DOI: 10. 11686/cyxb2025453
http://cyxb. magtech. com. cn
赵晓倩, 董瑞, 张静, 等. 高寒草甸大型土壤动物多样性对高原鼠兔及牦牛放牧干扰的响应. 草业学报, 2026, 35(11): 64－75.
ZHAO Xiao-qian, DONG Rui, ZHANG Jing, *et al*. Responses of soil macrofaunal diversity in alpine meadows to plateau pika disturbance and yak grazing. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 64－75.

高寒草甸大型土壤动物多样性对高原鼠兔及牦牛放牧干扰的响应

赵晓倩, 董瑞, 张静, 李园园, 胡桂馨, 楚彬, 花立民*
(甘肃农业大学草业学院, 国家林业和草原局重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 大型土壤动物是高寒草甸生态系统功能维持的关键类群, 其多样性对外界干扰具有敏感响应。已知大型和小型食草动物干扰均可影响大型土壤动物多样性, 但二者共同干扰对大型土壤动物多样性的影响尚不清楚。为此, 以甘南高寒草甸为研究对象, 探讨高原鼠兔与牦牛放牧对高寒草甸大型土壤无脊椎动物群落组成与α多样性及其关键驱动因子与作用路径的影响。在甘肃省甘南藏族自治州玛曲县尼玛镇高原鼠兔典型分布区域, 设置无牦牛和鼠兔干扰、只有鼠兔干扰、只有牦牛干扰及牦牛和鼠兔同时干扰 4 种处理(各 3 个重复, 50 m×50 m)。于 2024 年 7 月采用 0. 3 m×0. 3 m 样方采集 0～20 cm 大型土壤动物并调查植被群落及土壤理化性质, 结合 Pearson 相关分析、随机森林(RF)与结构方程模型(PLS-SEM)开展综合分析。结果表明: 1)本试验共捕获动物 815 只, 隶属 3 门、5 纲、9 目、41 科。2)高原鼠兔干扰会显著提高大型土壤动物的丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数($P<0.05$), 牦牛放牧则显著降低土壤动物的多样性($P<0.05$), 二者共同干扰会使其处于中间水平。3)Pearson 相关分析表明, 土壤温度、湿度、紧实度、容重、速效磷、速效钾及植物多样性、不同根系类型地上地下生物量是影响高寒草甸大型土壤动物α多样性的主要环境因子。4)随机森林和结构方程模型表明, 鼠兔通过提升土壤含水量、全氮、速效磷含量并增加地上生物量, 从而提高多样性; 相反, 放牧通过增强土壤紧实度, 导致升温并降低土壤含水量与速效磷含量, 从而降低多样性。相较于无干扰处理, 高原鼠兔通过掘洞筑丘增加土壤异质性从而提升大型土壤动物的多样性, 牦牛放牧因压实抑制根系而降低多样性, 而共同干扰下鼠兔可部分缓解放牧的负效应。

关键词: 高原鼠兔; 牦牛放牧; 大型土壤动物多样性; 高寒草甸; 草地管理

Responses of soil macrofaunal diversity in alpine meadows to plateau pika disturbance and yak grazing

ZHAO Xiao-qian, DONG Rui, ZHANG Jing, LI Yuan-yuan, HU Gui-xin, CHU Bin, HUA Li-min*
College of Prataculture Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of the National Forestry and Grassland Administration, National Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730070, *China*

Abstract: Soil macrofauna are key biological components sustaining ecosystem functions in alpine meadows, and their diversity is highly sensitive to external disturbances. Although both large and small herbivores are known to affect soil macrofaunal diversity, the combined effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbance and yak (*Bos grunniens*) grazing on this factor and the associated driving pathways remain unclear. To explore this topic, we conducted a field study in an alpine meadow on the Gannan Plateau. We aimed to quantify the effects of plateau pika

收稿日期: 2025-11-05; 改回日期: 2026-01-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1400502)资助。
作者简介: 赵晓倩(2001－), 女, 河南台前人, 在读硕士。E-mail: zhaoxq202209@163. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: hualm@gsau. edu. cn

disturbance and yak grazing on the community composition and alpha diversity of large soil macrofauna in the alpine meadow, and identify the primary environmental drivers and pathways mediating these responses. The experiment was conducted in a typical plateau pika distribution area in Nima Town, Maqu County, Gannan Tibetan Autonomous Prefecture, Gansu Province. Four treatments were established: Control (no yak grazing, no pika disturbance), pika disturbance only, yak grazing only, and pika disturbance+yak grazing (three replicates per treatment; 50 m×50 m). In July 2024, soil macrofauna were collected from 0−20 cm soil depth within 0.3 m×0.3 m quadrats, and vegetation communities and soil physicochemical properties were measured. The data were analyzed by Pearson's correlation analysis, random forest (RF) analysis, and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). The results show that: 1) A total of 815 individuals were collected, belonging to three phyla, five classes, nine orders, and 41 families. 2) Plateau pika disturbance significantly increased the richness and Shannon-Wiener diversity indices of soil macrofauna ($P<0.05$), yak grazing significantly reduced soil macrofaunal diversity ($P<0.05$), and combined disturbances resulted in intermediate diversity. 3) Pearson's correlation analysis indicated that soil temperature, moisture, compactness, bulk density, available phosphorus, available potassium, and plant diversity and above- and below-ground biomass of different root functional types were the main environmental factors affecting the alpha diversity of large soil invertebrates in the alpine meadow. 4) The RF and PLS-SEM analyses revealed that plateau pika disturbance increased soil macrofaunal diversity by enhancing soil moisture, total nitrogen, available phosphorus, and aboveground biomass; whereas yak grazing decreased this diversity by increasing soil compactness and temperature and reducing soil moisture and available phosphorus. Compared with the no-disturbance treatment, plateau pika activity enhances soil heterogeneity through burrowing and mound building, thereby increasing the diversity of large soil invertebrates; whereas yak grazing reduces diversity by compacting soils and inhibiting root growth. Under combined disturbance, plateau pika activity can partially offset the negative effects of grazing.

Key words: plateau pika; yak grazing; soil macrofaunal diversity; alpine meadow; grassland management

陆地生态系统的地上与地下组分通过能量、碳和养分在多个营养级之间的交换而精细耦合[1]。由大型土壤动物、微生物、植物根系与枯落物组成的地下子系统是生态系统发挥功能的基础[2]。其中,大型土壤动物既是消费者也是“生态系统工程师”[3],通过取食与生物扰动促进枯落物分解、养分矿化与团聚体形成,并增强微生物活性[4−5]。由于扩散能力有限且环境耐受范围狭窄,土壤动物群落对外界扰动高度敏感。因而常被用作土壤健康与生态系统完整性的指示性群落指标[6−7]。阐明生物性扰动如何塑造土壤动物多样性,对于连接生物多样性与生态系统功能,尤其是脆弱的高寒生态系统具有关键意义。

高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)是青藏高原高寒草地生态系统中影响力最大的物种之一[8],其推土造丘与取食活动不断重新分配着土壤与植物间的养分,增加土壤通气性与水分变异,营造出微尺度的生境斑块镶嵌格局[9−10]。尽管具有上述“生态系统工程”功能,高原鼠兔长期被视为与家畜竞争饲草的“有害生物”[11],曾在大范围草地实施过长期灭杀行动,然而,这一“害兽”视角忽视了其在土壤动物多样性和生态过程中的潜在贡献[12]。近年来的研究开始挑战这一传统认识[13],发现适度的鼠兔活动可通过提高土壤孔隙度、加速养分周转与增加生境异质性[14−15],从而提升土壤动物的多样性与丰度。同时,牦牛(*Bos grunniens*)作为高寒草地的主要放牧动物,可通过改变植被结构、枯落物输入与土壤压实程度来调节鼠兔扰动的影响[16−17]。植物和土壤分别作为大型土壤动物的食物来源和生存环境,其变化对土壤动物多样性均可以产生影响[18]。

现有研究主要集中于相关性分析,缺乏试验验证,难以剥离鼠兔扰动与大型食草动物放牧的直接效应及其交互作用,目前关于草食动物干扰的研究多聚焦于“单一尺度”(大型或小型草食动物),对二者共同作用的认识不足,这限制了研究者从地上−地下耦合的角度解释土壤动物空间格局与变异来源的能力。基于此,本研究以青藏高原高寒草甸为对象,通过分离与联合干扰的野外对照设计并结合随机森林(random forest, RF)与结构方程模

型(structural equation modeling, SEM),明确高原鼠兔扰动与牦牛放牧对大型土壤动物α多样性的主效应及其交互作用,解析以资源供给与物理胁迫为核心的关键环境因子及作用通路,并据此构建地上-地下耦合的解释框架,为科学有效地进行放牧管理、控鼠、保护和恢复退化草地提供重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该研究在甘肃省甘南藏族自治州玛曲县(东经102°02′,北纬33°59′;海拔3471 m)进行,位于青藏高原东北部。该地区具有典型的高原大陆性气候。年平均温度为1.1 ℃,年平均降水量为542 mm,年平均蒸发量为1222 mm。年日照总时数约为2584 h,且该地区几乎没有无霜期。主要土壤类型为亚高山草甸土。植被以线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)为主,常见伴生植物包括垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、一年生早熟禾(*Poa annua*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)和蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)等。

研究区代表了1个典型的高山草甸生态系统,其中高原鼠兔和牦牛共存。预调查数据显示,2022年鼠兔有效洞口数为232~410个·hm^{-2},平均有效洞口数为330个·hm^{-2}。2024年(即取样当年)鼠兔有效洞口数为232~358个·hm^{-2},平均有效洞口数为275个·hm^{-2}。自2022年起的长期监测确认,鼠兔相对种群密度在连续3年保持生态稳定,季节性波动较小,表明扰动强度处于相对稳定的中等水平。牦牛为该区主要大型食草动物,放牧期为每年9月一次年3月下旬,放牧强度为8.67羊单位·hm^{-2},代表了当地草场管理中的中等放牧水平。自样地建立以来(2022-2024年),各年度放牧强度保持一致,放牧时段与管理方式不变,从而确保采样前干扰条件相对稳定。总体而言,稳定的鼠兔种群和可控的放牧提供了一个现实的生态背景,用于研究鼠兔和放牧干扰之间的相互作用。

1.2 试验设计

场地野外控制试验于2022年建立,在鼠兔密度相近且地形条件相对一致的区域内布设样地,均位于坡度和坡向相近的草地,以减少地形差异引起的异质性。试验通过控制高原鼠兔(存在与排除)和牦牛放牧(放牧与排除),采用2×2因子设计,共有4种干扰模式。为实现排除处理,设置两类网障:地上网障用于排除牦牛,采用1.5 m高铁丝网围栏(网眼10 cm)阻止牦牛进入;地下网障用于排除高原鼠兔,采用孔径为0.5 cm不锈钢网(地上高度0.6 m,埋深0.3 m)阻止鼠兔进入。去除鼠兔处理采用药物和鼠夹实现完全去除,自样地建立以来,对所有去除鼠兔处理样地每月定期检查并修补防鼠围栏。如发现鼠兔,再次投药以去除。以有效洞口数为检验指标,鼠兔去除样地的有效洞口数基本为0,去除效果明显。4种处理设置如下:1)同时排除鼠兔和牦牛(-P-Y):同时设置地上网障与地下网障(双层保护),排除两种食草动物;2)仅有鼠兔干扰(+P-Y):设置地上网障排除牦牛,不设置地下网障,允许鼠兔维持自然挖洞活动;3)仅有牦牛放牧干扰(-P+Y):仅设置地下网障排除鼠兔,同时牦牛自由放牧;4)双重干扰(+P+Y):不设置网障,鼠兔和牦牛共存于自然条件下。其中,P表示高原鼠兔,Y表示牦牛;"+"表示存在(不排除),"-"表示排除。

每种处理包含3个重复样地(每个50 m×50 m),共计12块样地。样地间相隔至少20 m以最小化边缘效应。自2022年以来,所有样地持续保持各自的处理条件,以确保在2024年采样前干扰条件的稳定性。每个样地采用5点取样法[19],共采集了60个样方(4种处理×3个重复×5个样方)。该试验设计能够单独揭示高原鼠兔干扰对土壤动物多样性的因果效应,并评估牦牛放牧如何调节这种关系,为理解生物相互作用在高寒草甸地下生物多样性中的作用提供了坚实的框架。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 大型土壤动物群落调查 于2024年7月中下旬,正值生长季节和土壤动物活跃的高峰期进行取样。在每个样地内,采用5点取样法[19]沿样方边界挖取0.3 m×0.3 m,深0.2 m的样方(不分层取样)。样方位于完整草地,采用手捡法挑出大型土壤动物,用75%乙醇溶液保存并在体式显微镜(Olympus SZX16,日本)下鉴定。参考《中国土壤动物检索图鉴》[20]、《幼虫分类学》[21]等,多数鉴定到科并统计个体数量,少数鉴定到目。

1.3.2 植物群落多样性和生物量调查 进行土壤动物取样前,在每个土壤动物调查样点对应位置设置1个0.3 m×0.3 m的植被样方,开展植被调查。样方内植物连根挖取,分为轴根和须根两类,洗净后于75 ℃烘干至恒

重，称量地上与地下生物量。采用“针刺法”调查样方内分种盖度；用“样圆法”每块样地抛 20 次[22]，样圆面积大小为 0.1 m^2，记录样圆内所有植物的物种名称和出现次数为物种频度。

1.3.3　土壤理化性质调查　　土壤样品采用直径为 7 cm 的钢制土钻在土壤动物样点采集 0～20 cm 混合土样，密封于聚乙烯袋中冷藏运输，并在 48 h 内完成实验室处理，风干后过 0.25 和 1.00 mm 筛进行理化性质测定，共包含土壤物理指标 4 个和化学指标 7 个。土壤温度和湿度用土壤温湿度仪（顺科达 TR-8 型，中国）测定，紧实度用土壤紧实度仪（SC-900，美国）测定，每个样点重复 3 次，容重用环刀法测定。土壤 pH 采用土∶水＝1.0∶2.5 电极法测定；有机质用重铬酸钾外加热法测定；全氮用凯氏定氮法测定；全磷经硫酸－混合催化剂消解后用钼锑抗比色法测定；全钾经消解后用火焰光度法测定；速效磷采用 0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$ 提取－钼锑抗比色法测定；速效钾采用 1 mol·L^{-1} 醋酸铵提取－火焰光度法测定。具体的土壤样品处理、药品试剂的配置、试验操作流程和测定方法，参考《土壤农化分析》[23]。不同处理下土壤理化性质、植物群落多样性及生物量均存在差异（表 1～3）。

表 1　高原鼠兔和牦牛干扰下各处理区土壤物理性状和全效养分

Table 1　Soil physical properties and total nutrients of each treatment under plateau pika and yak disturbances

处理 Treatment	土壤温度 Soil temperature (℃)	土壤湿度 Soil moisture (%)	土壤紧实度 Soil compaction (kPa)	土壤容重 Soil bulk density (g·cm^{-3})	土壤全氮 Soil total nitrogen (g·kg^{-1})	土壤全磷 Soil total phosphorus (g·kg^{-1})	土壤全钾 Soil total potassium (g·kg^{-1})
－P－Y	22.96±0.43b	23.48±0.28ab	1397.40±31.35b	1.05±0.03bc	5.02±0.08a	0.91±0.05b	8.70±0.07a
＋P－Y	21.67±0.47c	24.14±0.26a	1305.21±31.28c	0.99±0.04c	5.43±0.31a	1.14±0.05a	8.82±0.17a
－P＋Y	24.70±0.26a	21.51±0.44c	1559.59±28.10a	1.17±0.02a	5.19±0.33a	0.83±0.03b	8.95±0.17a
＋P＋Y	24.33±0.24a	22.96±0.32b	1502.20±28.14a	1.09±0.02ab	5.16±0.30a	0.92±0.06b	8.88±0.18a

同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$). －P－Y：无牦牛和鼠兔干扰 No disturbance by yaks or pikas；＋P－Y：只有鼠兔干扰 Disturbance by pikas only；－P＋Y：只有牦牛干扰 Disturbance by yaks only；＋P＋Y：牦牛和鼠兔同时干扰 Simultaneous disturbance by both yaks and pikas. 下同 The same below.

表 2　高原鼠兔和牦牛干扰下各处理区土壤养分和植物多样性

Table 2　Soil nutrients and plant diversity of each treatment under plateau pika and yak disturbances

处理 Treatment	pH	土壤有机质 Soil organic carbon (g·kg^{-1})	土壤速效磷 Soil available phosphorus (mg·kg^{-1})	土壤速效钾 Soil available potassium (mg·kg^{-1})	香农-维纳指数 Shannon-Wiener index	Pielou 指数 Pielou index	丰富度指数 Richness index
－P－Y	6.89±0.09a	110.03±2.57c	6.97±0.34ab	264.77±9.62b	3.06±0.02b	0.88±0.01a	23.89±0.61ab
＋P－Y	7.04±0.11a	118.64±4.78b	7.36±0.60a	297.31±11.53a	3.18±0.02a	0.86±0.00a	25.78±0.62a
－P＋Y	7.01±0.13a	130.36±2.63a	5.33±0.35c	230.72±8.07c	3.12±0.01ab	0.84±0.02a	23.56±0.90bc
＋P＋Y	7.13±0.12a	123.47±3.87ab	5.93±0.38bc	248.28±11.12bc	3.14±0.03a	0.86±0.01a	21.89±0.42c

表 3　高原鼠兔和牦牛干扰下各处理区不同植物根系类型生物量

Table 3　Biomass of different plant root types of each treatment under plateau pika and yak disturbances (g·m^{-2})

处理 Treatment	轴根系植物地上生物量 Aboveground biomass of taprooted plants	轴根系植物地下生物量 Belowground biomass of taprooted plants	须根系植物地上生物量 Aboveground biomass of fibrous-rooted plants	须根系植物地下生物量 Belowground biomass of fibrous-rooted plants
－P－Y	144.70±5.12ab	167.22±4.89ab	330.11±17.66a	700.00±23.86a
＋P－Y	160.30±10.84a	176.67±4.35a	300.00±24.08ab	660.00±24.77ab
－P＋Y	123.40±4.70c	143.89±5.10c	260.00±28.68bc	600.00±26.24bc
＋P＋Y	129.09±4.56bc	159.44±3.49b	230.00±17.91c	552.22±31.04c

1.4 数据分析

1.4.1 多样性指数 大型土壤动物群落密度以单位面积个体数表示;植物和大型土壤动物丰富度以样方内类群数表示;植物和大型土壤动物多样性采用Shannon-Wiener指数(H′)表示;均匀度采用Pielou指数(J)表示。植物地上地下生物量以单位面积内生物量计算(g·m^{-2})。相对盖度和相对频度的均值表示植物物种的重要值,用于计算α多样性指数(Shannon-Wiener指数和均匀度指数)。

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

$$J = \frac{H'}{\ln S}$$

式中:S为样方内类群总数;$P_i = n_i/N$,为第i类群的相对多度(即该类群个体数占总个体数的比例);n_i为第i类群的个体数;N为样方内总个体数。

1.4.2 数据统计方法 使用Excel 2019进行基本数据的统计和计算,使用SPSS 27.0进行单因素方差分析(One-way ANOVA),比较不同处理下的土壤动物多样性、土壤理化性质及植物的相关数据,Origin 2025用于绘图。利用R 4.4.0中的corrplot包检验土壤动物多样性与环境因子之间的相关性。采用randomForest包开展随机森林分析,树数设置为ntree=500,通过袋外(out-of-bag, OOB)误差评估模型性能。为避免多重共线性,首先进行共线性诊断,依据方差膨胀系数(variance inflation factor, VIF)筛选变量,剔除VIF>10的变量,随后使用rfPermute包进行置换检验评估变量重要性及显著性($P<0.05$)。

为阐明高原鼠兔与牦牛干扰如何通过植物与土壤等因子影响土壤动物多样性,采用偏最小二乘法结构方程模型(partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM),使用plspm包进行路径分析。模型的拟合优度(goodness-of-fit, GOF)和各内生变量的R^2在结构方程模型路径图中标出,用于评价模型的拟合度和解释能力。

2 结果与分析

2.1 土壤动物基本组成

本试验共捕获大型土壤动物815只,隶属3门、5纲、9目、41科、44种(表4),其中:1)无鼠兔和牦牛干扰(−P−Y)记录29种。优势类群3类,占40.00%(象甲科14.36%、金龟甲科12.82%、叶甲科12.82%);常见类群19类(56.41%);稀有类群7类(3.59%)。特有类群为螟蛾科、虻科、丽蝇科、长足虻科。2)只有鼠兔干扰(+P−Y)记录31种(为4个处理中最高)。优势类群3类,占43.94%(金龟甲科17.46%、蚁科16.06%、叶甲科10.42%);常见类群12类(47.32%);稀有类群16类(8.73%)。特有类群为蚜科、粉虱科、羽蛾科、鞘翅目幼虫。3)只有牦牛干扰(−P+Y)记录22种(为最低)。优势类群4类,占57.58%(金龟甲科16.16%、蚁科15.15%、步甲科13.13%、大蚊科13.13%);常见类群18类(42.42%);特有类群为潜蝇科、寄蝇科、蝇科。4)牦牛和鼠兔同时干扰(+P+Y)记录23种。优势类群3类,占52.41%(叩甲科27.71%、蚁科12.65%、蜂虻科12.05%);常见类群14类(43.98%);稀有类群6类(3.61%)。特有类群为食蚜蝇科、蜂虻科、茧蜂科。整体上表明不同干扰组合塑造了各自的指示性类群。

2.2 高寒草甸大型土壤动物类群的多样性变化

在不同干扰类型之间大型土壤动物的α多样性存在显著差异(图1)。结果显示,高原鼠兔干扰与牦牛放牧均显著影响群落密度、物种丰富度和Shannon-Wiener多样性指数,而均匀度变化不显著($P>0.05$)。鼠兔与牦牛处理之间的交互作用在密度、多样性及丰富度上表现显著,整体看鼠兔效应在不同放牧情境下基本一致。在未放牧的草地中,仅鼠兔干扰(+P−Y)相较其他处理(−P−Y、−P+Y、+P+Y)表现出最高的密度、丰富度与Shannon-Wiener多样性($P<0.05$)。相反,仅牦牛放牧(−P+Y)在各指标上均为最低($P<0.05$),表明放牧对土壤动物群落具有显著的负面影响。当两种干扰同时发生(+P+Y)时,群落指标表现为中间水平,提示鼠兔活动在一定程度上缓解了放牧的不利效应。

表 4　高原鼠兔和牦牛干扰下高寒草甸大型土壤动物群落组成

Table 4　Compositions of soil macrofaunal communities in alpine meadow under disturbance of plateau pika and yak

类群 Taxon	−P−Y		+P−Y		−P+Y		+P+Y		总计 Total	占比 Percent (%)	总优势度 Total dominance
	个数 No.	D	个数 No.	D	个数 No.	D	个数 No.	D			
叶甲科 Chrysomelidae	25	+++	37	+++	15	+++	16	++	93	11.41	+++
象甲科 Curculionidae	28	+++	21	++	16	+++	46	+++	111	13.62	+++
拟步甲科 Tenebrionidae	2	++	1	+	7	++	5	++	15	1.84	++
叩甲科 Elateroidea	2	++			4	++	5	++	11	1.35	++
鳃金龟科 Melolonthidae	10	++	2	+			4	++	16	1.96	++
花蝇科 Cantharidae	6	++	9	++	1	++	3	++	19	2.33	++
大蚊科 Tipulidae	3	++	1	+	3	++	1	+	8	0.98	+
实蝇科 Trypetidae			3	+	13	+++			16	1.96	++
蕈蚊科 Mosquitidae					1	++	2	++	3	0.37	+
秆蝇科 Chloropidae	1	+	11	++					12	1.47	++
潜蝇科 Agromyzidae					1	++			1	0.12	+
沫蝉科 Cercopidae	1	+	1	+					2	0.25	+
蚜科 Aphididae			3	+					3	0.37	+
叶蝉科 Cicadellidae	2	++	1	+					3	0.37	+
长蝽科 Lygaeidae	1	+	5	++			2	++	8	0.98	+
粉虱科 Aleyrodidae			1	+					1	0.12	+
球蚧科 Coccidae	11	++	2	+					13	1.60	++
叶蜂科 Tenthredinidae	1	+			1	++			2	0.25	+
羽蛾科 Pterophoridae			2	+					2	0.25	+
夜蛾科 Noctuidae			2	+	6	++	5	++	13	1.60	++
螟蛾科 Pyralidae	1	+							1	0.12	+
瓦娄蜗牛科 Valloniidae	1	+	1	+	1	++	1	+	4	0.49	+
鞘翅目幼虫 Coleoptera larva			8	++					8	0.98	+
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larva	2	++	3	+			1	+	6	0.74	+
步甲科 Carabidae	11	++	14	++	4	++	9	++	38	4.66	++
隐翅甲科 Staphylinidae	4	++	7	++	1	++			12	1.47	++
寄蝇科 Tachinidae					1	++			1	0.12	+
食蚜蝇科 Syrphidae							1	+	1	0.12	+
食虫虻科 Asilidae	1	+	3	+					4	0.49	+
虻科 Tabanidae	2	++							2	0.25	+
蜂虻科 Bombyliidae							20	+++	20	2.45	++
茧蜂科 Braconidae							1	+	1	0.12	+
蜈蚣科 Scolopendridae	4	++	12	++	2	++	1	+	19	2.33	++
地蛛科 Atypidae	4	++	2	+					6	0.74	+
金龟甲科 Scarabaeidae	25	+++	62	+++	3	++	7	++	97	11.90	+++
粪金龟科 Geotrupidae			3	+	1	++	2	++	6	0.74	+
蜉金龟科 Aphodiidae			20	++	2	++	2	++	24	2.94	++
丽蝇科 Calliphoridae	7	++							7	0.86	+
麻蝇科 Sarcophagidae	11	++	7	++			7	++	25	3.07	++

续表 Continued Table

类群 Taxon	−P−Y		+P−Y		−P+Y		+P+Y		总计 Total	占比 Percent (%)	总优势度 Total dominance
	个数 No.	D	个数 No.	D	个数 No.	D	个数 No.	D			
正蚓科 Lumbricidae	11	++	24	++	13	+++	4	++	52	6.38	++
双翅目幼虫 Diptera larva	2	++	30	++	2	++			34	4.17	++
蚁科 Formicidae	14	++	57	+++			21	+++	92	11.29	+++
蝇科 Muscidae					1	++			1	0.12	+
长足虻科 Dolichopodidae	2	++							2	0.25	+
总计 Total	195		355		99		166		815		

"+++": 优势类群，占总个体数10%以上 Dominant taxa, accounting for >10% of the total individuals; "++": 常见类群，占总个体数1%～10% Common taxa, accounting for 1%−10% of the total individuals; "+": 稀有类群，占总个体数1%以下 Rare taxa, accounting for <1% of the total individuals. D: 该处理下此类群个体数占总个体数的优势度 Dominance of a taxon (proportion of total individuals) under the corresponding treatment.

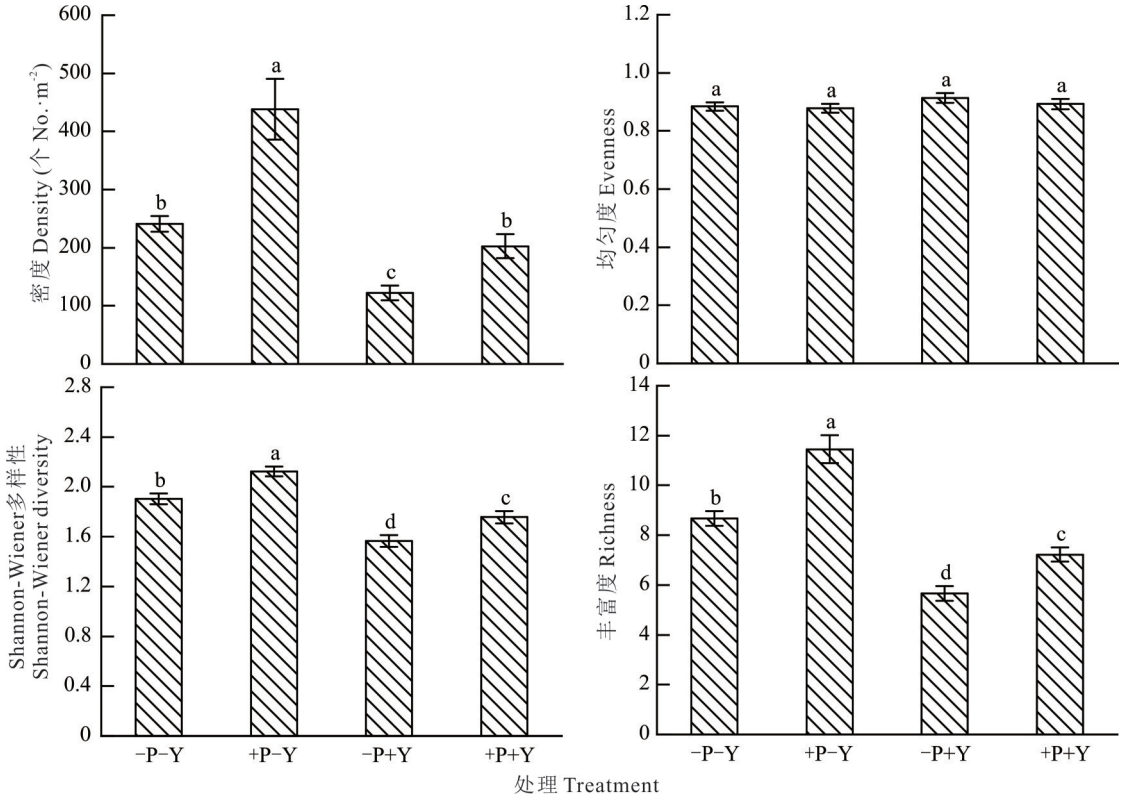


图1 高原鼠兔和牦牛干扰下大型土壤动物群落的多样性比较

Fig. 1 Comparison of soil macrofauna community diversity under pika and yak disturbance

不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

2.3 大型土壤动物类群分布与环境因子的相关性分析

大型土壤动物类群多样性与环境因子的相关分析结果表明(图2)。在土壤因子层面(图2a)，大型土壤动物的密度(density, D)、丰富度(richness, R)及Shannon-Wiener多样性(H′)与多个土壤因子呈显著相关关系：与土壤温度(soil temperature, ST)、土壤湿度(soil moisture, SM)、土壤紧实度(soil compaction, SC)和容重(soil bulk density, BD)以及全磷(soil total phosphorus, TP)总体呈显著负相关关系；与速效钾(soil available potassium, AK)及部分情况下的速效磷(soil available phosphorus, AP)呈显著正相关关系。均匀度(J)的相关性最少，仅与土壤湿度(SM)呈显著负相关关系。

在植被因子层面(图 2b),大型土壤动物丰富度(R)和 Shannon-Wiener 多样性(H′)与轴根系地上地下生物量(aboveground biomass of taprooted plants, TA; belowground biomass of taprooted plants, TB)呈极显著正相关关系;均匀度(J)与植被指标[植物均匀度(plant evenness, PE)、轴根系地下生物量(TB)]呈显著负相关关系;密度(D)与植被因子亦以正相关为主[与植物 Shannon-Wiener 多样性(plant Shannon-Wiener diversity, PS)、轴根系地上生物量(TA)、轴根系地下生物量(TB)的相关性显著]。总体上,植被多样性的提升及轴根系生物量的增加与大型土壤动物群落多样性的提升相对应。

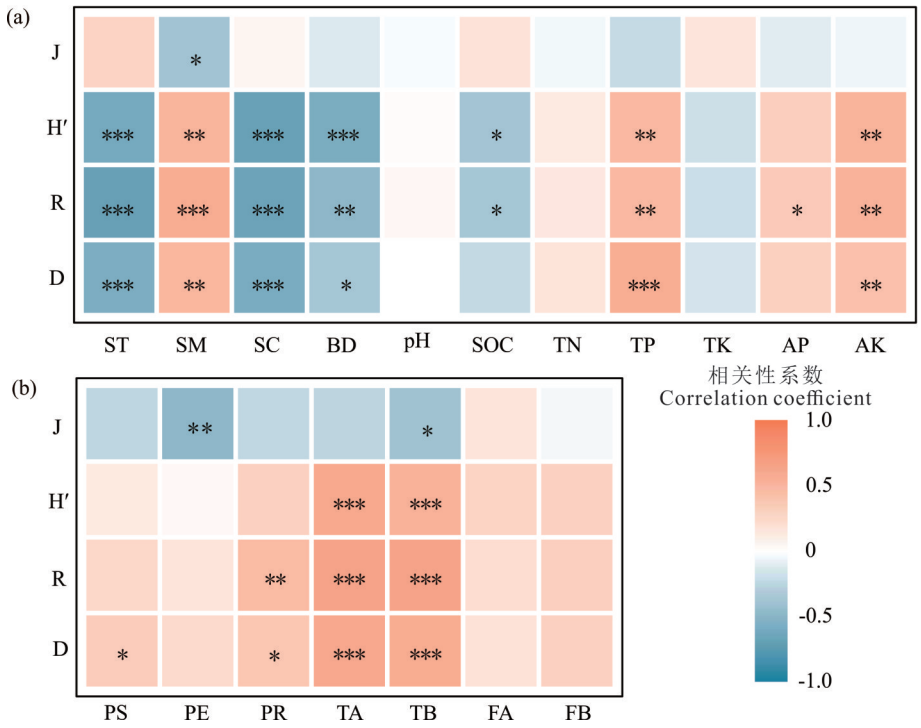


图 2　大型土壤动物群落多样性与环境因子的相关性

Fig. 2　Correlation between soil macrofauna community diversity and environmental factors

(a): 大型土壤动物群落多样性与土壤因子相关性 Correlation between soil macrofaunal community diversity and soil factors; (b): 大型土壤动物群落多样性与植被因子相关性 Correlation between soil macrofaunal community diversity and vegetation factors. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$. D: 密度 Density; R: 丰富度 Richness; H′: Shannon-Wiener 多样性 Shannon-Wiener diversity; J: 均匀度 Evenness; ST: 土壤温度 Soil temperature; SM: 土壤湿度 Soil moisture; SC: 土壤紧实度 Soil compaction; BD: 土壤容重 Soil bulk density; pH: 酸碱度 Soil pH; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Soil total nitrogen; TP: 全磷 Soil total phosphorus; TK: 全钾 Soil total potassium; AP: 速效磷 Soil available phosphorus; AK: 速效钾 Soil available potassium; PS: 植物 Shannon-Wiener 多样性 Plant Shannon-Wiener diversity; PE: 植物均匀度 Plant evenness; PR: 植物丰富度 Plant richness; TA: 轴根系地上生物量 Aboveground biomass of taprooted plants; TB: 轴根系地下生物量 Belowground biomass of taprooted plants; FA: 须根系地上生物量 Aboveground biomass of fibrous-rooted plants; FB: 须根系地下生物量 Belowground biomass of fibrous-rooted plants. 下同 The same below.

2.4　高原鼠兔及牦牛影响大型土壤动物多样性的途径

随机森林分析结果显示(图 3a),植物与土壤因子共同解释了大型土壤动物 Shannon-Wiener 多样性的 59% 变异。其中,土壤温度(ST)与多样性极显著相关($P<0.01$),速效磷(AP)、土壤湿度(SM)、须根系地上生物量(FA)、轴根系地上生物量(TA)、全氮(TN)与多样性显著相关($P<0.05$),为主要正向预测因子。

进一步进行结构方程模型分析(SEM),结果揭示两条主导通路(图 3b),一是“资源－根系”促进通路:仅鼠兔干扰(+P−Y)通过提高速效磷(AP),促进须根系地上生物量或增强土壤水分供给,从而提升群落多样性;二是“物理/热胁迫”抑制通路:放牧(−P+Y、+P+Y)导致土壤升温与压实并伴随含水量下降,直接或间接抑制多样性。在两种干扰并存时(+P+Y),水分与资源的补偿在一定程度上缓解了压实与升温的不利影响;同时,全氮等

养分与多样性呈正相关关系，而温度上升既有直接的负作用，也通过降低含水量产生间接抑制。整体表明，鼠兔主要通过重塑土壤－根系资源环境来促进多样性；放牧则以压实与升温为主要限制因子来降低多样性，二者的权衡决定了不同干扰情境下的多样性格局。

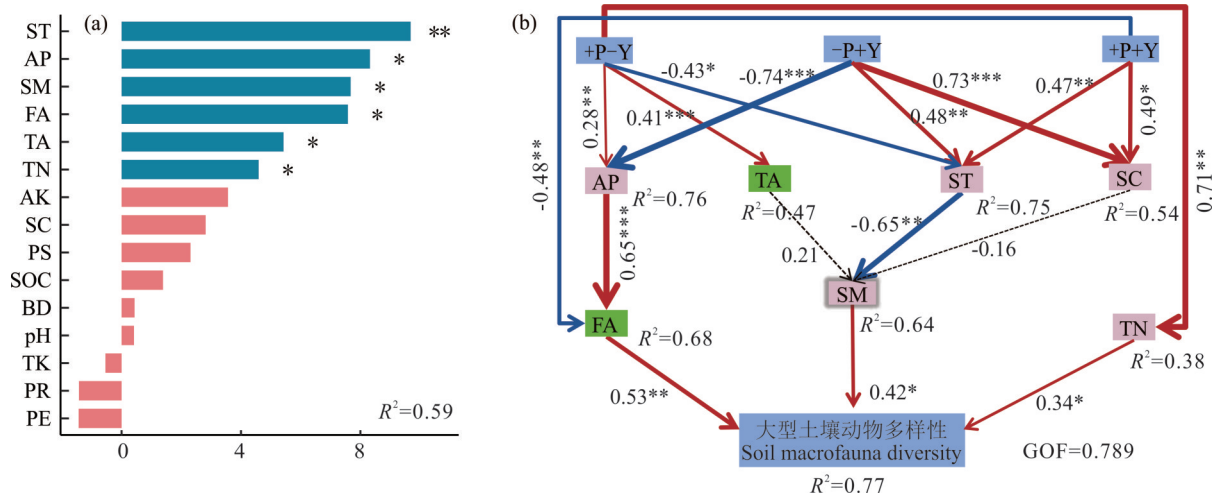


图3 影响大型土壤动物多样性的关键因子及作用路径

Fig. 3 Key drivers and pathways shaping soil macrofaunal diversity

(a)：随机森林(RF)识别的环境因子重要性排序(R^2=0.59) Importance ranking of environmental factors identified by the random forest (RF) model (R^2=0.59)；(b)：偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)揭示高原鼠兔与牦牛干扰通过土壤与植被因子调控大型土壤动物多样性的直接与间接路径(GOF=0.79) Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) showing the direct and indirect pathways by which plateau pika and yak disturbances regulate soil macrofaunal diversity through soil and vegetation factors (GOF=0.79). 红色与蓝色箭头分别表示显著的正向与负向关系；实线表示显著关系，虚线表示不显著关系。箭头旁数字为标准化路径系数；R^2表示模型对变异的解释率，GOF值为模型总体拟合优度。Red and blue arrows indicate significant positive and negative relationships, respectively; Solid lines indicate significant relationships, whereas dashed lines indicate non-significant relationships. Numbers adjacent to arrows represent standardized path coefficients. R^2 denotes the proportion of variance explained by the model, and GOF represents the overall goodness-of-fit of the model.

3 讨论

3.1 高原鼠兔与牦牛放牧下大型土壤动物响应的总体格局

地下－地上群落相互作用通过上行与下行效应共同塑造草地生物多样性结构[24]。本研究表明：高原鼠兔干扰提升大型土壤动物多样性，而牦牛放牧抑制其多样性；两者共同作用时，群落响应表现为中间水平(图1)。此外，本研究发现大型土壤动物多样性与土壤环境因子(土壤温湿度、紧实度、土壤养分)及植物因子(不同根系类型生物量及植物多样性)紧密相关(图2)，这一结果与叶国辉等[18]的研究一致，支持了“小型食草动物作为生态系统工程师，通过增加土壤异质性来重塑地下栖息地”[25]的观点。与之相对，大型食草动物放牧则在同一系统中施加物理胁迫并造成资源限制，减少枯落物输入、压实表层土壤并降低根系生物量，从而削弱栖息地复杂度[26−27]。

生产力是决定生态系统生物多样性的关键因子之一[28]，土壤动物主要依靠根系生存[29]。本研究结果表明，高原鼠兔活动会显著提高轴根系地上地下生物量(TA、TB)，增加植物群落丰富度(PS)，进而为大型土壤动物提供食物资源，而牦牛放牧会降低植物初级生产力，从而减少土壤动物多样性(表1)，这与先前的研究结果一致[30]。在4种干扰处理中，本试验观察到在适度鼠兔干扰(＋P－Y)下大型土壤动物个体密度与多样性均上升(图1)，表明鼠兔造成的土壤翻动与微地形差异通过增强资源异质性与生态位多样性，促进了群落共存[31]。适度的打洞干扰通过提升小尺度空间异质性，可能抵消放牧所导致的同质化效应，促成一种有利于高多样性与多功能性的平衡干扰格局。

3.2 鼠兔促进与放牧抑制：地下多样性的双重驱动

结合RF与PLS-SEM的结果(图3)，在资源－胁迫权衡框架中进一步理解并加强解释：当资源富集与物理扰

动达到适度平衡时，生物多样性往往处于最优。土壤全氮（TN）、土壤含水量（SM）与须根系地下生物量（FB）是促进多样性的关键正向因子，而土壤紧实度（SC）与土壤温度（ST）是主要限制因子。鼠兔打洞形成的鼠丘改善了土壤通气性、提高入渗并加速有机质周转，从而共同提升养分与水分的可利用性[32]，刺激根系再生与微生物活动，形成支撑分解者的资源富集级联效应。

在本研究中（图 3b），鼠兔干扰下土壤养分与土壤湿度的提升可能通过扩展资源生态位并降低种间竞争而促进大型土壤动物多样性[33]。相反，牦牛放牧通过踩踏施加强烈的物理胁迫，增加土壤密度与压实度，同时降低地上生物量与枯落物输入[34]，这些改变限制氧扩散与微生境空间[35]，抑制对胁迫敏感的类群（如鞘翅目幼虫与正蚓科等）。本试验观察到多样性与压实参数（SC、BD）之间的负相关关系，印证了先前研究关于土壤机械阻力是地下群落最强的非生物过滤因子之一[36－37]的结论。同时，压实通过对根系生长与水分保持的负面影响间接抑制多样性。该分层作用关系凸显：鼠兔打洞通过增强土壤养分、根系动态间接促进多样性，而放牧则通过一系列物理限制（表层压力→根活力下降→栖息地退化）影响多样性。这种“二元性”反映了两种相反过程并存：鼠兔活动引发的资源促进与放牧导致的机械胁迫。总体而言，本研究的发现与中度干扰假说（intermediate disturbance hypothesis，IDH）一致[38]。

3.3　青藏高原草地管理的生态启示

本研究为协调生物多样性保护与牧业生产提供了经验依据。本研究结果挑战了将鼠兔简单视为负面因素的固有认知，其作为“生态系统工程师”的作用值得在草地管理中被重新评估。因此，在管理实践中，小型食草动物治理可从单一的灭杀式管控转向基于生态过程的调控策略；可考虑减少对致死性措施的依赖，维持生态功能密度的鼠兔种群：既保持土壤异质性，又防止过度扩张[39]。该思路与环境友好型啮齿动物管理理念相一致[40]，强调生态、生产安全与生物多样性的协同。落实这一框架，有助于推动啮齿动物治理由被动的“有害生物防治”向主动的生态管理转变。

4　结论

大型与小型食草动物的干扰共同塑造了青藏高原高寒草甸大型土壤动物群落的多样性与结构。高原鼠兔通过打洞与筑丘增强土壤异质性、进而提升养分可利用性并促进根系生物量，提升地下生物多样性；相反，牦牛放牧通过压实土壤、抑制根系生长而降低群落多样性。二者共同干扰时，鼠兔可以缓解牦牛放牧带来的负效应。

参考文献 References：

[1] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, *et al*. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. Science, 2004, 304(5677): 1629－1633.

[2] Copley J. Ecology goes underground. Nature, 2000, 406(6795): 452－454.

[3] Fu S L. A review and perspective on soil biodiversity research. Biodiversity Science, 2007, 15(2): 109－115.
傅声雷. 土壤生物多样性的研究概况与发展趋势. 生物多样性, 2007, 15(2): 109－115.

[4] Yu C. Effects of plateau pika disturbances on soil nutrient concentrations of alpine meadow at three spatial scales. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
于成. 高原鼠兔干扰对高寒草甸土壤养分含量影响的空间多尺度分析. 兰州：兰州大学, 2018.

[5] Cai X C, Wei C B, Chu B, *et al*. Assessing the effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbance on vegetation and soil in alpine meadow: insights from bibliometric and Meta-analytical approaches. Journal of Plant Protection, 2024, 51(5): 1045－1055.
蔡新成, 魏才卜, 楚彬, 等. 基于文献计量学和Meta分析方法评估高原鼠兔干扰对高寒草甸植物与土壤的影响. 植物保护学报, 2024, 51(5): 1045－1055.

[6] Angst G, Potapov A, Joly F X, *et al*. Conceptualizing soil fauna effects on labile and stabilized soil organic matter. Nature Communications, 2024, 15(1): 5005.

[7] Sun X, Li Q, Yao H F, *et al*. Soil fauna and soil health. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1073－1083.
孙新, 李琪, 姚海凤, 等. 土壤动物与土壤健康. 土壤学报, 2021, 58(5): 1073－1083.

[8] Smith A T, Foggin J M. The plateau pika (*Ochotona curzoniae*) is a keystone species for biodiversity on the Tibetan Plateau. Animal Conservation, 1999, 2(4): 235-240.

[9] Sun F D, Long R J, Guo Z G, *et al*. Effects of rodents activities on plant community and soil environment in alpine meadow. Pratacultural Science, 2011, 28(1): 146-151.
孙飞达, 龙瑞军, 郭正刚, 等. 鼠类活动对高寒草甸植物群落及土壤环境的影响. 草业科学, 2011, 28(1): 146-151.

[10] Chen J J, Yi S H, Qin Y. The contribution of plateau pika disturbance and erosion on patchy alpine grassland soil on the Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for grassland restoration. Geoderma, 2017, 297: 1-9.

[11] Shi M M, Wang Z, Zhou B R, *et al*. Characteristics of grassland degradation and its relationship with climate factors on Qinghai-Tibetan Plateau, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3271-3278.
石明明, 王喆, 周秉荣, 等. 青藏高原草地退化特征及其与气候因子的关系. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3271-3278.

[12] Hua L M, Chai S Q. Rodent pest control on grasslands in China: current state, problems and prospects. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 415-423.
花立民, 柴守权. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策. 植物保护学报, 2022, 49(1): 415-423.

[13] Cui H Y, Wang Y B, Zhou X, *et al*. Positive role of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on environmental quality at low and moderate density on the Tibetan Plateau: Evidence from a Meta-analysis. Journal of Environmental Management, 2024, 361: 121239.

[14] Duan Y Y, Zhang J, Wang L L, *et al*. Effects of plateau pika on the relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine meadow. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(11): 25-35.
段媛媛, 张静, 王玲玲, 等. 高原鼠兔对高寒草甸植物物种多样性和功能多样性关系的影响. 草业学报, 2022, 31(11): 25-35.

[15] Shi H X, Yu J L. Influence of burrowing rodent density plots on the alpine *Kobresia* meadows structure and soil water content. Chinese Journal of Grassland, 2010, 32(4): 109-112, 116.
石红霄, 于健龙. 高原鼠兔洞口密度对高寒嵩草草甸植被及土壤水分的影响. 中国草地学报, 2010, 32(4): 109-112, 116.

[16] Niu Y J, Yang S W, Wang G Z, *et al*. Effects of grazing disturbance on plant diversity, community structure and direction of succession in an alpine meadow on the Tibetan Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 274-280.

[17] Song Y Q. The effects and regulation mechanisms of grassland patchy degradation and herbivore grazing on plant diversity. Changchun: Northeast Normal University, 2023.
宋月青. 草地斑块化退化和草食动物放牧对植物多样性的影响及调控机制. 长春: 东北师范大学, 2023.

[18] Ye G H, Chu B, Hu G X, *et al*. Response of soil macrofauna diversity to environmental factors under plateau zokor (*Myospalax baileyi*) disturbance in alpine meadow ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 792-802.
叶国辉, 楚彬, 胡桂馨, 等. 高原鼢鼠干扰下高寒草甸大型土壤动物多样性对环境因子的响应. 生态学报, 2021, 41(2): 792-802.

[19] Wang Z Z, Liu Y, He K, *et al*. Community characteristics and niche of soil macrofauna in the Nianchu River Basin, Tibet. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(12): 3911-3921.
王壮壮, 刘洋, 贺凯, 等. 西藏年楚河流域大型土壤动物群落特征与生态位. 生态学杂志, 2021, 40(12): 3911-3921.

[20] 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.

[21] Zhong J M. Larval taxonomy. Beijing: Agriculture Press, 1990.
钟觉民. 幼虫分类学. 北京: 农业出版社, 1990.

[22] Liu C F, Duan Y Y, Wang L L, *et al*. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbance on the relationship between plant species diversity and soil ecological stoichiometry in alpine meadows. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(6): 157-166.
刘彩凤, 段媛媛, 王玲玲, 等. 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物物种多样性与土壤生态化学计量比间关系的影响. 草业学报, 2023, 32(6): 157-166.

[23] Bao S D. Soil agrochemical analysis (The Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

[24] Kardol P, Wardle D A. How understanding aboveground-belowground linkages can assist restoration ecology. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(11): 670-679.

[25] Su X X, Li X L, Sun H F, *et al*. Effects of plateau pika and mowing disturbances on plant community and soil physical and chemical properties in alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10189-10199.

苏晓雪，李希来，孙华方，等．高原鼠兔和刈割扰动对高寒草甸植物群落和土壤特征的影响．生态学报，2024，44(22)：10189－10199.

[26] Wang B，Wu L J，Chen D M，*et al*. Grazing simplifies soil micro-food webs and decouples their relationships with ecosystem functions in grasslands. Global Change Biology，2020，26(2)：960－970.

[27] Ren Q，Ai Y，Hu J，*et al*. Effects of different yak grazing intensities on soil and plant biomass in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica，2021，41(17)：6862－6870.
任强，艾鹭，胡健，等．不同强度牦牛放牧对青藏高原高寒草地土壤和植物生物量的影响．生态学报，2021，41(17)：6862－6870.

[28] Cole L，Buckland S M，Bardgett R D. Influence of disturbance and nitrogen addition on plant and soil animal diversity in grassland. Soil Biology and Biochemistry，2008，40(2)：505－514.

[29] Scheunemann N，Digel C，Scheu S，*et al*. Roots rather than shoot residues drive soil arthropod communities of arable fields. Oecologia，2015，179(4)：1135－1145.

[30] 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.

[31] Hua R，Ye G H，De Giuli M，*et al*. Decreased species richness along bare patch gradient in the degradation of *Kobresia* pasture on the Tibetan Plateau. Ecological Indicators，2023，157：111195.

[32] Pang X P. Responses of plant productivity and soil nutrients of alpine meadows to the disturbance by plateau pika. Lanzhou：Lanzhou University，2021.
庞晓攀．高寒草甸植物生产力与土壤主要养分对高原鼠兔干扰响应的研究．兰州：兰州大学，2021.

[33] Wang S P，Luo M Y，Feng Y H，*et al*. Theoretical advances in biodiversity research. Biodiversity Science，2022，30(10)：25－37.
王少鹏，罗明宇，冯彦皓，等．生物多样性理论最新进展．生物多样性，2022，30(10)：25－37.

[34] Yang X，Zang J Y，Feng J L，*et al*. High grazing intensity suppress soil microorganisms in grasslands in China：A Meta-analysis. Applied Soil Ecology，2022，177：104502.

[35] Zhao J X，Tian L H，Wei H X，*et al*. Impact of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) burrowing-induced microtopography on ecosystem respiration of the alpine meadow and steppe on the Tibetan Plateau. Plant and Soil，2021，458(1)：217－230.

[36] Radford B J，Wilson-Rummenie A C，Simpson G B，*et al*. Compacted soil affects soil macrofauna populations in a semi-arid environment in central Queensland. Soil Biology and Biochemistry，2001，33(12/13)：1869－1872.

[37] Sun J C，Liu R T，Wang Z，*et al*. Effects of grazing on diversity of soil fauna in a grassland ecosystem based on the bibliometric analysis. Acta Ecologica Sinica，2024，44(14)：6405－6415.
孙建财，刘任涛，王真，等．基于文献计量的放牧对草地土壤动物多样性的影响．生态学报，2024，44(14)：6405－6415.

[38] Downey S S，Walker M，Moschler J，*et al*. An intermediate level of disturbance with customary agricultural practices increases species diversity in Maya community forests in Belize. Communications Earth & Environment，2023，4(1)：428.

[39] Hua R. Research on key technologies of plateau pika damage monitoring and risk assessment in Qinghai-Tibet Plateau. Lanzhou：Gansu Agricultural University，2023.
花蕊．青藏高原高原鼠兔危害监测预警与风险评估关键技术研究．兰州：甘肃农业大学，2023.

[40] Hua L M. An environmentally friendly paradigm for grassland rodent pest management：theory foundation，technical framework，and practical application. Journal of Plant Protection，2025，52(6)：1353－1362.
花立民．环境友好型草原鼠害管理范式：理论基础、技术体系与实践应用．植物保护学报，2025，52(6)：1353－1362.