

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



蔡新成 魏才卜 楚 彬 花立民*

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 兰州 730070)

摘要: 为明确高原鼠兔 *Ochotona curzoniae* 对高寒草甸生态系统组分的影响, 采用文献计量学解析高原鼠兔干扰对草地生态系统影响研究的科学关注点, 选取科学关注度指数较高的植物群落和土壤指标, 利用Meta分析方法定量评估高原鼠兔干扰对草地植物群落和土壤的影响。结果显示: 高原鼠兔干扰显著降低了植物群落的高度、总盖度、地上生物量、物种多样性指数和物种丰富度指数, 降幅分别为34.52%、23.31%、23.68%、3.77%和1.19%, 极显著增加了植物群落物种均匀度指数, 增幅为0.72%; 而在重度干扰下还会显著增加土壤的总钾含量和pH, 增幅分别为19.72%和6.18%, 同时显著降低了土壤中水分、总氮、总磷、有效钾和有机碳的含量, 降幅分别为19.75%、33.63%、18.13%、18.94%和14.79%。在高原鼠兔干扰下, 植物群落地上生物量与土壤有机碳含量、总氮含量呈显著正相关, 与土壤容重、总钾含量和pH呈显著负相关; 植物群落各物种多样性指数与土壤因子的关系具有不对称性, 但物种丰富度指数和多样性指数均与土壤总磷含量呈显著正相关, 均与土壤容重呈显著负相关。表明较强的高原鼠兔干扰会加剧高寒草甸的退化, 科学的鼠害管理和草地恢复措施可有效遏制高寒草甸持续退化。

关键词: 高原鼠兔; 高寒草甸; 植物; 土壤; 文献计量学; Meta分析

Assessing the effects of plateau pika *Ochotona curzoniae* disturbance on vegetation and soil in alpine meadow: insights from bibliometric and meta-analytical approaches

Cai Xincheng Wei Caibo Chu Bin Hua Limin*

(Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pests Control, National Forestry and Grassland Administration; Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education; Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu Province, China)

Abstract: To clarify the impact of plateau pika *Ochotona curzoniae* disturbances on components of the alpine meadow ecosystem, a bibliometric analysis was conducted to identify key scientific attention points related to the effects of pika disturbance on grassland ecosystems. Plant community and soil indicators with high scientific attention index were selected, and a meta-analysis was employed to quantitatively assess the impact of pika disturbance on these factors. The results showed that pika disturbances significantly reduced the height, total coverage, aboveground biomass, species diversity index, and species richness index of the plant community, with decreases of 34.52%, 23.31%, 23.68%, 3.77%, and 1.19%, respectively. It also significantly increased the plant community's species evenness index by 0.72%. Under heavy disturbance, pika activity significantly increased total potassium content and soil

基金项目: 国家自然科学基金(32160338), 甘肃省高校科研创新平台重大培育项目(2024CXPT-07), 甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QDFC-2-24-02), 国家林业和草原局草地啮齿动物危害防控创新团队

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: hualm@gau.edu.cn

收稿日期: 2024-04-26

pH by 19.72% and 6.18%, respectively, while significantly reducing soil moisture, total nitrogen, total phosphorus, available potassium, and organic carbon contents by 19.75%, 33.63%, 18.13%, 18.94%, and 14.79%, respectively. In the presence of pika disturbance, the aboveground biomass was significantly positively correlated with soil organic carbon and total nitrogen contents, and negatively correlated with soil bulk density, total potassium content, and pH. The relationships between the indices of species diversity and soil factors were asymmetric; however, species richness and diversity indices were significantly positively correlated with total phosphorus content and significantly negatively correlated with soil bulk density. These findings suggest that intense pika disturbance exacerbates the degradation of alpine meadows, and implementing scientific rodent control and grassland restoration measures could effectively curb the ongoing degradation of these ecosystems.

Key words: *Ochotona curzoniae*; alpine meadow; plant; soil; bibliometrics; meta-analysis

高寒草甸是青藏高原的主要草原类型,在水源涵养、畜牧生产和生物多样性保护等方面发挥着重要作用,是我国重要的自然资源和生态屏障(Zhang et al., 2021)。但处于生物极限水平的水热条件使高寒草甸生态系统极为敏感,属于典型的生态脆弱区(Li et al., 2020)。近年来,受气候变化和人为干扰的双重影响,高寒草甸出现不同程度退化,甚至部分地区出现大面积黑土滩,严重威胁着当地畜牧业发展和草地生态安全(Chen et al., 2014)。小型草食哺乳动物是高寒草甸生态系统重要的生物干扰源之一。高密度小型哺乳动物的采食、掘洞等行为会加剧草地退化,进而引发草地鼠害,对植物群落演替和土壤物质循环过程产生不利影响(Qin et al., 2021a)。明确小型哺乳动物干扰对高寒草甸生态系统组分的影响,有助于厘清其与草地生态系统稳定的关系,进而指导草地生物多样性保护和草地鼠害科学防控。

高原鼠兔 *Ochotona curzoniae* 是青藏高原高寒草甸生态系统的重要组分,被誉为“生态工程师”(蔡新成等, 2022)。在高寒草甸退化的诸多干扰因子中,高原鼠兔干扰对植物和土壤方面的影响备受关注。有研究表明,适度的高原鼠兔活动可对草地植物和土壤产生积极影响,如通过挖掘活动增加土壤水分和养分含量,改善种子定植和发芽的土壤条件,进而提高植物群落的物种多样性(Qin et al., 2021b)。但高密度高原鼠兔的采食和掘洞会使草地形成秃斑,通过营养和非营养相互作用的方式改变植物群落结构和土壤养分条件,降低植物群落生产力和土壤肥力,造成草地景观破碎化、土地斑块化(张卫红等, 2018; Zhao et al., 2021)。在青藏高原,高原鼠兔被当作重点害鼠进行大规模防治(何秋霞等, 2024)。尽管高原鼠兔干扰对草地植物和土壤的影响研究较多,但由于研究区域、试验设计和干扰强度存在差异,其研究结果差异较大。

整合分析可准确、全面地总结草地植物和土壤对高原鼠兔干扰响应的普遍规律。本研究在国内外现有文献的基础上,采用文献计量学方法解析高原鼠兔干扰对高寒草甸植物和土壤影响研究的科学关注点,选取科学关注度较高的植物群落和土壤指标,利用 Meta 分析方法定量评估高原鼠兔干扰对草地植物群落和土壤因子的影响,揭示高寒草甸退化对高原鼠兔干扰的响应机制,明确高原鼠兔对高寒草甸生态系统的影响,以期退化草地恢复治理和鼠害科学管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

文献数据:本研究以 2004 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日为检索时间上下限,以“主题=(*Ochotona curzoniae*+高原鼠兔)和(草地+草原+草甸+草场)”为检索词,从中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)共检索到 523 篇相关中文文献供试;以“TS=(*Ochotona curzoniae* or plateau pika) and (grassland or meadow or steppe or rangeland)”为检索词,从 Web of Science(WOS)数据库共检索到 169 篇相关英文文献供试。

供试软件:GetData Graph Digitizer 2.26 软件,从网站 <https://getdata-graph-digitizer.software.informer.com> 下载;R 4.3.3 软件,从网站 <https://www.r-project.org> 下载;SPSS 26.0 软件,从网站 <https://www.ibm.com/us-en> 下载。

1.2 方法

1.2.1 高原鼠兔干扰效应的文献计量学分析

基于检索到的文献题目和摘要进行初步筛选,选择以“草地对高原鼠兔干扰响应”为主题的文献,剔除报纸文献、会议文献及重复文献后共获得 139 篇中文文献和 60 篇英文文献用于文献计量学分析。

发文量在一定程度上可以反映某时间段内科研工作者对该领域的关注度,而科学关注度指数(scientific attention index, SAI)可以衡量科研工作者对高原鼠兔干扰草地植物和土壤各指标的关注程度(Wyckhuys et al., 2023)。SAI=含有相关指标的文献数量/总发文数量。本研究以发文量和科学关注度指数进行文献计量学分析,并选取科学关注度指数较高(>0.10)的植物群落和土壤指标进行Meta分析。

1.2.2 高原鼠兔干扰效应的Meta分析

在Meta分析之前,为降低文献偏倚程度,通过以下准则对1.2.1所选文章进行复筛:(1)研究内容为高原鼠兔干扰对天然草地植物群落和土壤因子的影响;(2)同一研究中,试验组和对照组必须在草地类型、植物群落、土壤质地及气候特征等方面保持一致;(3)研究不仅设有高原鼠兔任意干扰强度(轻度、中度及重度)处理试验,还需设有零干扰对照试验;(4)试验中植物群落和土壤相关指标均在植物生长季获取,且文献需提供均值、标准误(或标准差)和样本量。最终选择符合以上标准的48篇文献进行Meta分析。本研究中高原鼠兔干扰强度采用原文献分类标准(Herrero-Jáuregui & Oesterheld, 2018),即分为未干扰、轻度干扰、中度干扰和重度干扰4级;文献草地类型均为高寒草甸。另外,基于1.2.1分析结果,本研究选取6个植物群落指标(高度、总盖度、地上生物量、物种丰富度指数、物种多样性指数和物种均匀度指数)和9个土壤指标(水分含量、容重、总氮含量、总磷含量、总钾含量、有效磷含量、有效钾含量、有机碳含量和pH)共15个响应变量进行Meta分析。获取文献数据时,表格数据直接读取,图片数据需导入GetData Graph Digitizer 2.26软件,按照数值确定坐标原点、横轴及纵轴刻度后进行提取。15个响应变量中的6个植物群落指标数据可直接获取,9个土壤指标数据均针对0~20 cm表层土壤测定得到,其中土壤有机碳含量需通过获取的土壤有机质含量计算得到,土壤有机碳含量=土壤有机质含量×0.58(魏卫东等, 2018);其他8个土壤指标数据可直接获取。对文献只提供标准误的数据,用公式 $SD = SE \times \sqrt{n}$ 计算标准差(Zhou et al., 2017),式中SD为标准差,SE为标准误,n为重复数。

采用自然对数响应比($\ln R$)量化草地植物群落和土壤因子对高原鼠兔干扰的响应程度(Davidson et al., 2017), $\ln R = \ln \frac{x_e}{x_c} = \ln x_e - \ln x_c$,式中: x_e 为高原鼠兔干扰草地植物群落和土壤指标的均值, x_c 为高

原鼠兔零干扰对照草地植物群落和土壤指标的均值。与 $\ln R$ 对应的研究内方差 v 的计算公式为 $v = \frac{S_e^2}{N_e x_c^2} + \frac{S_c^2}{N_c x_c^2}$,式中, S_e 为高原鼠兔干扰处理的标准差, S_c 为对照的标准差, N_e 和 N_c 分别为高原鼠兔干扰与对照处理的样本量。在进行Meta分析前采用Homogeneity检验法(Q test)对研究中各指标的自然对数响应比进行异质性检验,发现所有指标间均存在显著异质性,表明纳入的试验数据均值间存在较大差异,因此采用随机效应模型进行Meta分析。

在随机效应模型中,需计算高原鼠兔干扰对草地植物群落和土壤因子影响的加权响应比,其中单个研究的权重系数 $w_i^* = 1/(v_i + \tau^2)$,加权响应比

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k (w_i^* y_i)}{\sum_{i=1}^k w_i^*}, \text{标准误 } SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i^*}}, \text{式中, } v_i \text{ 为单}$$

个研究的内方差, τ^2 为研究间方差, y_i 为单个研究的自然对数响应比, i 为循环变量, k 为该指标所对应的研究数据总组数。此外,为直观解释高原鼠兔干扰对草地植物群落和土壤各指标变化的影响,将相关参数的加权响应比转化为相对变化率 Y_r ,以表征相关参数的变化幅度, $Y_r = (e^{\bar{y}} - 1) \times 100\%$ 。最后,对高原鼠兔干扰草地的土壤指标响应比与植物群落指标响应比进行线性回归分析,解析高原鼠兔干扰下草地植物群落特征与土壤因子的关系。

1.3 数据分析

使用Excel 2021软件整理提取的数据并建立数据集。利用R 4.3.3软件的Metafor包进行Meta分析,应用 U 检验法对各指标的加权响应比进行差异显著性检验。采用SPSS 26.0软件进行线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 文献计量学分析

2.1.1 发文量分析

基于CNKI和WOS数据库发文量可知,以“草地对高原鼠兔干扰的响应”为主题的论文总量为199篇,其中CNKI数据库139篇,WOS数据库60篇,均以研究型文献为主,分别占检索到的总文献量的92.09%和91.67%(图1-A)。2004—2023年,整体发文量呈上升趋势,在2019年发文量最高,达到30篇;在2012年之前年发文量较少,其中CNKI数据库年发文量维持在3篇左右,而WOS数据库几乎没有文献发表;在2013年之后CNKI和WOS数据库的年发文

量呈波动上升,但CNKI数据库在2019年、WOS数据

库在2020年之后,年发文量又出现下降趋势(图1-B)。

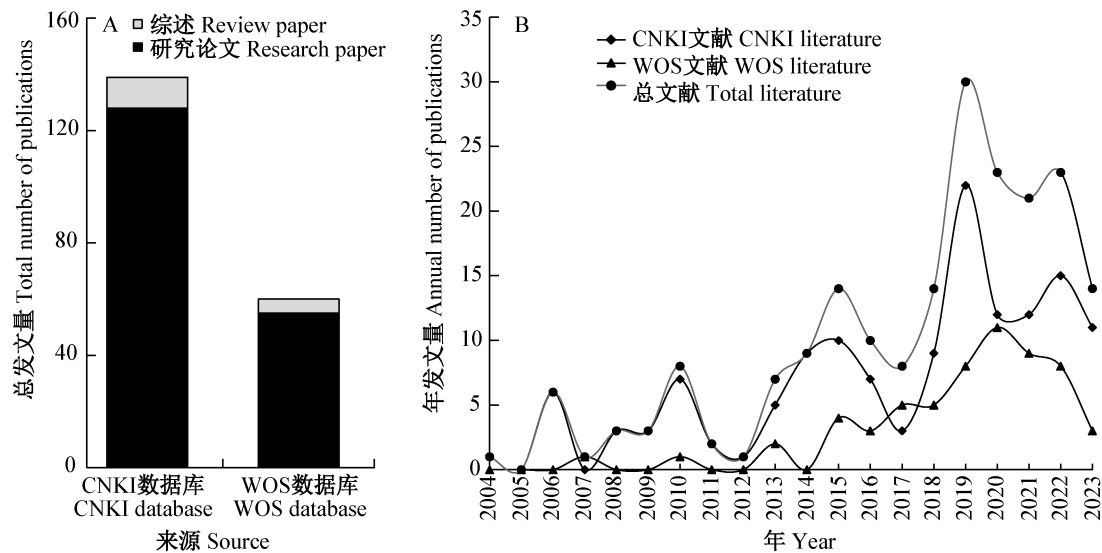


图1 2004—2023年高寒草甸对高原鼠兔干扰响应研究的发发现状

Fig. 1 Current situation of literatures on response of alpine meadow to disturbance of plateau pikas from 2004 to 2023

2.1.2 科学关注度指数分析

从文献内容来看,高原鼠兔对草地干扰的研究主要集中在草地植物和土壤方面。本研究也分析了有关草地植物和土壤研究的科学关注度指数,发现无论在CNKI数据库还是WOS数据库,有关植物研究的科学关注度指数均高于与土壤相关的研究,其中CNKI数据库有关植物与土壤研究的科学关注度指数相差较大,而WOS数据库关于两者研究的科学关注度指数差距较小(图2-A)。

在已发表文献中,关于高原鼠兔干扰对草地植物和土壤的影响研究呈现多元化特点,植物群落特征主要涉及总盖度、生物量、物种多样性、物种组成和高度,且具有较高的科学关注度($SAI > 0.18$);土壤特征主要集中在土壤物理性质和土壤化学性质,且具有较高的科学关注度($SAI > 0.25$),而对土壤种子库、土壤酶活性、土壤动物和土壤微生物等方面的科学关注度较低($SAI < 0.10$)(图2-B~C)。

为进一步明晰高原鼠兔干扰下植物群落和土壤各指标在文献中的关注程度,本研究对具有较高科学关注度的各指标进行了对比分析(图3)。在植物生物量研究中,植物地上生物量的科学关注度最高($SAI > 0.38$);在植物群落物种多样性中,丰富度指数、多样性指数和均匀度指数的科学关注度较高($SAI > 0.10$);在土壤物理性质中,土壤水分含量和容重的科学关注度较高($SAI > 0.10$);在土壤化学性质研究中,土壤总氮含量、总磷含量、总钾含量、有效磷含量、有效钾含量、有机碳含量和pH的科学关注度

较高($SAI > 0.10$)。最终本研究选取植物群落高度、总盖度、地上生物量、物种丰富度指数、物种多样性指数和物种均匀度指数以及土壤水分含量、容重、总氮含量、总磷含量、总钾含量、有效磷含量、有效钾含量、有机碳含量和pH共15个响应变量进行Meta分析。

2.2 干扰效应的Meta分析

2.2.1 草地植物和土壤因子对高原鼠兔干扰的响应

高原鼠兔干扰对草地植物群落的影响较大,其中草地植物群落高度(加权响应比为-0.42)、总盖度(加权响应比为-0.27)和地上生物量(加权响应比为-0.27)在高原鼠兔干扰下极显著下降($P < 0.001$),降幅分别为34.52%、23.31%和23.68%。此外,高原鼠兔干扰也极显著改变了草地植物群落物种多样性,其中物种丰富度指数(加权响应比为-0.01)和物种多样性指数(加权响应比为-0.04)极显著下降($P < 0.001$),降幅分别为1.19%和3.77%;而物种均匀度指数(加权响应比为0.01)极显著上升($P < 0.001$),增幅为0.72%(图4-A)。

草地土壤各因子对高原鼠兔干扰的响应存在差异,其中高原鼠兔干扰极显著增加了总钾含量(加权响应比为0.16)和pH(加权响应比为0.04)($P < 0.001$),增幅分别为17.82%和4.50%,显著增加了土壤容重(加权响应比为0.09)($P < 0.05$),增幅为9.86%;极显著降低了土壤水分含量(加权响应比为-0.14)($P < 0.001$)和有效磷含量(加权响应比为-0.16)($P < 0.01$),降幅分别为12.89%和15.13%;但对土壤总氮含量、总磷含量、有效钾含量和有机碳含量无显著影响(图4-B)。

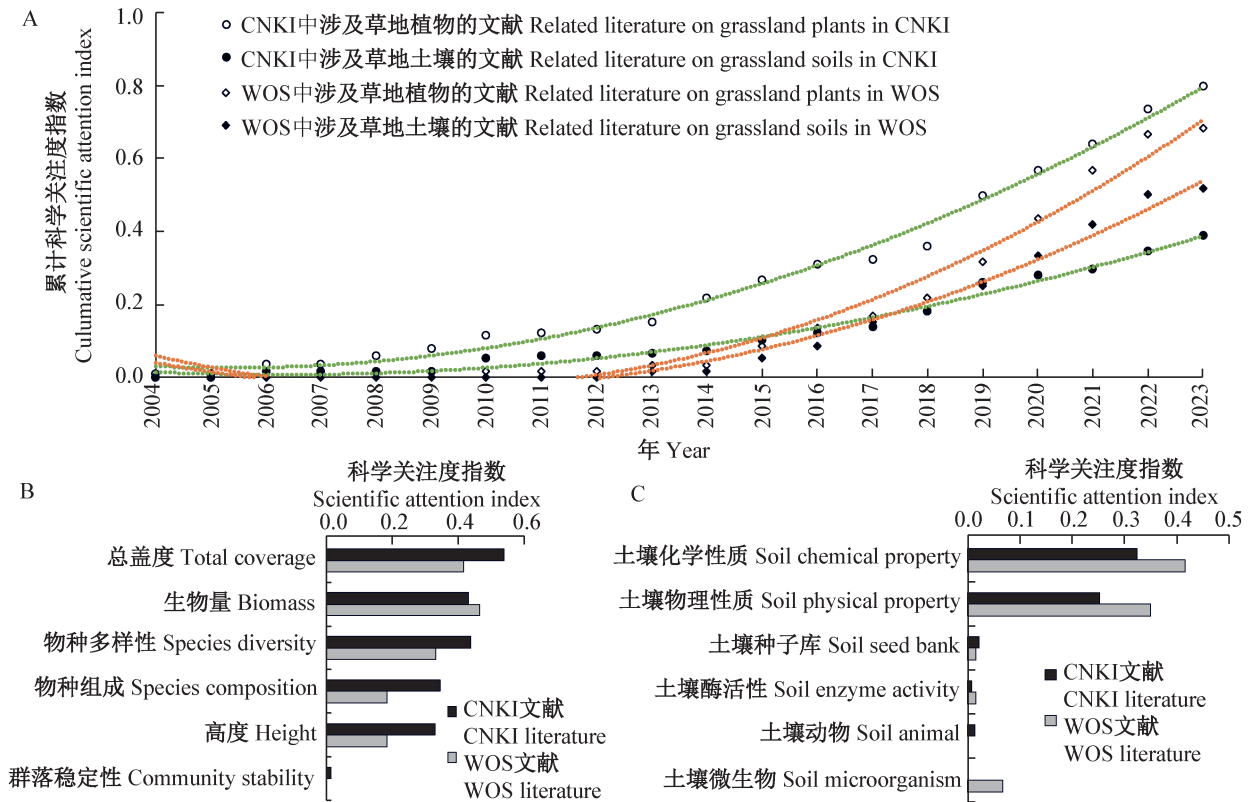


图2 高寒草甸植物群落和土壤因子对高原鼠兔干扰响应研究的科学关注度指数

Fig. 2 Scientific attention index on response of plant community and soil factors of alpine meadow to disturbance of plateau pikas

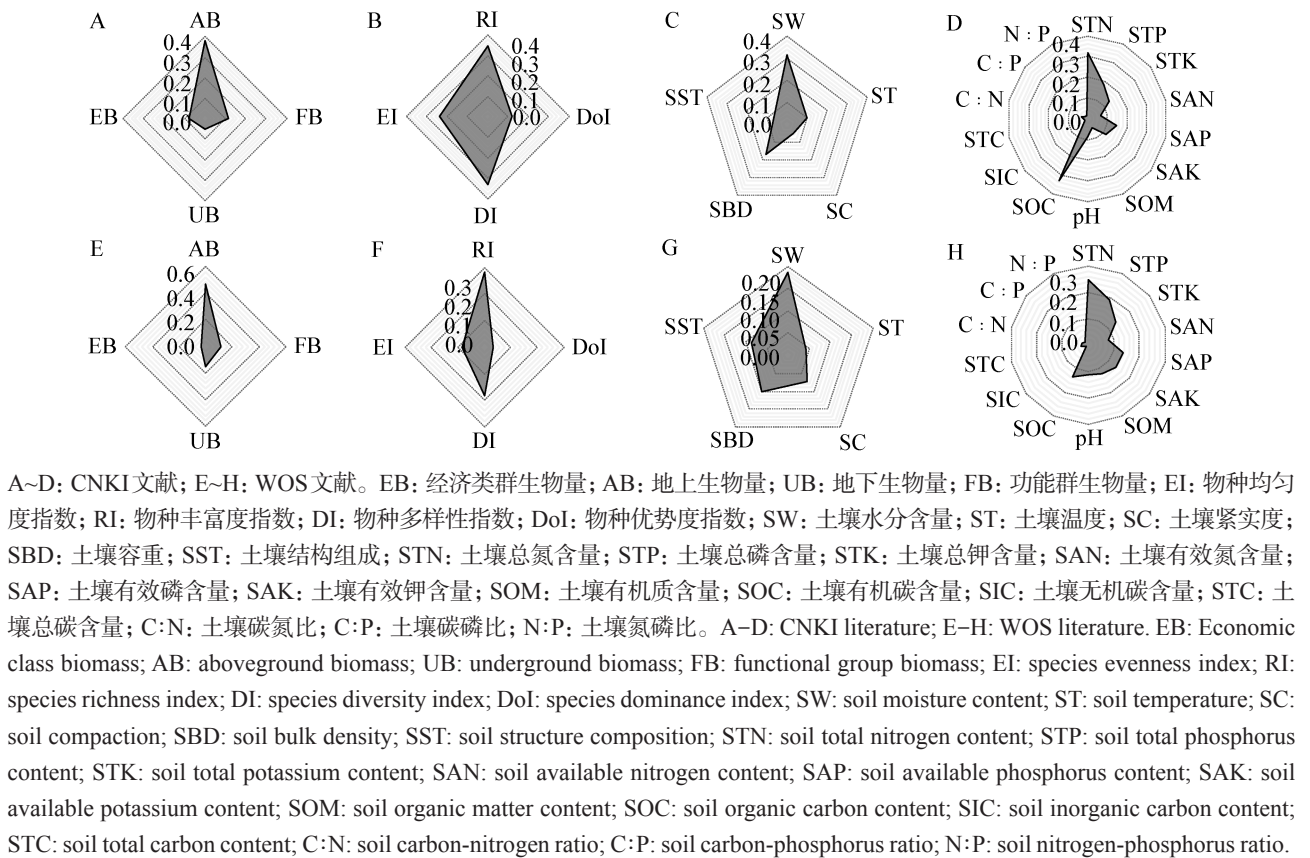


图3 高原鼠兔干扰响应研究中对高寒草甸植物群落和土壤指标的科学关注度指数

Fig. 3 Scientific attention index on plant community and soil indexes of alpine meadow in the study of disturbance of plateau pikas

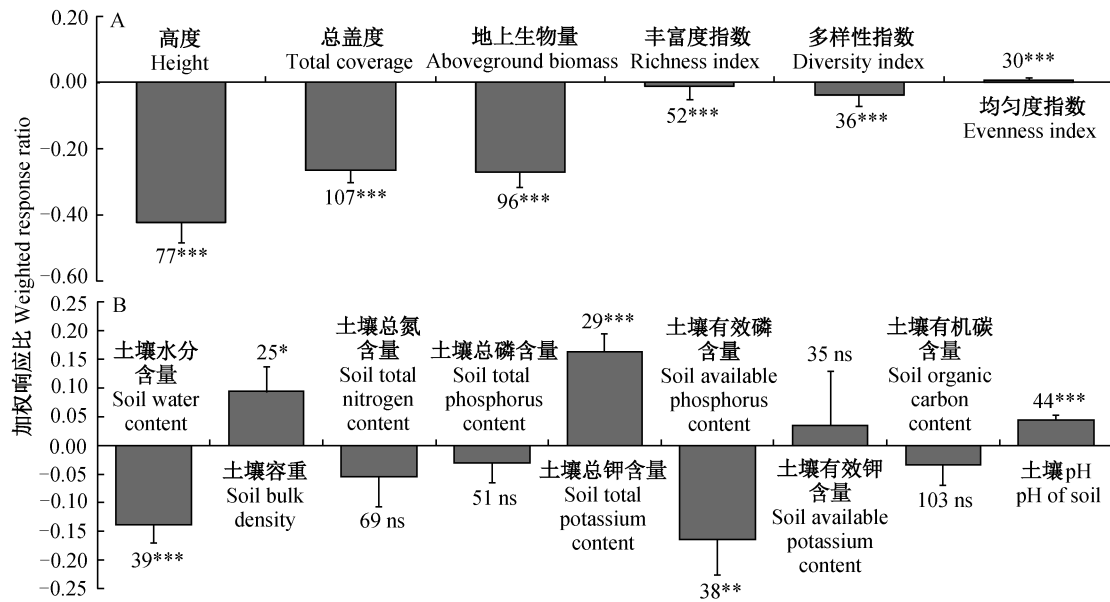


图4 高寒草甸植物群落(A)和土壤(B)因子对高原鼠兔干扰的响应

Fig. 4 Response of plant community (A) and soil (B) factors of alpine meadow to disturbance of plateau pikas

图中数据为平均数±标准误。柱上数字表示样本量。*、**和***表示经 *U* 检验法检验差异显著 ($P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$)；ns 表示差异不显著。Data in the figure are mean±SE. The number on the bars is the sample size. *, ** or *** indicates significant difference by *U* test ($P<0.05$, $P<0.01$ or $P<0.001$); ns indicates no significant difference.

2.2.2 草地植物和土壤因子对高原鼠兔干扰强度的响应

高原鼠兔干扰显著改变了草地植物群落特征，不同干扰强度均显著降低了植物群落的高度、总盖度和地上生物量 ($P<0.05$)，但三者对干扰强度的响应存在一定差异，其中植物群落高度(加权响应比

为-0.79)和总盖度(加权响应比为-0.41)对中度干扰的响应最大，但地上生物量(加权响应比为-0.34)对中度干扰的响应最小，中度干扰下三者的降幅分别为54.57%、33.83%和29.04%(图5-A~C)。

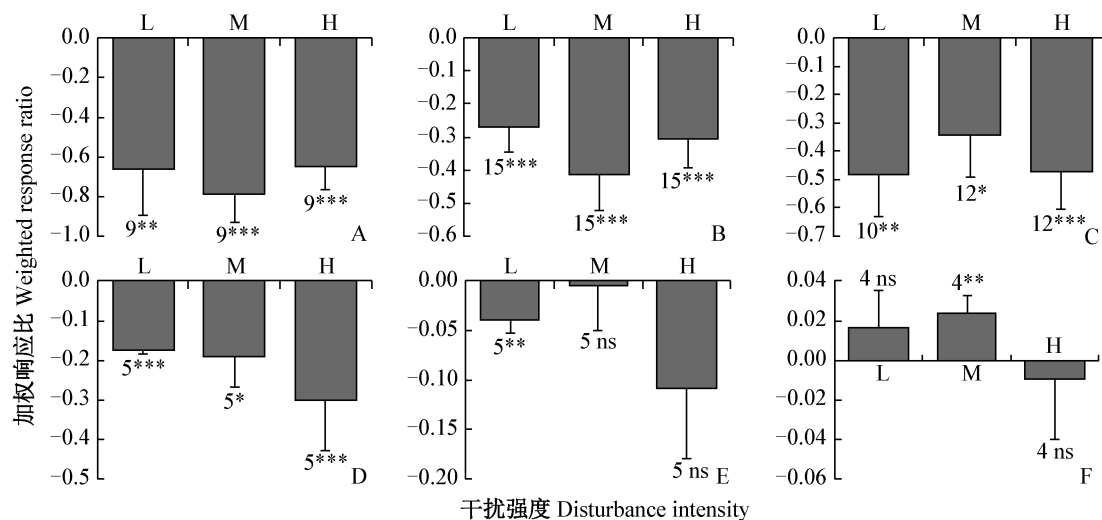


图5 高寒草甸植物群落特征对高原鼠兔干扰强度的响应

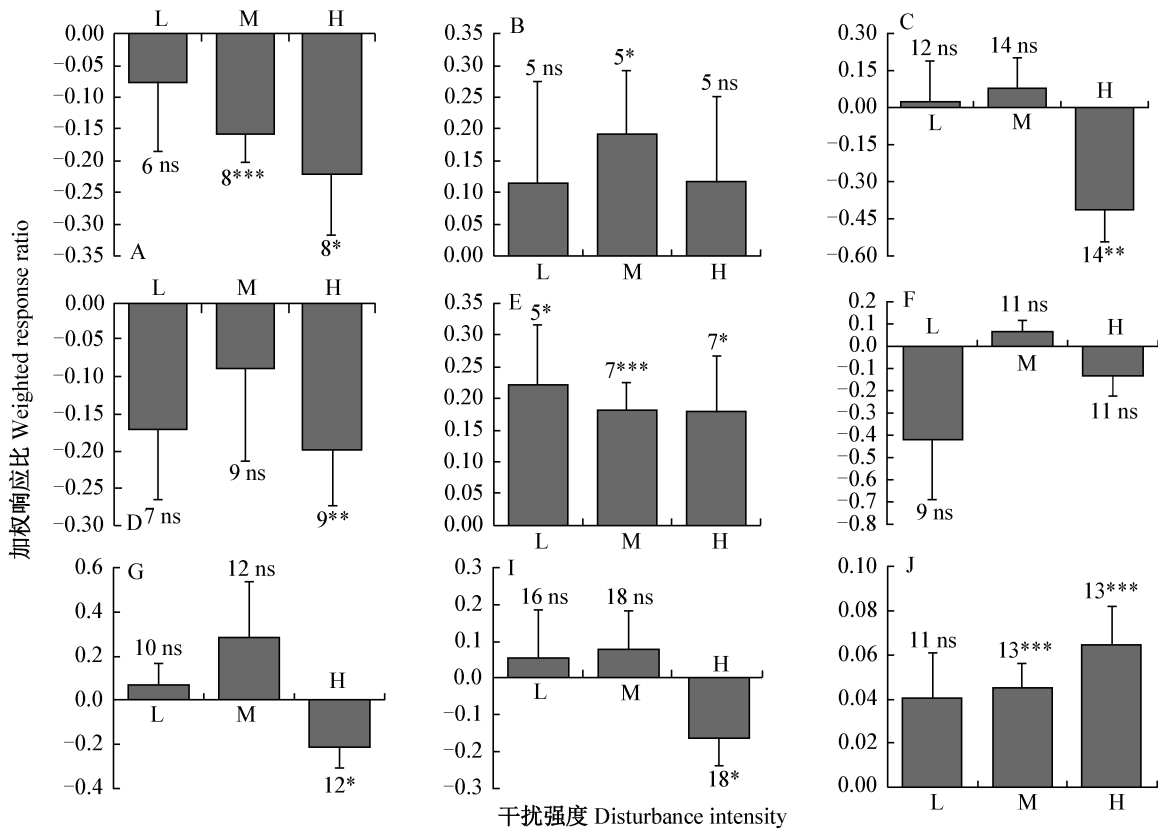
Fig. 5 Response of plant community characteristics of alpine meadow to disturbance intensity of plateau pikas

图中数据为平均数±标准误。柱上数字表示样本量。*、**和***表示经 *U* 检验法检验差异显著 ($P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$)；ns 表示差异不显著。Data in the figure are mean±SE. The number on the bars is the sample size. *, ** or *** indicates significant difference by *U* test ($P<0.05$, $P<0.01$ or $P<0.001$); ns indicates no significant difference.

此外,高原鼠兔不同干扰强度均显著降低了草地植物群落物种丰富度指数($P<0.05$),且干扰效应随干扰强度的增加而升高;轻度干扰显著降低了草地植物群落物种多样性指数(加权响应比为-0.04, $P<0.01$),而中度干扰和重度干扰对该指数无显著影响;中度干扰显著增加了草地植物群落物种均匀度指数(加权响应比为0.02, $P<0.01$),但轻度干扰和重度干扰对该指数无显著影响(图5-D~F)。

土壤理化性状对高原鼠兔不同干扰强度的响应差异明显,其中轻度干扰显著增加了土壤总钾含量(加权响应比为0.22) ($P<0.05$),增幅为24.61%;中度干扰显著增加了土壤容重(加权响应比为0.19)、

总钾含量(加权响应比为0.18)和pH(加权响应比为0.05) ($P<0.05$),增幅分别为20.92%、19.72%和5.13%,同时极显著降低了土壤水分含量(加权响应比为-0.09) ($P<0.001$),降幅为8.61%;而重度干扰显著增加了土壤总钾含量(加权响应比为0.18)和pH(加权响应比为0.06) ($P<0.05$),增幅分别为19.72%和6.18%,同时显著降低了土壤水分含量(加权响应比为-0.22)、总氮含量(加权响应比为-0.41)、总磷含量(加权响应比为-0.20)、有效钾含量(加权响应比为-0.21)和有机碳含量(加权响应比为-0.16) ($P<0.05$),降幅分别为19.75%、33.63%、18.13%、18.94%和14.79%(图6)。



A~G、I、J: 依次为土壤水分含量、容重、总氮含量、总磷含量、总钾含量、有效磷含量、有效钾含量、有机碳含量和pH。L: 轻度干扰; M: 中度干扰; H: 重度干扰。A~G、I and J: The moisture content, bulk density, total nitrogen content, total phosphorus content, total potassium content, available phosphorus content, available potassium content, organic carbon content, and pH of soil, respectively. L: Lightly disturbance; M: moderately disturbance; H: heavily disturbance.

图6 高寒草甸土壤因子对高原鼠兔干扰强度的响应

Fig. 6 Response of soil factors of alpine meadow to disturbance intensity of plateau pikas

图中数据为平均数±标准误。柱上数字表示样本量。*、**和***表示经U检验法检验差异显著($P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$); ns表示差异不显著。Data in the figure are mean±SE. The number on the bars is the sample size. *, ** or *** indicates significant difference by U test ($P<0.05$, $P<0.01$ or $P<0.001$); ns indicates no significant difference.

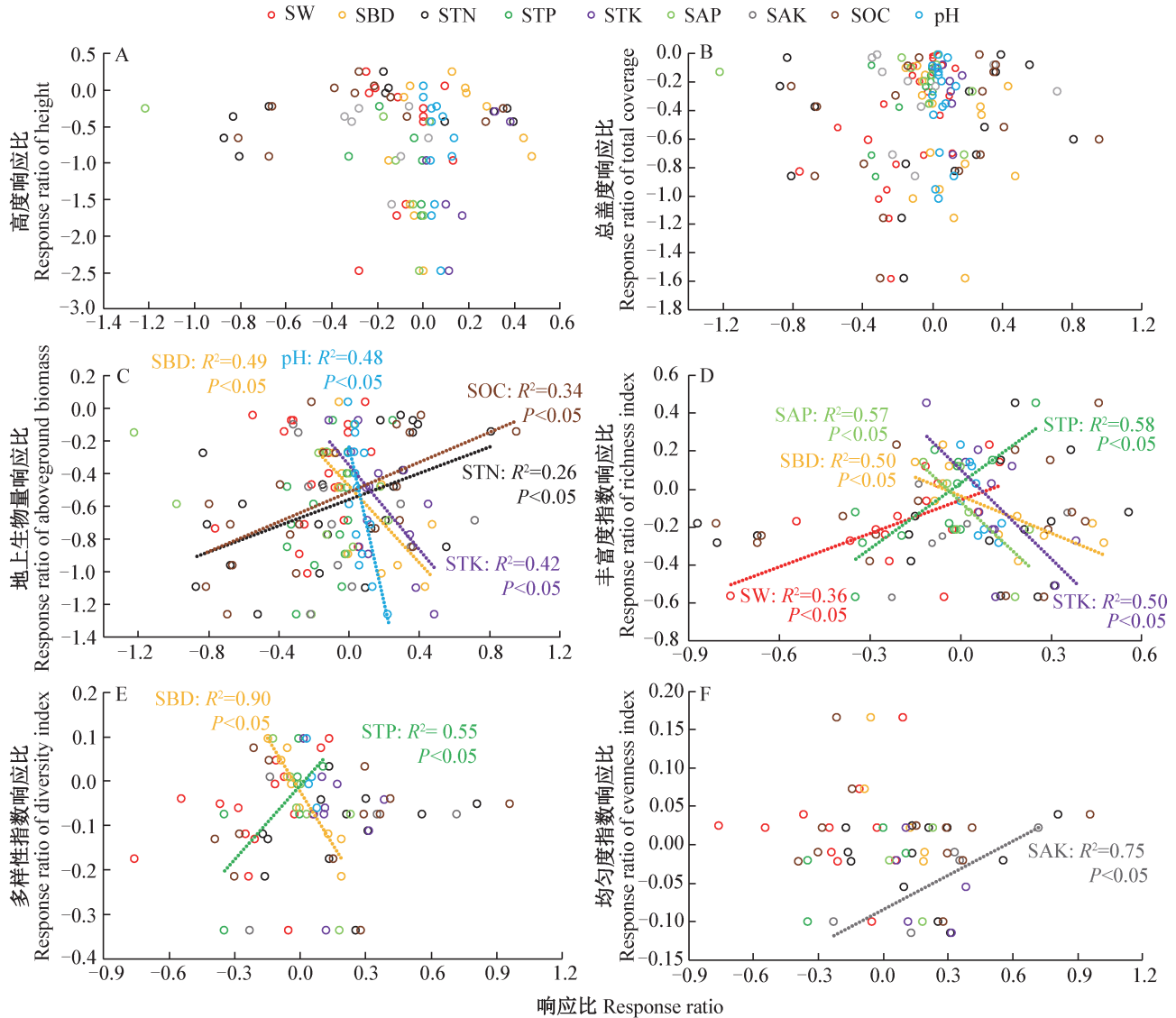
2.2.3 高原鼠兔干扰下草地植物群落与土壤因子的关系

在高原鼠兔干扰下,草地植物群落高度和总盖度与土壤各因子均无显著相关性(图7-A~B),而草

地植物群落地上生物量随土壤有机碳含量($R^2=0.34$)和总氮含量($R^2=0.26$)的增加而显著升高($P<0.05$),随土壤容重($R^2=0.49$)、总钾含量($R^2=0.42$)和pH($R^2=$

0.48)的增加而显著下降($P<0.05$),但与土壤水分含量、总磷含量、有效磷含量和有效钾含量无显著相关性(图7-C)。在高原鼠兔干扰下,植物群落各物种多样性指数与土壤因子的关系具有不对称性,其中,物种丰富度指数与土壤水分含量($R^2=0.36$)和总磷含量($R^2=0.58$)呈显著正相关($P<0.05$),与土壤容重($R^2=$

0.50)、总钾含量($R^2=0.50$)和有效磷含量($R^2=0.57$)呈显著负相关($P<0.05$,图7-D);物种多样性指数与土壤总磷含量($R^2=0.55$)呈显著正相关($P<0.05$),与土壤容重($R^2=0.90$)呈显著负相关($P<0.05$)(图7-E);而物种均匀度指数仅与土壤有效钾含量($R^2=0.75$)呈显著正相关($P<0.05$,图7-F)。



SW: 土壤水分含量; SBD: 土壤容重; STN: 土壤总氮含量; STP: 土壤总磷含量; STK: 土壤总钾含量; SAP: 土壤有效磷含量; SAK: 土壤有效钾含量; SOC: 土壤有机碳含量。SW: Soil moisture content; SBD: soil bulk density; STN: soil total nitrogen content; STP: soil total phosphorus content; STK: soil total potassium content; SAP: soil available phosphorus content; SAK: soil available potassium content; SOC: soil organic carbon content.

图7 高原鼠兔干扰下植物群落特征与土壤因子的关系

Fig. 7 Relationship between plant community characteristics and soil factors under the disturbance of plateau pikas

3 讨论

高原鼠兔干扰增加了高寒草甸退化过程的复杂程度,明确高原鼠兔干扰下高寒草甸退化特征与规律,是揭示高寒草甸退化机制和实现科学恢复治理

的关键(赵健赞等,2023)。近20年来,在CNKI数据库和WOS数据库中以“草地对高原鼠兔干扰响应”为主题的研究开展较多,且发文量总体呈上升趋势,尤其近10年发文量上涨幅度较高。发文量在一定程度上反映了该领域研究的现状、水平和发展速度

(杨鼎等,2022)。本研究通过分析发文量可知,2012年之前国内学者对高原鼠兔干扰高寒草甸生态系统的研究不足,直到2012年国家发展和改革委员会发布《西部地区重点生态区综合治理规划纲要(2012—2020年)》,将青藏高原纳入江河水源涵养区,人们才逐渐认识到高原鼠兔干扰对草地退化的严重影响,并积极开展草地植物和土壤特征方面的研究。

干扰对草地影响的直观表现为植物和土壤的退化,其中植物应对干扰的响应程度比土壤更敏感、更迅速(乌云嘎等,2023)。因此,在研究草地植物和土壤特征对高原鼠兔干扰的响应时,对植物的科学关注度高于土壤。目前,在高原鼠兔干扰对高寒草甸影响的研究中,关注度较高的植物群落指标有高度、总盖度、地上生物量和物种多样性(丰富度指数、多样性指数和均匀度指数),土壤指标有土壤物理性质(水分含量、容重)和土壤化学性质(全氮含量、全磷含量、全钾含量、有效磷含量、有效钾含量、有机碳含量及pH)。然而,高寒草地是一个复杂的生态系统,高原鼠兔对其造成的影响不仅表现在植物和土壤方面,也影响其生态系统服务功能,因此科学评价其对高原鼠兔干扰的响应水平,必须建立可行的指标体系(杜金鸿等,2017)。当前,高寒草地对高原鼠兔干扰响应的评价指标还相对单一,仍缺乏较全面的系统指标体系。今后的研究应综合考虑高寒草地生态系统服务各功能对高原鼠兔干扰的响应。

高原鼠兔对植物的干扰除采食外,还有2个重要方面:一是高原鼠兔掘土行为及洞穴间连通的跑道会降低植物群落盖度(宋梓涵等,2020);二是为降低被捕食风险、保证开阔视野,高原鼠兔会通过刈割行为降低活动区周围植物群落高度(齐昊昊等,2022)。因此,高原鼠兔干扰会显著降低植物群落高度、盖度和地上生物量,本研究结果与大部分学者的研究结果一致。另外,高原鼠兔作为高寒草甸重要的生物干扰源在高寒草地生态系统中具有多重作用,而害与益的转化主要取决于高原鼠兔干扰强度(周雪荣等,2010)。本研究结果显示,高原鼠兔各干扰强度均显著降低了植物群落的高度、盖度和地上生物量。这说明高原鼠兔对高寒草地的干扰程度普遍较高,会加剧草地退化,因此通过积极的科学鼠害管理来维持“鼠草平衡”是遏制高寒草地持续退化的有效途径。物种多样性能反映高寒草地群落结构复杂性和生物资源丰富度,是指示草地植物生长健康和生态系统稳定状况的重要指标(周润惠等,2022),因此高原鼠兔干扰对草地植物群落物种多样性的影

响研究备受关注。以往的研究结果存在较大争议,有研究认为高原鼠兔干扰显著增加了植物群落物种丰富度指数和多样性指数,而对物种均匀度指数无明显影响(段媛媛等,2022);也有研究认为随着高原鼠兔干扰强度增加,植物群落物种丰富度指数和多样性指数均呈现先增大后减小的变化趋势(徐海鹏等,2019)。本研究在整合分析后发现高原鼠兔各干扰强度均降低了草地植物群落物种丰富度指数和多样性指数,而物种均匀度指数有升高趋势。这说明高寒草地植物群落抗干扰能力较弱,其物种多样性对高原鼠兔干扰较敏感。而物种均匀度指数升高则是因为高原鼠兔活动及选择性采食抑制了草地优势种植物的生长,释放了其他植物的生长潜能(根呷羊批等,2022)。

高原鼠兔通过挖掘活动、排泄物分解和采食过程中植物碎屑返还等方式直接或间接影响土壤结构和物质循环,从而改变土壤物理和化学性质(Pang & Guo,2017)。本研究结果显示,草地土壤各因子对高原鼠兔干扰的响应存在差异,高原鼠兔不同强度的干扰显著增加了土壤容重、总钾含量和pH,显著降低了土壤水分含量。另外,高原鼠兔高强度干扰会显著降低土壤总氮含量、总磷含量、有效钾含量和有机碳含量。容重是反映土壤结构最基本的指标,容重增加可能是由于高原鼠兔活动对土壤的挤压作用导致,其次降雨也会使高原鼠兔造成的裸露秃斑地表面变得紧实(钱嘉鑫,2023)。有研究认为,高原鼠兔干扰显著降低了其活动区植物群落盖度和多样性,从而加速土壤水分蒸发,导致土壤保水能力下降和pH升高(冯峰等,2019),这与本研究结果一致。总钾含量主要取决于土壤母质(刘世全等,2005),总钾含量增加可能是因为高原鼠兔掘土活动造成土壤垂直结构改变而引起。综上所述,高原鼠兔干扰总体上降低了草地土壤质量,尤其高原鼠兔重度干扰使土壤更加贫瘠,退化程度加剧。

土壤是植物生长的营养库,土壤理化性质的改变也可影响草地植物生长发育和演替过程(侯阁等,2019)。植物对土壤养分的依存和适应关系是草地植物群落结构和功能维持的主要途径(叶国辉等,2019)。本研究结果显示,在高原鼠兔干扰下,草地植物群落地上生物量随土壤有机碳和总氮含量的增加而显著升高,随土壤容重、总钾含量和pH的增加而显著下降;而植物群落各物种多样性指数与土壤因子的关系具有不对称性,植物群落物种丰富度指数和多样性指数均与土壤总磷含量呈显著正相关,

与土壤容重呈显著负相关。该结果可为高寒草地鼠害地修复提供理论参考,即在开展高寒草地鼠害地修复过程中可通过合理添加氮肥、磷肥或有机肥以改善草地生产力和物种多样性。然而,草地植物群落高度和总盖度与土壤各因子均无显著相关性。这说明草地植物群落高度和总盖度的降低与高原鼠兔采食、掘土等活动直接相关,受土壤肥力影响较小。

综上,高原鼠兔作为高寒草地重要的生物干扰源,其采食和掘洞活动显著降低了高寒草甸植物群落高度、总盖度和物种多样性。另外,高原鼠兔干扰总体上降低了高寒草甸土壤保水能力及质量,尤其高强度的高原鼠兔干扰加剧了土壤退化程度。由此可知,高原鼠兔对高寒草甸较高的干扰效应会加剧草地退化,实施科学的鼠害管理和草地恢复措施可有效遏制高寒草地持续退化。

参考文献 (References)

- Cai XC, Bao D, Zhou R, Ma YJ, Dong KC, Hua LM. 2022. Comparison of the gastrointestinal tract morphology between plateau pika and plateau zokor. *Acta Agrestia Sinica*, 30(5): 1237–1245 (in Chinese) [蔡新成, 包达尔罕, 周睿, 马义杰, 董克池, 花立民. 2022. 高原鼠兔和高原鼢鼠胃肠组织形态比较研究. 草地学报, 30(5): 1237–1245]
- Chen BX, Zhang XZ, Tao J, Wu JS, Wang JS, Shi PL, Zhang YJ, Yu CQ. 2014. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189: 11–18
- Davidson KE, Fowler MS, Skov MW, Doerr SH, Beaumont N, Griffin JN. 2017. Livestock grazing alters multiple ecosystem properties and services in salt marshes: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 54(5): 1395–1405
- Du JH, Zhang YB, Liu FZ, Chen B, Li JS, Wang W. 2017. Construction of an indicator system and a case study of eco-environmental quality assessment of China's grassland nature reserves. *Pratacultural Science*, 34(11): 2378–2387 (in Chinese) [杜金鸿, 张玉波, 刘方正, 陈冰, 李俊生, 王伟. 2017. 中国草地类自然保护区生态环境质量动态评价指标体系构建与案例. 草业科学, 34(11): 2378–2387]
- Duan YY, Zhang J, Wang LL, Liu CF, Wang YM, Zhou S, Guo ZG. 2022. Effects of plateau pika on the relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine meadow. *Acta Pratacultural Sinica*, 31(11): 25–35 (in Chinese) [段媛媛, 张静, 王玲玲, 刘彩凤, 王乙荣, 周俗, 郭正刚. 2022. 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, 31(11): 25–35]
- Feng F, Gong BC, Niu KC. 2019. Linking density of plateau pika to vegetation characteristics and soil attributes in response to different grazing regimes. *Pratacultural Science*, 36(11): 2915–2925 (in Chinese) [冯峰, 贡保草, 牛克昌. 2019. 不同放牧模式下高原鼠兔密度与高寒植被和土壤的关系. 草业科学, 36(11): 2915–2925]
- Gengyangpi, Zhou S, Yang K, Wang Y, Yang SW, Liu G, Yang TY, Zha D, Wang ZG. 2022. Effects of plateau pika disturbance on plant community and soil physical property of alpine meadow in northwest Sichuan. *Grassland and Turf*, 42(1): 38–48 (in Chinese) [根呷羊批, 周俗, 杨孔, 王钰, 杨思维, 刘刚, 杨廷勇, 扎德, 王泽光. 2022. 高原鼠兔干扰对川西北高寒草甸植物群落及土壤物理性状的影响. 草原与草坪, 42(1): 38–48]
- He QX, Zhang QQ, Chen DW, Tang MK, Wang Y, Han BR, Sun FD, Zhou S. 2024. Preliminary study on ecological-economic threshold of rodent control in Zoige alpine degraded grassland. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 42(1): 159–165 (in Chinese) [何秋霞, 张莽莽, 陈德炜, 唐明坤, 王钰, 韩彬茹, 孙飞达, 周俗. 2024. 若尔盖高寒退化草地高原鼠兔防控生态经济阈值初探. 四川农业大学学报, 42(1): 159–165]
- Herrero-Jáuregui C, Oosterheld M. 2018. Effects of grazing intensity on plant richness and diversity: a meta-analysis. *Oikos*, 127(6): 757–766
- Hou G, Zhan TY, Liu M. 2019. Relationship between plateau pika (*Ochotona curzoniae*) burrow entrance densities and the density of different plant species and soil properties in alpine steppe: a case study of Shenja County. *Pratacultural Science*, 36(4): 1084–1093 (in Chinese) [侯阁, 詹天宇, 刘苗. 2019. 高山草原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*) 洞口密度与植被物种和土壤性质的关系: 以申扎县为例. 草业科学, 36(4): 1084–1093]
- Li M, Zhang XZ, He YT, Niu B, Wu JS. 2020. Assessment of the vulnerability of alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *PeerJ*, 8: e8513
- Liu SQ, Gao LL, Pu YL, Deng LJ, Zhang SR. 2005. Status of soil P and K nutrient and their influencing factors in Tibet. *Journal of Soil Water Conservation*, 19(1): 75–78, 88 (in Chinese) [刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 邓良基, 张世熔. 2005. 西藏土壤磷素和钾素养分状况及其影响因素. 水土保持学报, 19(1): 75–78, 88]
- Pang XP, Guo ZG. 2017. Plateau pika disturbances alter plant productivity and soil nutrients in alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *The Rangeland Journal*, 39(2): 133
- Qi HH, Pang XP, Zhou S, Guo ZG. 2022. Effects of clipping by plateau pika on plant interspecific associations in alpine meadows in the Qinghai Lake Region. *Acta Pratacultural Sinica*, 31(8): 61–71 (in Chinese) [齐昊昊, 庞晓攀, 周俗, 郭正刚. 2022. 高原鼠兔刈割对青海湖流域高寒草甸植物种间关联的影响. 草业学报, 31(8): 61–71]
- Qian JX. 2023. Characteristics of plateau pika cave and their effects on meadow ecosystem multifunctionality. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [钱嘉鑫. 2023. 高原鼠兔洞穴特征及对草甸生态系统多功能性的影响. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Qin Y, Huang B, Zhang W, Yu YH, Yi SH, Sun Y. 2021b. Pikas burrowing activity promotes vegetation species diversity in alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 31: e01806

- Qin Y, Yi SH, Ding YJ, Qin Y, Zhang W, Sun Y, Hou XM, Yu HY, Meng BP, Zhang HF, et al. 2021a. Effects of plateau pikas' foraging and burrowing activities on vegetation biomass and soil organic carbon of alpine grasslands. *Plant and Soil*, 458(1): 201–216
- Song ZH, Li XL, Li JX, Kazhaocairang, Ma GL. 2020. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) trails on enlargement and connection of degraded patches in alpine meadow. *Chinese Journal of Ecology*, 39(10): 3276–3284 (in Chinese) [宋梓涵, 李希来, 李杰霞, 卡着才让, 马戈亮. 2020. 高原鼠兔跑道对高寒草甸退化斑块扩大与连通的影响. *生态学杂志*, 39(10): 3276–3284]
- Wei WD, Liu YH, Ma H. 2018. Meta-analysis for soil organic carbon content of degraded grassland on alpine meadow. *Environmental Science and Management*, 43(10): 53–58 (in Chinese) [魏卫东, 刘育红, 马辉. 2018. 高寒草甸退化草地土壤有机碳含量Meta分析研究. *环境科学与管理*, 43(10): 53–58]
- Wuyunga, Wulantuya, Zhang WQ, Siqinchaoketu, Gaosuriguga, Bao MS. 2023. Analysis of the evolution of the grassland degradation evaluation index system in China based on CiteSpace. *Chinese Journal of Grassland*, 45(5): 125–136 (in Chinese) [乌云嘎, 乌兰图雅, 张卫青, 斯琴朝克图, 高苏日固嘎, 包木苏. 2023. 基于CiteSpace的中国草地退化评价指标体系演进分析. *中国草地学报*, 45(5): 125–136]
- Wyckhuys KAG, Tang FHM, Hadi BAR. 2023. Pest management science often disregards farming system complexities. *Communications Earth & Environment*, 4: 223
- Xu HP, Yu C, Shu CC, Jin SH, Pang XP, Guo ZG. 2019. The effect of plateau pika disturbance on plant community diversity and stability in an alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 28(5): 90–99 (in Chinese) [徐海鹏, 于成, 舒朝成, 金少红, 庞晓攀, 郭正刚. 2019. 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物群落多样性和稳定性的影响. *草业学报*, 28(5): 90–99]
- Yang D, Yue FZ, Li X, Xu ZT, Wang ZP, Cheng TT, Pang XP, Qin SY, Guan ZH, Feng ZH, et al. 2022. Current research status and hot spots of grassland rodent pests based on CiteSpace. *Acta Agrestia Sinica*, 30(3): 670–681 (in Chinese) [杨鼎, 岳方正, 李璇, 徐震霆, 王志鹏, 程通通, 庞晓攀, 秦思源, 关政昊, 冯智慧, 等. 2022. 基于CiteSpace的草地鼠害研究现状及热点分析. *草地学报*, 30(3): 670–681]
- Ye GH, Chu B, Zhou R, Zhang FY, Hua XZ, Hua R, Wang T, Dong KC, Hua LM. 2019. Relationship between plant functional group distribution and soil properties under the disturbance of plateau pika (*Ochotona curzoniae*). *Chinese Journal of Ecology*, 38(8): 2382–2388 (in Chinese) [叶国辉, 楚彬, 周睿, 张飞宇, 华锐泽, 花蕊, 王婷, 董克池, 花立民. 2019. 高原鼠兔干扰下高寒草甸植物功能群分布与土壤因子的关系. *生态学杂志*, 38(8): 2382–2388]
- Zhang W, Yi SH, Chen JJ, Qin Y, Chang L, Sun Y, Shangguan DH. 2021. Characteristics and controlling factors of alpine grassland vegetation patch patterns on the central Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 125: 107570
- Zhang WH, Miao YJ, Zhao YH, Wang XT, Xu YM, Wei XH, Sun L. 2018. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on alpine meadow in Tibet. *Acta Prataculturae Sinica*, 27(1): 115–122 (in Chinese) [张卫红, 苗彦军, 赵玉红, 王向涛, 徐雅梅, 魏学红, 孙磊. 2018. 高原鼠兔对西藏邦杰塘高寒草甸的影响. *草业学报*, 27(1): 115–122]
- Zhao JX, Tian LH, Wei HX, Zhang T, Bai YF, Li RC, Tang YH. 2021. 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*, 458(1): 217–230
- Zhao JY, Jiang CL, Li GR, Gao CY, Wang ZC, Wen LC. 2023. Spatio-temporal coupling relationship between plateau pika disturbance and alpine meadow degradation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 43(5): 212–219 (in Chinese) [赵健赞, 姜传礼, 李国荣, 高崇越, 王志超, 温兰冲. 2023. 高原鼠兔干扰与高寒草甸退化的时空耦合关系. *水土保持通报*, 43(5): 212–219]
- Zhou GY, Zhou XH, He YH, Shao JJ, Hu ZH, Liu RQ, Zhou HM, Hosseinibai S. 2017. Grazing intensity significantly affects below-ground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 23(3): 1167–1179
- Zhou RH, Su TC, Yu J, Xiang L, Chen CL, Zhang HW, Li J, Hao JF. 2022. Species diversity and soil physicochemical properties of different communities in Bifengxia evergreen broad-leaved forest. *Chinese Journal of Ecology*, 41(1): 1–8 (in Chinese) [周润惠, 苏天成, 喻静, 向琳, 陈聪琳, 张瀚文, 李婧, 郝建锋. 2022. 碧峰峡常绿阔叶林不同群落物种多样性和土壤理化性质. *生态学杂志*, 41(1): 1–8]
- Zhou XR, Guo ZG, Guo XH. 2010. The role of plateau pika and plateau zokor in alpine meadow. *Pratacultural Science*, 27(5): 38–44 (in Chinese) [周雪荣, 郭正刚, 郭兴华. 2010. 高原鼠兔和高原鼢鼠在高寒草甸中的作用. *草业科学*, 27(5): 38–44]

(责任编辑:李美娟)