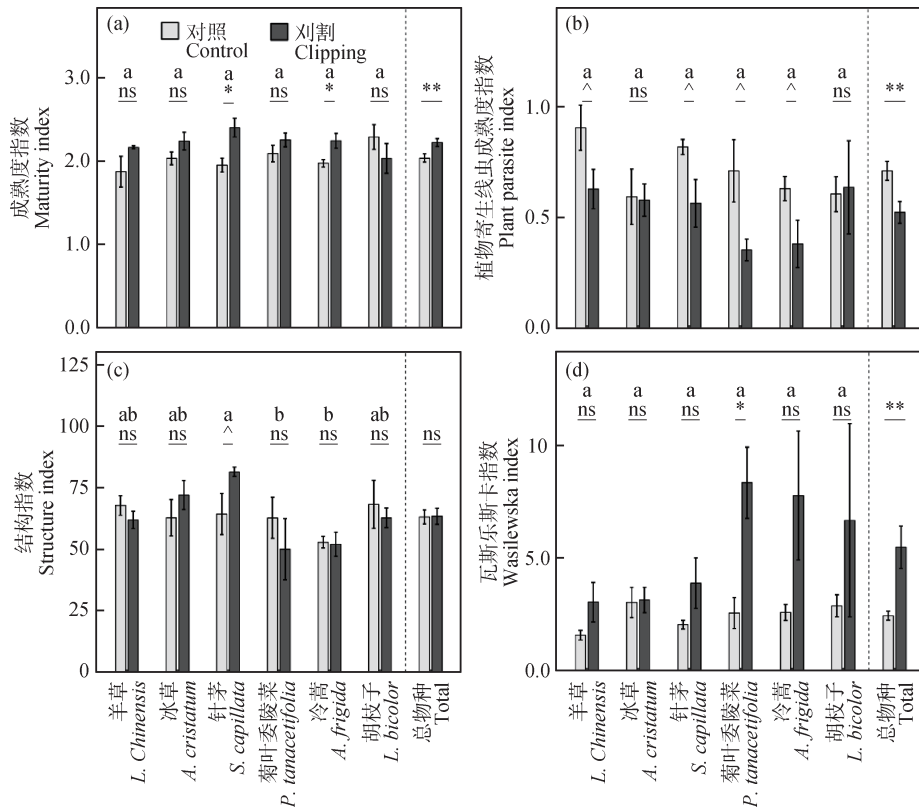


图4 刈割对6种植物群落土壤线虫群落生态功能指数的影响(平均值±均值标准误)

Fig. 4 Effects of clipping on ecological function indexes of soil nematode communities in six plant communities (Mean±SE)

2.3 刈割处理下不同植物群落土壤线虫区系分析

区系分析表明(图 5),无论刈割还是对照,6 种植物群落草地土壤线虫富集指数均小于 50,刈割平均为 20.71,对照平均为 24.50;结构指数在 50~100 之间,刈割平均为 63.33,对照平均为 63.07,均分布在 C 象限内。土壤线虫的富集指数(四边形中心位置)随着刈割而降低,线虫功能足迹(四边形总面积)表现为刈割大于对照。与对照相比,刈割处理 6 个优势种草地群落土壤线虫结构代谢足迹、富集代谢足迹和功能足迹分别提高了 20.86%、37.20% 和 108.34%。

2.4 土壤线虫群落与环境因子的关系

冗余分析前两轴解释了线虫群落结构变异的 59.47%,第一轴、第二轴解释比例分别为 41.43% 和 18.04%(图 6)。第一主轴上,土壤 pH 与 Cover 为主要影响因子;第二主轴上, NO_3^- -N、Litter mass 与 TC 为主要影响因子。分析结果显示:土壤理化

性质、植物群落与土壤线虫属水平群落结构存在较强相关性, NO_3^- -N, Litter mass, TC 对土壤线虫群落组成影响显著。

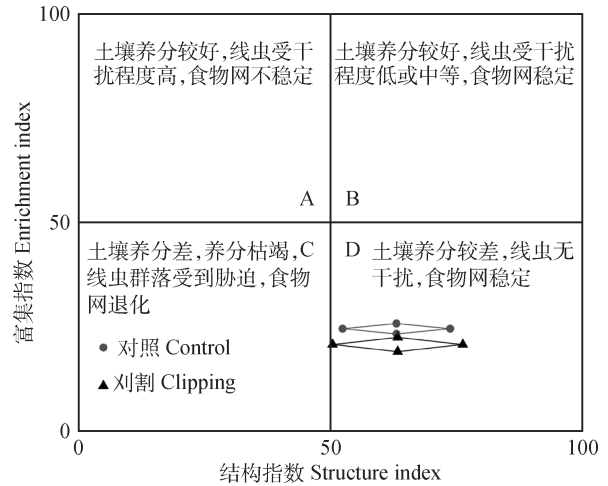


图 5 刈割与对照处理下土壤线虫区系分析
(基于线虫代谢足迹)

Fig. 5 Analysis of soil nematode flora under clipping and control treatments (based on nematode metabolic footprint)

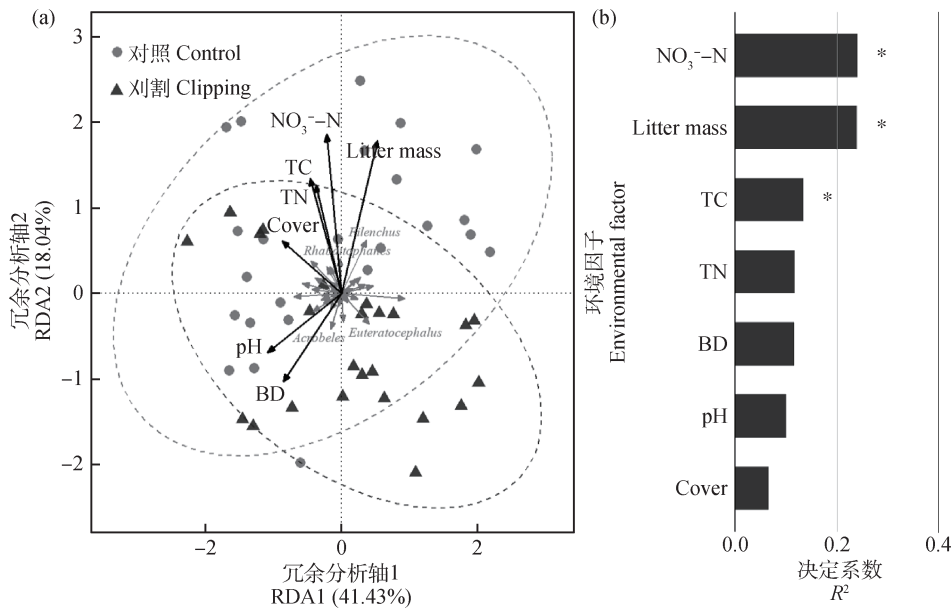


图 6 环境因子与土壤线虫群落的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of environmental factors and soil nematode community

注: NO_3^- -N, 土壤硝态氮含量; Litter mass, 凋落物量; TC, 土壤总碳含量; TN, 土壤总氮含量; BD, 土壤容重; Cover, 覆盖度; * $P < 0.05$

Note: NO_3^- -N, nitrate nitrogen; litter mass; TC, soil total carbon; TN, soil total nitrogen; BD, soil bulk density; Cover, plant cover; * $P < 0.05$

3 讨论

内蒙古典型草地刈割处理对土壤线虫群落产生了显著影响。具体而言,刈割显著增加了 6 种草地植物群落、羊草及胡枝子植物群落土壤线虫总丰度(图 1)。这与 Zhao 等^[26]的研究结果一致,刈割减

少了植物群落种间竞争,提高了光利用率,通过维持生物多样性从而提高土壤线虫总丰度^[27]。刈割显著增加 6 种草地植物群落平均食细菌线虫相对丰度及菊叶委陵菜植物群落食细菌线虫相对丰度。刈割促进菊叶委陵菜植物群落残体分解,土壤中易分解有机碳输入增加,促进了细菌群落增长,从而

增加食细菌线虫数量^[28]。本研究发现刈割显著降低了植物寄生线虫相对丰度(图2),这与侯林秀等^[29]的研究结果相反。可能是由于刈割导致植物寄生线虫栖息地和根系食物资源发生变化,植物寄生线虫获取食物难度增加,降低了植物寄生线虫对草地植物群落的侵害,增加了植物物种的多样性^[30]。刈割降低植物群落生物量,减少营养元素的向下输入,减少根系分泌物,从而降低植物寄生线虫的丰富度^[31]。此外,刈割降低了冷蒿植物群落化感物质的释放,通过减少对其他植物的抑制作用,提高了植物生存能力,促进了草地植物群落的生长和繁殖^[32]。Mercado-Blanco等^[33]研究表明土壤环境及养分状况对土壤动物的生存具有显著影响,这与土壤线虫群落与环境因子的冗余分析结果表明土壤 NO_3^- -N、Litter mass和TC对土壤线虫群落存在显著影响的结果一致(图6)。

本研究通过对比分析刈割对土壤线虫群落的影响,发现刈割显著降低了土壤线虫的营养多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数及均匀度指数(图3)。这一结果与Wilschut等^[34]的研究相一致,刈割导致植被覆盖度降低和凋落物量下降,改变了土壤环境,导致一部分线虫种类难以适应,其种类数量因此减少,从而降低了多样性指数。成熟度指数和植物寄生线虫成熟度指数可以评价土壤健康程度、受干扰程度及土壤生物的演替状态^[35]。本研究结果显示,刈割显著增加了6种草地植物群落、针茅及冷蒿植物群落成熟度指数,降低了植物寄生线虫成熟度指数(图4)。针茅及菊叶委陵菜植物群落食真菌线虫数量下降但是食细菌线虫数量上升,这种差异性响应易造成单一资源优势,优势物种线虫垄断资源,导致线虫多样性下降^[36]。刈割减少植物竞争,促进养分循环,从而提高土壤质量,增加植物群落多样性^[37]。本研究表明线虫群落正处于演替阶段后期,各植物群落内部扰动较低,土壤环境相对稳定^[38]。瓦斯乐斯卡指数代表土壤中食微线虫和植物寄生线虫的相对比例,常用于评价土壤线虫种群结构、土壤食物网矿化途径以及土壤健康程度。本研究中,刈割显著提高了瓦斯乐斯卡指数,其值为5.48。这是由于刈割增加了食微线虫比例,降低了植物寄生线虫比例,该结果表明刈割有助于土壤矿化,降低植物寄生线虫对典型草地植物群落的损害。刈割对6种草地植物群落土壤线虫结构产生的影响源于群落功能补偿与资源输入的差异:深

根系植物(如羊草、冰草)通过根系凋落物维持碳输入,支撑食微线虫食物资源,而浅根系植物(如冷蒿)因刈割后碳输入减少导致资源受限^[39];豆科植物群落刈割后通过固氮作用快速供氮,提升土壤氮有效性,促进食微线虫增殖^[32]。此外,刈割增加了植物物种多样性,提高了群落间资源利用互补性,从而缩小了不同植物群落间线虫结构的差异。

富集足迹衡量了较低营养级线虫对资源快速反应的碳代谢过程,常用于指示土壤可利用资源进入土壤食物网的效率,而结构足迹常用来反映较高营养级线虫的代谢活性和净资源输出^[6,17]。线虫区系分析图中四边形面积的总和反映了线虫功能足迹的大小,用于衡量土壤食物网中被捕食者与捕食者之间的代谢平衡^[5]。相较于对照,刈割提高了土壤线虫的功能足迹,降低了富集指数(图5),表明刈割促进了土壤养分循环,维持土壤肥力及生产力。此外,对照相较于刈割更靠近B象限,刈割后线虫功能足迹与富集足迹显著高于对照,说明刈割降低了干扰程度,增加食物网资源输入,促进能量流动^[6]。刈割处理下食细菌线虫相对丰度上升加速了有机质分解,促进碳氮矿化,增强养分循环效率^[16]。植物寄生线虫数量减少可降低植物根系病害风险,改善植物生长环境,间接提升草地生产力与抗逆性^[32]。刈割调控植物-土壤互作,可维持植物多样性,调控土壤碳氮平衡^[19],更有利于维持草地生态系统的稳定性。

4 结论

刈割显著增加了土壤线虫总丰度和食细菌线虫相对丰度,同时降低了植物寄生线虫相对丰度。此外,刈割提高了土壤线虫的功能足迹,降低了线虫的富集指数。研究发现,土壤硝态氮含量、凋落物量及总碳含量是影响土壤线虫群落结构的关键环境因子。刈割改变了土壤线虫群落结构与功能,有助于促进土壤养分循环,对植物群落的健康生长具有重要意义。因此,刈割是一种科学合理的草地管理方式。

参考文献

- [1] 邵元虎,傅声雷. 试论土壤线虫多样性在生态系统中的作用[J]. 生物多样性,2007,15(2):116-123
- SHAO Y H, FU S L. Review on the role of soil nematode diversity in ecosystems[J]. Biodiversity Science,2007,15(2):

- 116-123
- [2] NIELSEN U N, AYRES E, WALL D H, et al. Global-scale patterns of assemblage structure of soil nematodes in relation to climate and ecosystem properties[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(9):968-978
- [3] YEATES G W, BONGERS T, DE GOEDE R G, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists [J]. *Journal of Nematology*, 1993, 25 (3) : 315-331
- [4] 包涵, 吕丹丹, 施赟, 等. 豫西黄土高原果园生草对土壤线虫群落及结构的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(1):96-104
BAO H, LYU D D, SHI Y, et al. Effects of orchard grass-planting on soil nematode community and structure in the Loess Plateau of Western Henan[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32 (1):96-104
- [5] ZHAO J, WANG F M, LI J, et al. Effects of experimental nitrogen and/or phosphorus additions on soil nematode communities in a secondary tropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75:1-10
- [6] FERRIS H. Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2):97-104
- [7] 刘宥延. 草地生态资产与生态系统服务概念与特征[J]. *草业科学*, 2022, 39(4):795-805
LIU Y Y. Concepts and characteristics of grassland ecological assets and ecosystem services[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39(4):795-805
- [8] CHEN S D, SUN Y X, WANG Y H, et al. Grazing weakens the linkages between plants and soil biotic communities in the alpine grassland[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 913:169417
- [9] 脱登峰, 卢琦, 却晓娥, 等. 中国北方草地生态系统服务评估[J]. *生态学报*, 2024, 44(2):455-462
TUO D F, LU Q, QUE X E, et al. Assessment of ecosystem services in northern grasslands of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(2):455-462
- [10] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 中国草地资源的现状分析[J]. *科学通报*, 2016, 61(2):139-154
SHEN H H, ZHU Y K, ZHAO X, et al. Analysis of current status of grassland resources in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(2):139-154
- [11] 秦加敏, 王常慧, 曹颖, 等. 氮添加和刈割对内蒙古典型草原植被碳氮库的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(1):12-20
QIN J M, WANG C H, CAO Y, et al. Effects of nitrogen addition and mowing on carbon and nitrogen pools of vegetation in Inner Mongolia typical steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1):12-20
- [12] 吴东辉, 尹文英, 陈鹏. 刈割活动对松嫩草原碱化羊草草地土壤线虫群落的影响[J]. *生物多样性*, 2007, 15(2):180-187
WU D H, YIN W Y, CHEN P. Effects of mowing on soil nematode communities in alkalinized *Leymus chinensis* grasslands of Songnen Plain [J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (2) : 180-187
- [13] 武振丹, 卢俊艳, 马尚飞, 等. 草地利用方式对贝加尔针茅草甸草原土壤线虫群落结构及代谢足迹的影响[J]. *中国环境科学*, 2024:1-12
WU Z D, LU J Y, MA S F, et al. Effects of grassland utilization patterns on soil nematode community structure and metabolic footprint in *Stipa baicalensis* meadow steppe [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44:1-12
- [14] LIU J H, LIF T, TIAN T, et al. Unraveling the influence of litter identity, diversity and rhizodeposition on nematode communities [J]. *Plant and Soil*, 2024, 505(1-2):763-777
- [15] 黄丽改, 姜雪, 叶露萍, 等. 青藏高原高寒草甸地上植物功能群去除对土壤线虫群落的影响[J]. *植物科学学报*, 2024, 42 (3):328-338
HUANG L G, JIANG X, YE L P, et al. Effects of above-ground plant functional group removal on soil nematode community in alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Plant Science Journal*, 2024, 42(3):328-338
- [16] 闫瑞瑞, 张宇, 辛晓平, 等. 刈割干扰对羊草草甸草原植物功能群及多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13):2573-2583
YAN R R, ZHANG Y, XIN X P, et al. Effects of mowing disturbance on plant functional groups and diversity in *Leymus chinensis* meadow steppe[J]. *Science Agriculture Sinica*, 2020, 53 (13):2573-2583
- [17] CHEN Y, ZHANG Y, NIELSEN U N, et al. Cattle grazing mitigates the negative impacts of nitrogen addition on soil nematode communities[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129:107876
- [18] 李艳龙, 石椿珺, 王昊, 等. 放牧强度对内蒙古典型草原群落结构和家畜生产性能的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(3):844-851
LI Y L, SHI C J, WANG H, et al. Effects of grazing intensity on community structure and livestock production performance in Inner Mongolia typical steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3):844-851
- [19] WANG D, LIU C, YANG Y S, et al. Clipping decreases plant cover, litter mass, and water infiltration rate in soil across six plant community sites in a semiarid grassland [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 861:160692
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:22-187
BAO S D. Soil agro-chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:22-187
- [21] CESARZ S, EVA SCHULZ A, BEUGNON R, et al. Testing soil nematode extraction efficiency using different variations of the Baermann-funnel method [J]. *Soil Organisms*, 2019, 91 (2):61-72
- [22] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京:科学出版社, 1998:437-475
YIN W Y. Pictorial keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998:437-475
- [23] 宋承承, 梅续芳, 张鹏, 等. 草原化荒漠区中间锦鸡儿灌丛土

- 壤线虫群落[J]. 草业科学, 2021, 38(3): 580-589
- SONG C C, MEI X F, ZHANG P, et al. Soil nematode communities under *Caragana intermedia* shrubs in steppe desert zone[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(3): 580-589
- [24] 霍娜, 黄菁华, 耿德洲, 等. 黄土高原半干旱区不同苜蓿-作物种植方式下土壤线虫群落组成及代谢足迹[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1825-1834
- HUO N, HUANG J H, GENG D Z, et al. Composition and metabolic footprint of soil nematode communities under different alfalfa-crop planting systems in semi-arid region of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1825-1834
- [25] 陈云峰, 韩雪梅, 李钰飞, 等. 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1072-1084
- CHEN Y F, HAN X M, LI Y F, et al. Research advances in indicating soil food web structure and functioning using nematode faunal analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1072-1084
- [26] ZHAO J L, CHEN J L, WU H H, et al. Effects of mowing frequency on soil nematode diversity and community structure in a Chinese meadow steppe[J]. Sustainability, 2021, 13(10): 5555
- [27] 王琪, 郑佳华, 赵萌莉, 等. 刈割强度对大针茅草原植物群落特征和土壤理化性质的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(2): 26-34
- WANG Q, ZHENG J H, ZHAO M L, et al. Effects of mowing intensity on plant community characteristics and soil physico-chemical properties in *Stipa grandis* steppe[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2023, 32(2): 26-34
- [28] ZHENG J H, WANG Q, LIS Y, et al. Mowing effects on soil bacterial community assembly processes in a semiarid grassland[J]. Plant and Soil, 2023, 493(1-2): 309-324
- [29] 侯林秀, 张斌, 孙浩宇, 等. 围封、放牧、刈割对内蒙古典型草地土壤线虫群落的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1738-1747
- HOU L X, ZHANG B, SUN H Y, et al. Effects of exclusion, grazing, and mowing on soil nematode communities in Inner Mongolia typical steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(7): 1738-1747
- [30] WILSCHUT R A, GEISEN S. Nematodes as drivers of plant performance in natural systems[J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(3): 237-247
- [31] 丰吉, 刘志扩, 李海燕, 等. 围栏封育和长期刈割对松嫩草地羊草和野古草种群营养繁殖特征的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(5): 50-60
- FENG J, LIU Z K, LI H Y, et al. Effects of exclusion and long-term mowing on vegetative propagation characteristics of *Leymus chinensis* and *Arundinella hirta* populations in Songnen grassland[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2023, 32(5): 50-60
- [32] ZHOU Q, XIANG Y, LI D, et al. Global patterns and controls of soil nematode responses to nitrogen enrichment: A meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 163: 108433
- [33] MERCADO-BLANCO J, ABRANTES I, BARRA C A, et al. Belowground microbiota and the health of tree crops[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1006
- [34] WILSCHUT R A, KOSTENKO O, KOOREM K, et al. Nematode community responses to range-expanding and native plant communities in original and new range soils[J]. Ecology and Evolution, 2018, 8(20): 10288-10297
- [35] 侯春雨, 魏雪, 周磊, 等. 川西北高寒地区多年生禾本科人工草地土壤线虫群落动态[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10104-10118
- HOU C Y, WEI X, ZHOU L, et al. Temporal dynamics of soil nematode communities in perennial grass artificial grasslands in alpine region of Northwest Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10104-10118
- [36] XU X, JIANG R Q, WANG X L, et al. *Protorhabditis* nematodes and pathogen-antagonistic bacteria interactively promote plant health[J]. Microbiome, 2024, 12(1): 221
- [37] ZHOU J Q, WILSON G W T, COBB A B, et al. Phosphorus and mowing improve native alfalfa establishment, facilitating restoration of grassland productivity and diversity[J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(6): 647-657
- [38] 沙玉宝, 干珠扎布, 胡国铮, 等. 藏北高寒草甸土壤线虫群落结构和多样性对增氮的响应[J]. 草业学报, 2023, 32(1): 154-164
- SHA Y B, GANZHU Z B, HU G Z, et al. Response of soil nematode community structure and diversity to nitrogen addition in alpine meadow of Northern Tibet[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2023, 32(1): 154-164
- [39] SHEN X, YANG F, XIAO C W, et al. Increased contribution of root exudates to soil carbon input during grassland degradation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 146: 107817

(责任编辑 付 宸)