

高原鼠兔和高原鼢鼠干扰下高寒草甸植物群落多样性与土壤生态化学计量的变化



杨丽艳 宋梅玲 王玉琴 王宏生 周睿*

(青海大学畜牧兽医科学院, 青海省畜牧兽医科学院, 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016)

摘要: 为阐明高原鼠兔 *Ochotona curzoniae* 和高原鼢鼠 *Myospalax baileyi* 干扰下高寒草甸植物群落与土壤特性的变化, 在青藏高原高寒草甸区选择不同干扰强度的高原鼠兔单独发生区以及高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区, 调查其植物群落结构, 测定其土壤化学性质, 并运用冗余分析法解析高原鼠兔和高原鼢鼠干扰与植物群落及土壤化学因子的关系。结果表明: 混合发生区中的植物群落盖度和均匀度指数均显著低于高原鼠兔单独发生区, 其余植物群落和土壤指标在 2 个调查区间均无显著差异; 在高原鼠兔单独发生区, 随着干扰强度的增加, 植物群落丰富度指数 (95% 置信限 (confidence interval, CI) 为 0.355~0.853) 显著增加, 而植物高度 (95% CI 为 1.006~1.566) 和土壤有机碳含量 (95% CI 为 7.270~16.270) 显著降低; 在混合发生区, 随着干扰强度的增加, 植物群落高度 (95% CI 为 0.088~1.093)、土壤全氮含量 (95% CI 为 -0.140~0.240) 和土壤铵态氮含量 (95% CI 为 0.146~1.109) 显著升高, 而植物群落丰富度指数 (95% CI 为 0.168~0.858) 显著降低。表明同区域分布的高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对草地植物群落和土壤化学性质的影响高于高原鼠兔单独干扰, 建议在鼠害防控中应重点关注鼠类混合发生区的分布及其为害情况, 并根据为害等级制订相应的防控措施, 以避免草地退化加剧。

关键词: 高原鼠兔; 高原鼢鼠; 植物群落; 物种多样性; 群落结构; 土壤化学计量

Changes of plant community diversity and soil ecological stoichiometry in alpine meadow under the disturbance of plateau pika *Ochotona curzoniae* and plateau zokor *Myospalax baileyi*

Yang Liyan Song Meiling Wang Yuqin Wang Hongsheng Zhou Rui*

(State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary, Academy of Animal Science and Veterinary, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai Province, China)

Abstract: In order to clarify the changes of plant community and soil characteristics in alpine meadow disturbed by plateau pika *Ochotona curzoniae* and plateau zokor *Myospalax baileyi*, the plateau pika and plateau zokor co-existed areas with different interference intensities were selected in the alpine meadow area of the Qinghai-Tibet Plateau. The plant community structure was investigated, the soil chemical properties were determined, and the relationship among plateau pika and plateau zokor interference and plant community and soil chemical factors was analyzed by redundancy analysis. The results showed that the coverage and evenness index of plant communities in the mixed occurrence area were significantly lower than those in the single occurrence area of plateau pika, and there was no sig-

基金项目: 青海省科学技术厅项目(2022-ZJ-964Q), 国家自然科学基金(U21A20186), 青海大学青年科研基金项目(2021-QNY-7), 青海省“高端创新人才计划”(引进拔尖人才), 国家林草局草地啮齿动物危害防控创新团队项目

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

收稿日期: 2024-04-26

nificant difference in other plant communities and soil indexes between the two investigation intervals. With the increase of population density in the plateau pika occurrence area, the plant species richness index (95% confidence interval (CI): 0.355–0.853) increased significantly, while the plant height (95% CI: 1.006–1.566) and soil organic carbon content (95% CI: 7.270–16.270) decreased significantly. With the increase of disturbance intensity in the mixed occurrence area, the community plant height (95% CI: 0.088–1.093), soil total nitrogen content (95% CI: –0.140–0.240) and soil ammonium nitrogen content (95% CI: 0.146–1.109) increased significantly, while the plant community richness (95% CI: 0.168–0.858) decreased significantly. This indicates that the impact of the co-occurrence of plateau pika and plateau zokor on grassland plant communities and soil chemical properties is greater than that of plateau pika alone. It was recommended that attention should be focused on the distribution and damage situation in areas where both species co-exist for controlling small mammal pests. Appropriate control measures should be formulated based on the severity of the damage to prevent further degradation of the grasslands.

Key words: plateau pika; plateau zokor; plant community; species diversity; community structure; soil stoichiometry

青藏高原高寒草甸是我国面积最大、分布最广的草地生态系统,在青藏高原地区水土保持和生态系统平衡及稳定中发挥着重要作用(Harris, 2010)。由于高寒草甸特殊的地理位置和气候环境,生态系统极度脆弱,加之超载过牧和气候变化等因素的影响,草地退化问题十分严重(卫万荣等, 2013)。高寒草甸退化是人为因素和自然因素综合作用的结果,而诸如小型哺乳动物等生物干扰(种群密度过大时)是加速草地退化的重要因素之一,它们通过挖洞和采食等一系列活动对植物群落结构、物种多样性及土壤理化性质造成一定影响(张兴禄和李广, 2015)。当草原鼠类种群密度适宜时能够提高植物群落中禾草等可食牧草的比例,维持高寒草地生态系统中植物群落的稳定(徐海鹏等, 2019)。鼠类对草原的适度干扰可以改善土壤通透性,提高土壤养分含量,增加土壤系统和植被系统的耦合度(贾婷婷, 2016)。当鼠类种群密度过高时则会增加杂类草比例,降低植物群落稳定性和土壤养分含量,进一步加速草地退化(Pang & Guo, 2018)。随着鼠类种群扩张,高寒草甸生产力和覆盖度下降(花立民和柴守权, 2022)、物种丰富度减少、土壤斑块化程度和毒杂草比例增加(Dong et al., 2013),当其种群规模超过一定阈值时,高寒草甸逐渐退化为次生裸地(即黑土滩)。

高原鼠兔 *Ochotona curzoniae* 和高原鼢鼠 *Myospalax baileyi* 是高寒草甸生境中 2 种最主要的小型哺乳动物,也是对草地生态系统和草地畜牧业影响最大的鼠种。由于这 2 种小型哺乳动物对基本生境条件的要求十分相近,因此其自然分布范围经常重叠,这必然对高寒草甸造成更严重的破坏(陈莹莹等, 2022)。但也有研究表明,高寒草甸植物群落中有毒

植物的扩散与高原鼠兔和高原鼢鼠种群密度呈负相关关系(金樑等, 2014),且高原鼠兔对杂类草中蔷薇科、毛茛科和龙胆科植物的采食显著高于禾本科植物(潘多锋, 2019)。杨晓慧(2017)也研究发现高原鼢鼠偏向于采食鹅绒委陵菜 *Potentilla anserina*、珠芽蓼 *Bistorta vivipara* 和甘肃棘豆 *Oxytropis kansuensis* 等轴根和块根类植物。由此推测这 2 种小型哺乳动物可以通过采食毒杂草使其在植物群落中的比例降低,有效改善草地质量。高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对高寒草甸影响的有害论亦或有益论,多局限于高原鼠兔或高原鼢鼠短期内的食谱组成、食量以及不同食物在食谱中的比例等方面,很容易误判其实际危害。因此,从高原鼠兔和高原鼢鼠栖息地植物群落和土壤性质等方面研究其对草地的影响,才能客观准确地认识同区域分布的 2 种小型哺乳动物的实际危害。

目前,对高原鼠兔和高原鼢鼠的研究都集中在单一鼠种的食性、繁殖、家群结构和数量及其对草地的危害等方面(花立民和蔡新成, 2021)。而关于同区域分布的高原鼢鼠和高原鼠兔与高寒草甸植物群落及土壤之间关系的研究较少。本研究设置高原鼠兔单独发生区以及高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区 2 个研究区,比较两者间植物群落和土壤化学特性的变化趋势及差异,解析同区域分布的高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对高寒草甸退化的影响,以期为高寒草甸鼠害的科学防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试样地:本研究选择位于青海省果洛藏族自

治州玛多县花石峡镇的高寒草甸作为试验区(35°06'03" N, 98°47'39" E, 海拔4 277 m)。该地区的气候属于大陆性季风气候, 主要受东南季风和西伯利亚高压的影响, 冬季漫长而寒冷, 夏季短暂而凉爽。研究区面积约10 hm², 植物组成以西藏嵩草 *Carex tibetikobresia*、细叶亚菊 *Ajania tenuifolia*、唐古特虎耳草 *Saxifraga tangutica*、线叶嵩草 *Carex capillifolia*、异针茅 *Stipa aliena*、蒲公英 *Taraxacum mongolicum* 和乳白香青 *Anaphalis lactea* 等为主。研究区放牧形式为冬季放牧, 放牧强度一致(7.91羊/hm²)。研究区的主要植食性小型哺乳动物为高原鼠兔和高原鼯鼠, 研究区西南部为高原鼠兔单独发生区, 平均有效洞口数为675.17个/hm², 该区域面积约为3 hm²; 研究区中部为高原鼠兔和高原鼯鼠混合发生区, 其中高原鼠兔平均有效洞口数为542.74个/hm², 高原鼯鼠新鼠丘数为33.32个/hm², 该区域面积约为4 hm²。

试剂和仪器: 本研究所用试剂均为国产分析纯。Clever Chem Anna全自动间断化学分析仪, 德国DeChem-Tech公司; TLG-9640A型立式鼓风干燥箱, 上海喆图科学仪器有限公司; Multiskan SkyHigh全波长酶标仪, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样地设置和样品采集

于2022年8月在研究区进行野外调查和取样。由于高原鼠兔和高原鼯鼠有很强的栖息地选择性, 难以找到地形、植被和土壤, 特别是高原鼠兔鼠洞(或新旧鼠丘)空间分布和数量一致的试验样地。因此, 本研究参考梯度代替重复小区方法进行样地选择(杨子翰等, 2020)。在研究区内根据高原鼠兔和高原鼯鼠为害特征, 在单独发生区根据高原鼠兔鼠洞分布和草地盖度等指标, 随机选取9个处于不同为害程度的高原鼠兔调查样地, 应包括高原鼠兔最严重为害区域和轻度为害区域, 以高原鼠兔的巢域范围(Pang et al., 2020)为依据, 将样地大小设为35 m×35 m, 每个样地之间的距离间隔至少100 m; 同时在高原鼠兔和高原鼯鼠混合发生区也采用相同方法随机选择9个35 m×35 m的调查样地。在每个调查样地内, 使用对角线取样法设置3个0.5 m×0.5 m的植物群落调查样方, 通过针刺法测定样方中每个物种的盖度, 并测量5株或全部(当样方内少于5株时)该物种植株的高度; 测定频度时采用0.1 m²的取样圆, 在样地中沿随机的方向抛出30次, 登记和编制每个取样圆中的植物, 并计算每个植物物种在该群落中出现的百分数; 然后将地上植物组织齐地面刈割并分别装入信封袋中, 在105 °C烘箱中杀青30 min, 随

后在65 °C烘干48 h, 称量植物地上生物量。并在每个样方中使用直径为3.5 cm的土钻采集0~20 cm深度的土样, 去除杂质后, 将每个样方的3个重复土样混合均匀, 装入样品袋中用于土壤化学性质的测定。采取堵洞开洞法调查每个35 m×35 m样地中的高原鼠兔总洞口数和有效洞口数, 根据辛小娟等(2011)标准判定鼠丘类型, 即调查第1天将选定的调查样地内所有鼠洞口封堵, 24 h后(即经过1个鼠活动高峰期)再计数其中被鼠盗开的洞口数, 被盗开的洞口为有效洞口数; 并统计样地内高原鼯鼠新、旧鼠丘数量, 计算两者的密度。高原鼠兔相对种群密度=有效洞口数/总洞口数×100%; 高原鼯鼠土丘密度=新鼠丘数/样地面积×100%。

1.2.2 研究区植物群落指标的计算

高寒退化草地植物群落多样性指数包括Shannon-Wiener多样性指数 H' 、丰富度指数 d 、Pielou均匀度指数 J 和Simpson优势度指数 D , 计算公式分别为

$$H' = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i), d = (S - 1) / \ln N, J = \frac{H'}{\ln S}, D = 1 -$$

$\sum_{i=1}^S P_i^2$, 式中 S 为物种数, P_i 为第 i 个种的重要值(胡靖等, 2021), N 为群落中物种的个体数。重要值=(相对盖度+相对高度+相对频度)/3, 其中, 相对盖度=某个种的盖度/样方中所有种盖度之和×100%, 相对高度=某个种的高度/样方中所有种高度之和×100%, 相对频度=某个种的频度/样方中所有种的频度之和×100%。

1.2.3 研究区土壤化学性质的测定

将1.2.1采集的土样在室温下自然风干, 去除其中的根系、植物凋落物和石头等杂质后, 过孔径为1 mm的筛后供试。使用重铬酸钾-硫酸氧化法测定土壤有机碳含量, 土壤的全氮、硝态氮和铵态氮含量通过Clever Chem Anna全自动间断化学分析仪进行测定, 土壤速效磷含量则采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法进行测定, 土壤全磷含量采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法进行测定(林先贵, 2010)。依据测定到的有机碳、全氮和全磷含量, 进一步计算土壤的碳氮比、氮磷比和碳磷比。

1.2.4 干扰强度与植物群落和土壤因子的回归分析

将1.2.1所得高原鼠兔相对种群密度(或高原鼯鼠土丘密度)作为固定因子, 以植物群落指标(高度、盖度、地上生物量、多样性指数、丰富度指数、均匀度指数、优势度指数)和土壤化学性质指标(全磷含量、全氮含量、速效磷含量、铵态氮含量、硝态氮含量、有机碳含量、碳氮比、氮磷比、碳磷比)作为响应变量, 采用LOESS回归分析拟合高原鼠兔和高原鼯鼠不

同干扰强度与植物群落和土壤化学因子的回归关系。由于LOESS回归是一种非参数回归分析,无法提供传统参数统计模型中的显著性检验指标,因此采用Bootstrap法对数据进行多次重抽样得到统计量(斜率)的分布,并估计其95%置信区间,若置信区间不包含0,则判定回归模型的斜率显著不为零,即有显著的升高或降低趋势(Chernick, 2008)。

1.2.5 植物和土壤因子对2种动物干扰响应的冗余分析

采用R 4.3.2软件(<http://www.r-project.org/>)中vegan包的rda函数进行冗余分析,定量判别植物群落指标与土壤化学计量指标对高原鼠兔和高原鼢鼠干扰的响应。冗余分析之前需对植物群落指标和土壤化学计量指标进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),若DCA排序轴梯度长度小于3,则适用基于线性模型的冗余分析,若大于3则适用基于单峰模型的冗余分析。同时,在进行冗余分析之前需对所有环境变量数据进行归一化处理,需符合标准正态分布。冗余分析中对植物群落指标和土壤化学计量指标的显著性采用R 4.3.2软件中的anova函数进行蒙特卡罗置换检验,设置999次置换测试,最终仅保留显著变量。为解决植物群落指标和土壤化学计量指标各因子之间的多重共线性问题,将方差膨胀因子大于10的环境变量剔

除,然后使用后向剔除变量方法筛选出最重要的显著变量。随后分别使用R 4.3.2软件中rdacca.hp包的rdacca.hp函数和vegan包的varpart函数对最重要的显著变量进行层次分区和方差分解分析,计算每组解释变量的校正 R^2 和残差,分析解释变量的共同效应和单独效应,并检验每个变量单独效应的显著性,以阐明每个变量的相对重要性(Lai et al., 2022)。

1.3 数据分析

本研究采用SPSS 26和Microsoft Excel 2019软件进行数据分析和整理,对高原鼠兔单独发生区以及高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区植物群落指标和土壤化学计量指标进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 研究区高原鼠兔和高原鼢鼠的干扰强度

在高原鼠兔单独发生区的9个研究样地中,高原鼠兔相对种群密度最低为21.74%,最高为42.35%;在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区的9个研究样地中,高原鼠兔相对种群密度最低为17.26%,最高为39.88%,高原鼢鼠土丘密度最低为24.49%,最高为163.27%(表1)。最终依据高原鼠兔相对种群密度和高原鼢鼠土丘密度将2个研究区的样地按照干扰强度从低到高编号为P1~P9和PZ1~PZ9。

表1 研究区高原鼠兔和高原鼢鼠种群的调查结果

Table 1 Survey results of the population of plateau pika and plateau zokor in the study area

指标 Index	高原鼠兔单独发生区 Occurrence area of plateau pika								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
有效洞口数/(个/0.122 5 hm ²) No. of effective holes/(holes/0.122 5 hm ²)	45	71	89	147	160	171	169	187	198
总洞口数/(个/0.122 5 hm ²) Total no. of holes/(holes/0.122 5 hm ²)	207	324	388	483	519	547	426	460	467
高原鼠兔相对种群密度 Relative population density of plateau pika/%	21.74	21.91	22.95	30.41	30.85	31.28	39.70	40.69	42.35
指标 Index	高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区 Plateau pika and plateau zokor co-existed area								
	PZ1	PZ2	PZ3	PZ4	PZ5	PZ6	PZ7	PZ8	PZ9
新鼠丘数(旧鼠丘数)/(个/0.122 5 hm ²) No. of new mounds (no. of old mounds)/ (mounds/0.122 5 hm ²)	3(9)	5(7)	6(11)	11(18)	9(15)	13(21)	15(26)	17(20)	20(29)
有效洞口数(总洞口数)/(个/0.122 5 hm ²) No. of effective holes (total no. of holes)/ (holes/0.122 5 hm ²)	31(180)	47(267)	59(331)	81(355)	131(454)	149(455)	173(496)	192(501)	213(534)
高原鼠兔相对种群密度 Relative population density of plateau pika/%	17.26	17.59	17.85	22.84	28.85	32.75	34.85	38.43	39.88
高原鼢鼠土丘密度 Plateau zokor mound density/%	24.49	40.82	48.98	89.80	73.47	106.12	122.45	138.78	163.27

P1~P9为高原鼠兔不同干扰强度区域, PZ1~PZ9为高原鼠兔和高原鼢鼠不同干扰强度混生区域,数字越高代表干扰强度越高。P1~P9 indicate the interference intensity areas of plateau pika, and PZ1~PZ9 indicate the interference intensity of plateau pika and plateau zokor co-existed area, the higher the number, the higher the interference intensity.

2.2 高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对植物群落结构的影响

对2个研究区所有样方的植物群落中排名前5位的优势种进行分析,在高原鼠兔单独发生区,随着干扰强度的增加,植物群落优势种从针茅 *Stipa capillata* 和双叉细柄茅 *Ptilagrostis dichotoma* 等禾本科

植物转变为细叶亚菊和黄花棘豆等植物;在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,随着干扰强度的增加,植物群落优势种从矮生嵩草 *Carex alatauensis* 和西藏嵩草等莎草科植物转变为唐古特虎耳草和黄花棘豆等植物(表2)。

表2 研究区植物群落中排名前5位的优势种及其重要值

Table 2 Top five dominant species and their important values in plant communities in the study area

植物物种 Species	高原鼠兔发生区 Occurrence area of plateau pika								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	0.072			0.049		0.075		0.076	
针茅 <i>Stipa capillata</i>		0.122	0.086		0.104				
藏异燕麦 <i>Helictotrichon tibeticum</i>					0.063				
双叉细柄茅 <i>Ptilagrostis dichotoma</i>	0.102		0.088						
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>		0.055							
矮生嵩草 <i>Carex alatauensis</i>	0.079			0.107		0.089	0.085		
线叶嵩草 <i>Carex capillifolia</i>		0.222	0.293					0.077	0.065
西藏嵩草 <i>Carex tibetikobresia</i>		0.055		0.110		0.103			
青藏嵩草 <i>Carex moorcroftii</i>									0.063
洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	0.076								0.062
黑褐嵩草 <i>Carex atrofusca</i>	0.085	0.095	0.113						
细叶亚菊 <i>Ajania tenuifolia</i>				0.064	0.105	0.075	0.096	0.122	
黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>				0.051	0.099		0.088	0.144	0.090
珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>			0.046				0.069		
矮丛风毛菊 <i>Saussurea eopygmaea</i>							0.064	0.072	
短穗兔耳草 <i>Lagotis brachystachya</i>					0.087	0.091			
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>									0.097

植物物种 Species	高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区 Plateau pika and plateau zokor co-existed area								
	PZ1	PZ2	PZ3	PZ4	PZ5	PZ6	PZ7	PZ8	PZ9
草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	0.050		0.052		0.066	0.069	0.079		0.080
针茅 <i>Stipa capillata</i>						0.067			0.088
矮生嵩草 <i>Carex alatauensis</i>	0.084		0.079	0.092	0.098		0.068	0.112	
洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	0.049			0.064				0.071	
西藏嵩草 <i>Carex tibetikobresia</i>		0.073							
黑褐嵩草 <i>Carex atrofusca</i>		0.068							
唐古特虎耳草 <i>Saxifraga tangutica</i>	0.093		0.127	0.147		0.161	0.095		
黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>	0.069			0.114	0.101	0.062	0.083	0.072	0.109
乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i>				0.071					0.127
长果婆婆纳 <i>Veronica ciliata</i>					0.141				
细叶亚菊 <i>Ajania tenuifolia</i>			0.052		0.062	0.073		0.073	0.076
短穗兔耳草 <i>Lagotis brachystachya</i>		0.096							
矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>		0.057							
珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>		0.055	0.048						
块根紫菀 <i>Aster asteroides</i>							0.096	0.072	

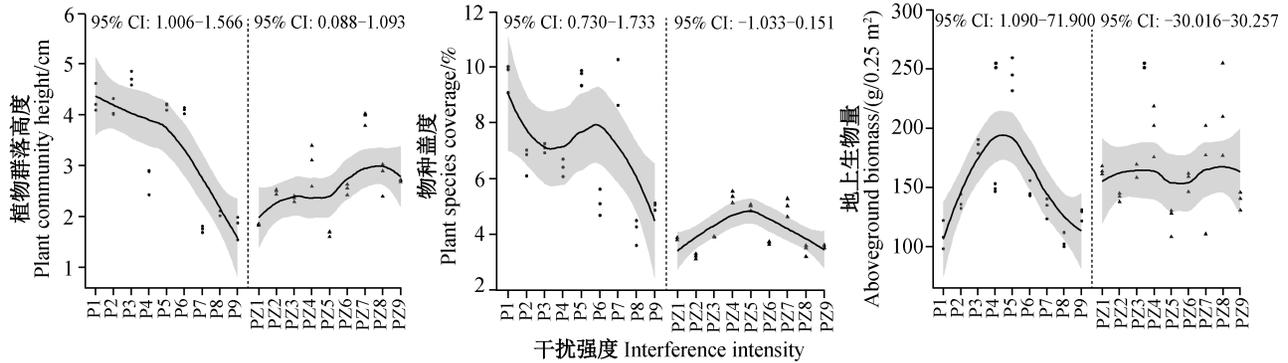
P1~P9为高原鼠兔不同干扰强度区域, PZ1~PZ9为高原鼠兔和高原鼢鼠不同干扰强度混生区域,数字越高代表干扰强度越高。P1~P9 indicate the interference intensity areas of plateau pika, and PZ1~PZ9 indicate the interference intensity of plateau pika and plateau zokor co-existed area, the higher the number, the higher the interference intensity.

LOESS回归分析结果表明,在高原鼠兔单独发生区,随着干扰强度的增加,植物群落高度(95%置

信限(confidence interval, CI)为1.006~1.566)和盖度(95% CI为0.730~1.733)均呈显著降低趋势,而地上

生物量呈显著先升高后降低趋势(95% CI为1.090~71.900);在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,随着干扰强度的增加,植物群落高度(95% CI为0.088~1.093)呈显著升高趋势,植物盖度(95% CI为-1.033~0.151)和地上生物量(95% CI为-30.016~30.257)的

变化趋势不显著(图1)。总体上,混合发生区物种盖度极显著低于单独发生区($F_{1,52}=45.41, P<0.001$),而植物群落高度和地上生物量在2个研究区间无显著差异(植物群落高度: $F_{1,52}=1.876, P>0.05$;地上生物量: $F_{1,52}=2.813, P>0.05$)。



P1~P9为高原鼠兔不同干扰强度区域, PZ1~PZ9为高原鼠兔和高原鼢鼠不同干扰强度混生区域, 数字越高代表干扰强度越高。CI: 置信限。P1~P9 indicate the interference intensity areas of plateau pika, and PZ1~PZ9 indicate the interference intensity of plateau pika and plateau zokor co-existed area, the higher the number, the higher the interference intensity. CI: Confidence interval.

图1 高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对植物群落结构的影响

Fig. 1 Effects of plateau pika and plateau zokor disturbance on plant community structure

2.3 高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对植物群落多样性的影响

LOESS回归分析结果表明,在高原鼠兔单独发生区,随着干扰强度的增加,植物群落的多样性指数(95% CI为0.034~0.088)、优势度指数(95% CI为0.007~0.018)和丰富度指数(95% CI为0.355~0.853)均呈显著增加趋势,均匀度指数(95% CI为-0.108~0.017)的降低趋势不显著;而在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,植物群落的多样性指数(95% CI为0.046~0.182)和丰富度指数(95% CI为0.168~0.858)均呈显著降低趋势,其余2个多样性指标变化趋势不显著(图2)。总体上,混合发生区植物群落的均匀度指数极显著低于单独发生区($F_{1,52}=27.68, P<0.001$),而其余3个多样性指标在2个研究区间均无显著差异(多样性指数: $F_{1,52}=1.990, P>0.05$;优势度指数: $F_{1,52}=3.212, P>0.05$;丰富度指数: $F_{1,52}=2.532, P>0.05$)。

2.4 高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对土壤化学性质的影响

LOESS回归分析结果表明,在高原鼠兔单独发生区,随着干扰强度的增加,土壤的全氮含量(95% CI为0.353~0.926)、铵态氮含量(95% CI为0.061~0.903)、硝态氮含量(95% CI为0.424~4.317)、速效磷含量(95% CI为0.014~1.157)和有机碳含量(95% CI为7.270~16.270)均呈显著下降趋势,土壤全磷含量(95% CI为0.030~0.085)呈显著增加趋势;而在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,随着干扰强度的增

加,土壤的铵态氮含量(95% CI为0.146~1.109)和速效磷含量(95% CI为0.135~0.232)均呈显著上升趋势,而硝态氮含量(95% CI为3.431~5.566)则呈显著下降趋势,全氮含量、全磷含量和有机碳含量的变化趋势不显著(图3)。总体上,6个土壤化学指标在2个研究区间均无显著差异(全氮含量: $F_{1,52}=3.147, P>0.05$;全磷含量: $F_{1,52}=0.103, P>0.05$;铵态氮含量: $F_{1,52}=3.225, P>0.05$;硝态氮含量: $F_{1,52}=0.467, P>0.05$;速效磷含量: $F_{1,52}=0.719, P>0.05$;有机碳含量: $F_{1,52}=0.011, P>0.05$)。

2.5 高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对碳、氮、磷计量比的影响

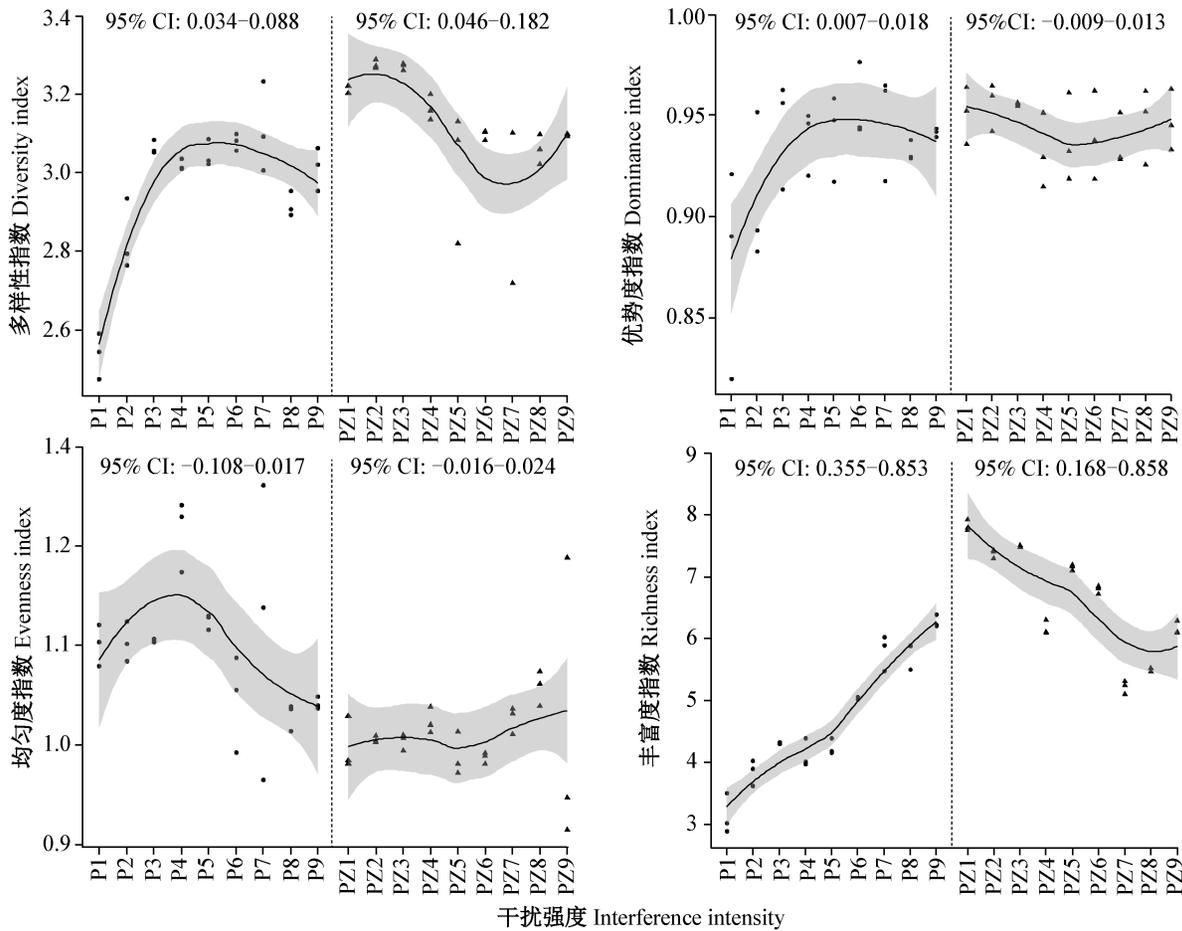
LOESS回归分析结果表明,随着干扰强度的增加,高原鼠兔单独发生区土壤的碳氮比(95% CI为0.474~2.331)呈显著先降低后升高的趋势,氮磷比(95% CI为1.507~1.998)和碳磷比(95% CI为30.010~35.350)均呈显著下降趋势,而高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区土壤的碳氮比、氮磷比和碳磷比的变化趋势均不显著(图4)。总体上,土壤碳、氮、磷计量比在2个研究区间均无显著差异(碳氮比: $F_{1,52}=0.120, P>0.05$;氮磷比: $F_{1,52}=0.003, P>0.05$;碳磷比: $F_{1,52}=0.654, P>0.05$)。

2.6 害鼠干扰强度与植物和土壤因子的关系

DCA结果表明,高原鼠兔单独发生区和混合发生区的DCA图第1排序轴的梯度长度分别为1.91和1.37,均小于3,因此本研究适用基于线性模型的

冗余分析。冗余分析结果显示,在高原鼠兔单独发生区,与第1轴显著相关的指标是土壤速效磷含量,这说明第1轴代表土壤化学因子,随着高原鼠兔种群密度的增加,土壤速效磷等化学计量指标均呈降低的趋势;而第2轴与植物群落地上生物量和均匀度指数显著相关,这说明第2轴代表植物多样性因子,随着高原鼠兔种群密度的增加,丰富度指数呈增加趋势,而地上生物量和均匀度指数呈降低的趋势

(图5-A)。在高原鼠兔和高原鼯鼠混合发生区,随着高原鼠兔干扰强度的增加,植物群落均匀度指数和土壤铵态氮含量呈增加的趋势,而植物丰富度指数和土壤碳氮比呈降低的趋势;随着高原鼯鼠干扰强度的增加,植物群落均匀度指数、土壤全氮含量和土壤铵态氮含量呈降低的趋势,而植物高度、丰富度指数和土壤碳氮比均呈增加的趋势(图5-B)。



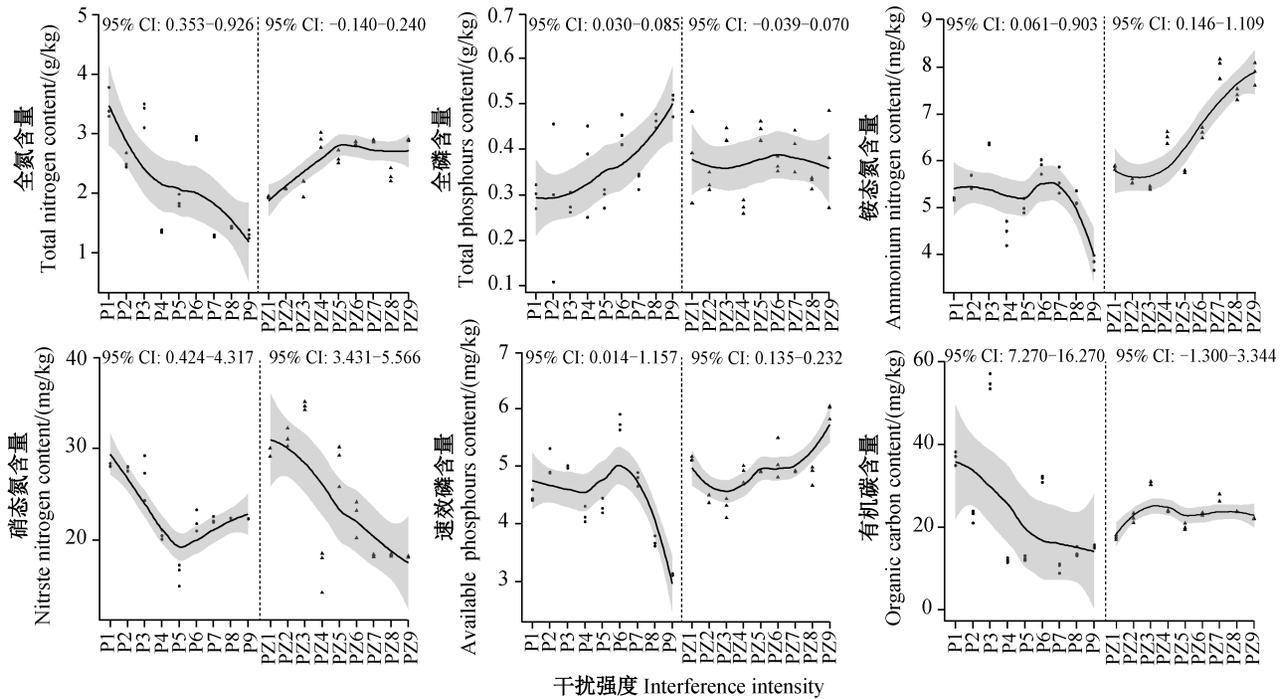
P1~P9为高原鼠兔不同干扰强度区域, PZ1~PZ9为高原鼠兔和高原鼯鼠不同干扰强度混生区域, 数字越高代表干扰强度越高。CI: 置信限。P1-P9 indicate the interference intensity areas of plateau pika, and PZ1-PZ9 indicate the interference intensity of plateau pika and plateau zokor co-existed area, the higher the number, the higher the interference intensity. CI: Confidence interval.

图2 高原鼠兔和高原鼯鼠干扰对植物群落多样性的影响

Fig. 2 Effects of plateau pika and plateau zokor disturbance on plant community diversity

对植物群落因子和土壤化学计量因子进行方差分解,结果表明,在高原鼠兔单独发生区,植物群落因子和土壤化学计量因子对物种-环境关系信息的共同效应为91.3%,其中植物群落因子的单独效应为70.3%,土壤化学计量因子的单独效应为20.7%(图6-A)。在高原鼠兔和高原鼯鼠混合发生区,植物群落因子和土壤化学计量因子对物种-环境关系信息的共同效应为97.4%,其中植物群落因子的单

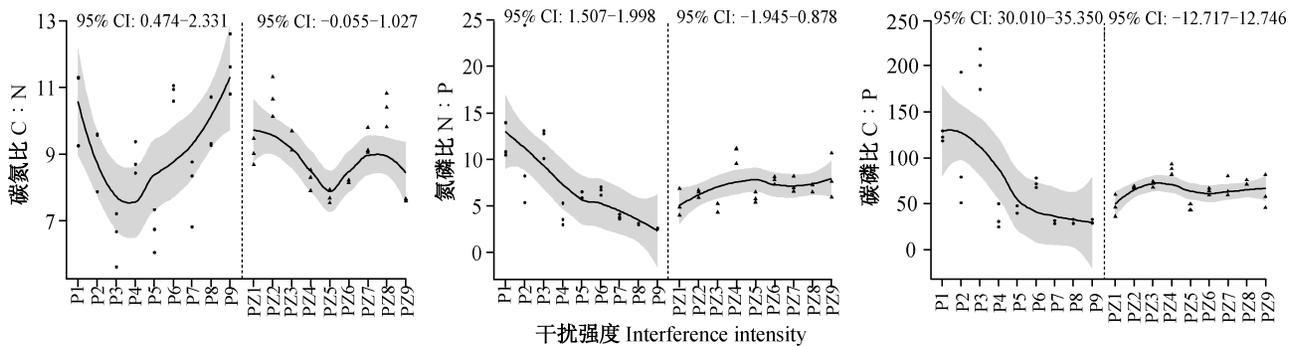
独效应为74.2%,土壤化学计量因子的单独效应为14.4%(图6-B)。蒙特卡罗置换检验结果表明,在高原鼠兔单独发生区,随着干扰强度的增加,植物群落丰富度指数、植物高度和土壤有机碳含量的响应显著;而在高原鼠兔和高原鼯鼠混合发生区,随着干扰强度的增加,植物群落丰富度指数、植物高度、土壤全氮含量和土壤铵态氮含量的响应显著。



P1~P9为高原鼠兔不同干扰强度区域, PZ1~PZ9为高原鼠兔和高原鼢鼠不同干扰强度混生区域, 数字越高代表干扰强度越高。CI: 置信限。P1~P9 indicate the interference intensity areas of plateau pika, and PZ1~PZ9 indicate the interference intensity of plateau pika and plateau zokor co-existed area, the higher the number, the higher the interference intensity. CI: Confidence interval.

图3 高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对土壤化学计量的影响

Fig. 3 Effects of disturbance by plateau pika and plateau zokor on soil stoichiometry



P1~P9为高原鼠兔不同干扰强度区域, PZ1~PZ9为高原鼠兔和高原鼢鼠不同干扰强度混生区域, 数字越高代表干扰强度越高。CI: 置信限。P1~P9 indicate the interference intensity areas of plateau pika, and PZ1~PZ9 indicate the interference intensity of plateau pika and plateau zokor co-existed area, the higher the number, the higher the interference intensity. CI: Confidence interval.

图4 高原鼠兔和高原鼢鼠干扰对土壤碳、氮、磷计量比的影响

Fig. 4 Effects of interference from plateau pika and plateau zokor on soil C, N, and P stoichiometric ratios

3 讨论

高原鼠兔和高原鼢鼠是高寒草甸生态系统中重要的小型草食动物,它们不仅通过采食直接影响植物的生长发育,还通过挖掘、排泄粪尿以及过剩食物碎屑堆积等方式增加微生境的异质性,从而间接影响植物的生长(张佳钰等,2023)。本研究选择不同干扰强度的高原鼠兔单独发生区及高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区进行植物群落结构的调查,并计算

植物群落多样性指标,发现随着鼠类干扰强度的增加,植物高度、盖度和均匀度指数均呈显著下降趋势,这主要是由于高原鼠兔偏好视野开阔的生境,进而刈割禾本科等植物,导致植物的高度、盖度以及均匀度指数降低(边疆晖等,1999)。本研究结果还显示,随着高原鼠兔干扰强度的增加,植物地上生物量呈显著先升高后降低的趋势,植物群落多样性指数、优势度指数和丰富度指数也显著上升,说明适度的干扰可以增加植物地上生物量,而当干扰强度超过

一定阈值后就会使地上生物量减少,推测由于高原鼠兔的挖掘活动改变了原有栖息地环境的异质性,形成的微生境斑块将有利于高寒草甸植物多样性、优势度和丰富度的增加(Zhang et al., 2016)。在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,随着干扰强度的增加,植物群落多样性指数和丰富度指数显著下降,这主要是由于在2种鼠类的双重作用下鼠丘斑块比例不断增加,导致大面积的优质牧草被覆盖而死亡,也为其他双子叶植物的入侵提供了有利条件(杨振宇和江小蕾, 2002),最终导致植物群落多样性指数和丰富度指数显著下降。宗文杰等(2006)研究也发现,当高原鼢鼠鼠丘面积占草地面积的比例超过40%时,杂类草开始在群落中占据优势地位,然而杂类草入侵并没有增加草甸植物群落的物种多样性,反而降低了群落的物种多样性。这也说明在高原鼠

兔和高原鼢鼠双重干扰下,虽然会在一定程度上增加了植物高度和均匀度指数,但双子叶植物所占比例逐渐增高,降低了植物群落的多样性。本研究还发现高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生对植物盖度和均匀度指数的影响程度显著高于高原鼠兔单独发生,高原鼢鼠采食植物的地下根茎,或把整株植物拖入洞道中,导致部分植物的根系损伤严重甚至直接死亡(王权业等, 1989)。而高原鼠兔通过掘洞和刈割等行为使得植株地上部分因生理缺水 and 养分吸收困难而枯萎或者直接死亡,最终导致群落的盖度和均匀度指数显著降低(齐昊昊等, 2022)。因此,这2种小型哺乳动物的双重干扰会通过降低植物群落盖度和均匀度指数来影响高寒草甸植物群落的生态和生产功能。

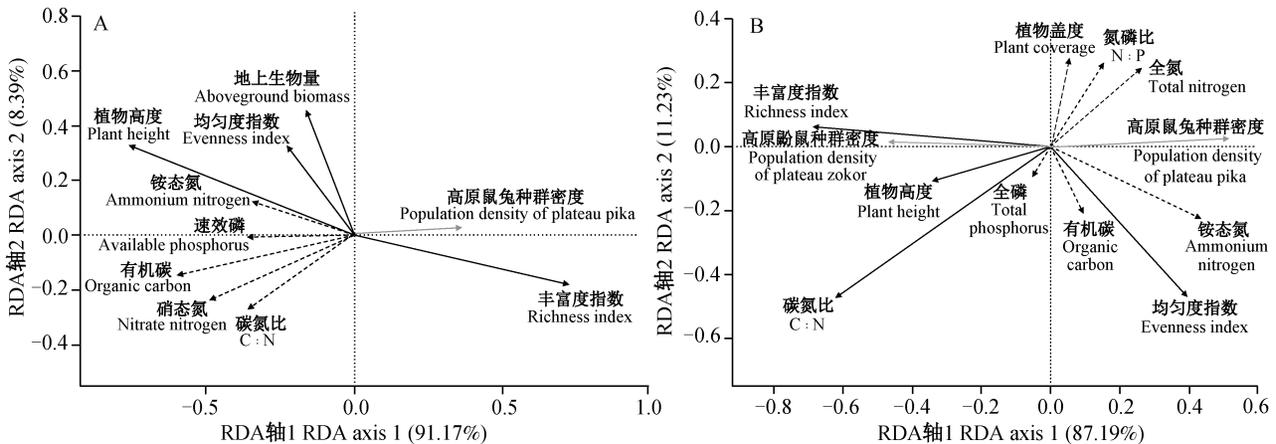


图5 高原鼠兔单独发生区(A)及其与高原鼢鼠混合发生区(B)鼠类种群与植物群落因子(黑色实线)和土壤化学因子(黑色虚线)的冗余排序图

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) sorting plots of plateau pika in the exclusive habitat (A) and mixed habitat (B) with respect to plant community diversity factors (solid black line) and soil stoichiometric factors (dashed black line)

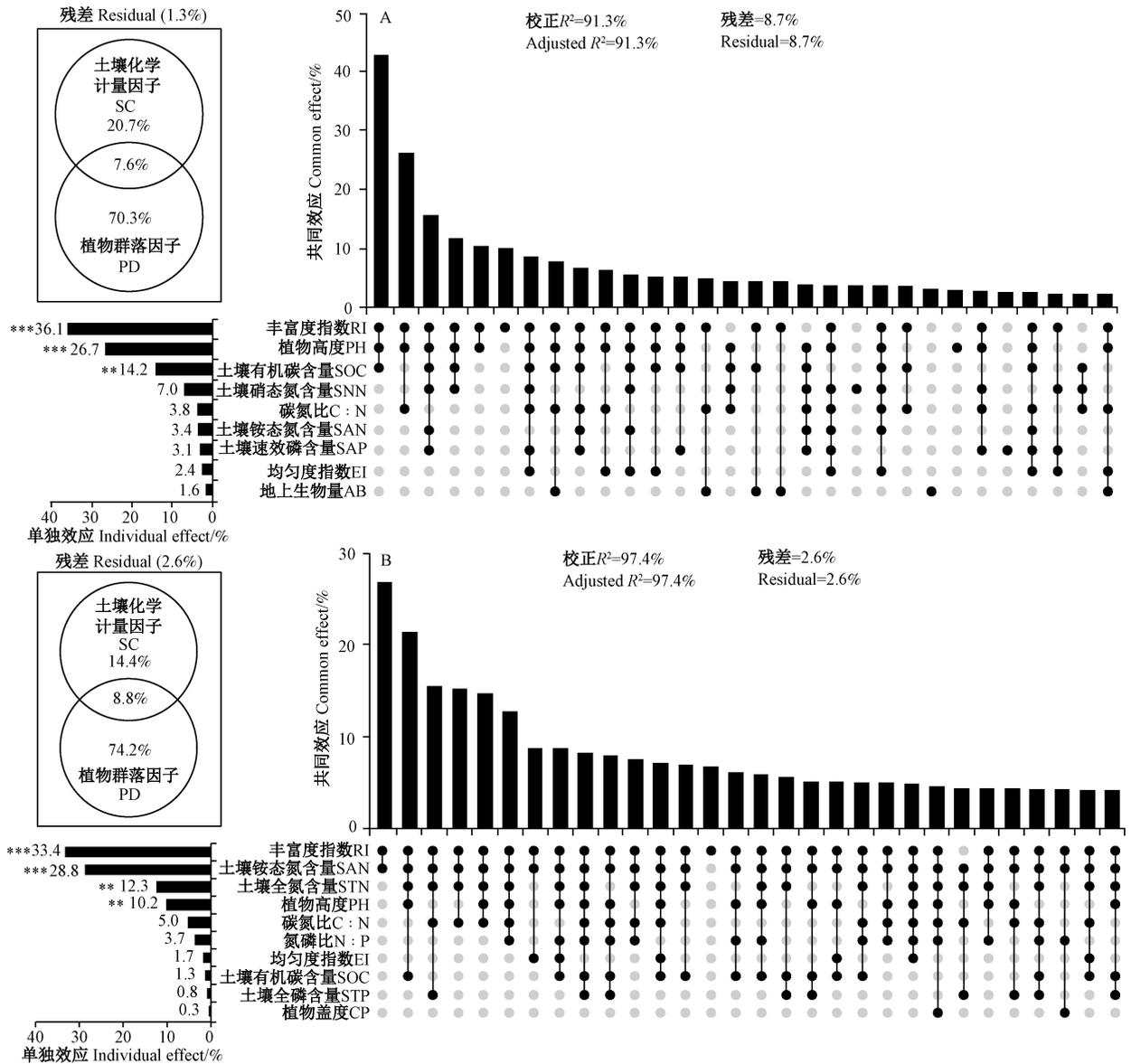
鼠害的发生不仅会降低草地植物群落生产力,还会对土壤养分造成不同程度的影响。高原鼠兔和高原鼢鼠适度的挖掘活动将较深层的土壤转移至表面,改良了土壤物理结构和土壤透水透气性能,有利于土壤的养分循环(罗斌, 2023)。本研究结果显示,随着高原鼠兔干扰强度的增加,土壤全氮、硝态氮、铵态氮、速效磷和有机碳的含量显著降低。推测当高原鼠兔的干扰强度超过阈值时,其挖掘活动产生的裸斑面积增大,土壤的温度和通气性增强,水分蒸发量增加,导致土壤有机碳含量和全氮含量降低,并且随着高原鼠兔干扰强度的增加,土壤微生物活性逐渐增强,进而加速了有机质的分解,增强了土壤的矿化作用,使土壤中的硝态氮、铵态氮和速效磷流失。Yu et al. (2017)在对高寒草甸不同种群密度高

原鼠兔栖息地土壤养分的研究中也发现,随着高原鼠兔种群密度的增加,土壤全氮和有机碳的含量逐渐降低。而土壤全磷含量随着高原鼠兔干扰的加剧显著增加,这可能是由于高寒草甸土壤中的磷主要来自成土母质,土壤中的全磷则包括有机磷和无机磷,有机磷含量与土壤有机质含量呈正相关,高原鼠兔干扰增加了土壤有机质的输入量,因此土壤全磷含量增加(刘彩凤等, 2023)。

土壤是高寒草甸植物繁殖和扩张的基床,而土壤养分是草地植物生长发育的基础,也是维持植物群落生产力和稳定性的保障(Brady & Weil, 2010)。植物和土壤养分含量往往容易受到生物干扰而发生改变,甚至在短时间内重新配置(Guo et al., 2012)。本研究的冗余分析结果表明,高原鼠兔单独发生区

植物群落丰富度指数、植物高度和土壤有机碳含量对高原鼠兔干扰的响应达到极显著水平。高原鼠兔喜食禾本科和豆科植物,而禾本科和豆科植物均有固氮作用,随着高原鼠兔干扰加剧,土壤全氮含量会显著降低(Galiano et al., 2014)。而在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,植物群落丰富度指数、植物高度、土壤全氮含量及土壤铵态氮含量对高原鼠兔和高原鼢鼠干扰的响应达显著水平,其中高原鼠兔干扰强度与植物群落多样性指数和优势度指数存在显

著正相关关系,而与均匀度指数和土壤铵态氮含量呈显著负相关关系,表明高原鼠兔干扰强度不断增加时,由于其对土壤的适度疏松作用,使得一些低矮的阔叶类杂类草迅速侵入,从而增加了高寒草甸物种多样性指数和优势度指数,而当高原鼠兔种群数量突破一定限度时,对高寒草甸生态系统植被群落和土壤的过度干扰使地表裸露面积增加,地表径流对土壤的侵蚀程度加剧,同时伴随着土壤铵态氮的流失,最终导致高寒草甸进一步退化(叶国辉, 2023)。



SC: Soil stoichiometric factor; PD: plant community factor; RI: richness index; PH: plant height; SOC: soil organic carbon content; SNN: soil nitrate nitrogen content; SAN: soil ammonium nitrogen content; SAP: soil available phosphorus content; EI: evenness index; AB: aboveground biomass; STN: soil total nitrogen content; STP: soil total phosphorus content; CP: plant coverage.

图 6 植物群落因子和土壤化学计量因子对高原鼠兔单独发生区(A)及其和高原鼢鼠混合发生区(B)种群影响的相对重要性
Fig. 6 Relative importance of plant community factors and soil stoichiometric factors on the population of plateau pika in the habitat (A) and sympatric habitat (B)

和*分别表示经方差分解分析各因子的单独效应显著(P<0.01和P<0.001)。** or *** indicates significant individual effects of each factor in the variance decomposition analysis (P<0.01 or P<0.001).

在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,干扰强度与土壤铵态氮含量呈显著正相关,一方面是由于鼠丘斑块表层土壤受雨水侵蚀和家畜践踏重新分布在鼠丘周围的草地,从而增加了周围草地土壤铵态氮含量(Su et al., 2020);另一方面是由于高原鼢鼠干扰改善了土壤质地,促进土壤微生物分解代谢活动,加速养分周转,进而增加了鼠丘间草地土壤速效养分含量,导致土壤铵态氮含量增加(Niu et al., 2020)。本研究对植物群落因子和土壤化学因子进行方差分解,发现无论是在高原鼠兔单独发生区还是在高原鼠兔和高原鼢鼠混合发生区,植物群落因子的单独效应均大于土壤化学计量因子的单独效应,推测是由于高原鼠兔和高原鼢鼠等草地小型哺乳动物通过采食和掘洞行为会直接影响草地植物群落结构和多样性,而这些鼠类对土壤的作用则是一个相对缓慢的过程。如本研究发现高原鼠兔单独发生区植物群落因子和土壤化学计量因子对于干扰响应的残差高于高原鼠兔和高原鼢鼠混生区,这也进一步证实了上述推测。

综上所述,同区域分布的2种鼠类对草地植物群落和土壤化学性质的影响高于单一物种(如高原鼠兔)。因此,建议在高寒草甸鼠害防控中重点关注鼠类混合发生区的分布及其为害情况,并根据为害等级制订相应的防控措施,避免草地进一步退化。

参 考 文 献 (References)

- Bian JH, Jing ZC, Fan NC, Zhou WY. 1999. Influence of cover on habitat utilization of plateau pika (*Ochotona curzoniae*). *Acta Theriologica Sinica*, 19(3): 212–220 (in Chinese) [边疆晖, 景增春, 樊乃昌, 周文扬. 1999. 地表覆盖物对高原鼠兔栖息地利用的影响. *兽类学报*, 19(3): 212–220]
- Brady NC, Weil RR. 2010. *Elements of the nature and properties of soils*. London: Pearson Prentice Hall
- Chen YY, Li J, Zhou S, Qi HH, Feng GL, Gou WL, Pang XP, Guo ZG. 2022. Method for evaluating the effects of plateau pika disturbance on the value of alpine meadow ecosystem services. *Pratacultural Science*, 39(1): 187–201 (in Chinese) [陈莹莹, 李捷, 周俗, 齐昊昊, 冯甘霖, 苟文龙, 庞晓攀, 郭正刚. 2022. 高原鼠兔影响高寒草甸生态系统服务价值的评价方法. *草业科学*, 39(1): 187–201]
- Chernick MR. 2008. *Bootstrap methods: a guide for practitioners and researchers*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Dong QM, Zhao XQ, Wu GL, Shi JJ, Ren GH. 2013. A review of formation mechanism and restoration measures of “black-soil-type” degraded grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 70(5): 2359–2370
- Galiano D, Kubiak BB, Overbeck GE, de Freitas TRO. 2014. Effects of rodents on plant cover, soil hardness, and soil nutrient content: a case study on tuco-tucos (*Ctenomys minutus*). *Acta Theriologica*, 59(4): 583–587
- Guo ZG, Li XF, Liu XY, Zhou XR. 2012. Response of alpine meadow communities to burrow density changes of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 32(1): 44–49
- Harris RB. 2010. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau: a review of the evidence of its magnitude and causes. *Journal of Arid Environments*, 74(1): 1–12
- Hu J, Qian XJ, Liu CZ. 2021. Responses of the grasshopper community biodiversity and pattern intensity to the plant community. *Journal of Plant Protection*, 48(1): 202–211 (in Chinese) [胡靖, 钱秀娟, 刘长仲. 2021. 高山草地蝗虫群落生物多样性和空间聚集强度对植物群落的响应. *植物保护学报*, 48(1): 202–211]
- Hua LM, Cai XC. 2021. Recent advances in ecological studies for plateau zokor (*Eospalax baileyi*): a review. *Journal of Gansu Agricultural University*, 56(2): 1–10, 17 (in Chinese) [花立民, 蔡新成. 2021. 高原鼢鼠(*Eospalax baileyi*)的生态学研究进展. *甘肃农业大学学报*, 56(2): 1–10, 17]
- Hua LM, Chai SQ. 2022. Rodent pest control on grasslands in China: current state, problems and prospects. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 415–423 (in Chinese) [花立民, 柴守权. 2022. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策. *植物保护学报*, 49(1): 415–423]
- Jia TT. 2016. Plateau pika disturbance correlated with alpine meadow plant and soil in Qinghai-Tibet Plateau. Master thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese) [贾婷婷. 2016. 高原鼠兔干扰与青藏高原高寒草甸植被和土壤的关系. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学]
- Jin L, Sun L, Cui HJ, Zhao JJ, Liu XC, Tang PJ, Wang XJ. 2014. Correlation between the distribution characteristics of poisonous plants and *Ochotona curzoniae*, *Myospalax baileyi* in the East of Tibetan Plateau Alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 34(9): 2208–2215 (in Chinese) [金樑, 孙莉, 崔慧君, 赵静静, 刘喜超, 唐鹏杰, 王晓娟. 2014. 青藏高原东缘高寒草原有毒植物分布与高原鼠兔、高原鼢鼠的相关性. *生态学报*, 34(9): 2208–2215]
- Lai JS, Zou Y, Zhang JL, Peres-Neto PR. 2022. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca.hp R package. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(4): 782–788
- Lin XG. 2010. *Principles and methods of soil microbiology research*. Beijing: Higher Education Press, pp. 112–134 (in Chinese) [林先贵. 2010. 土壤微生物研究原理与方法. 北京: 高等教育出版社, pp. 112–134]
- Liu CF, Duan YY, Wang LL, Wang YM, Guo ZG. 2023. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbance on the relationship between plant species diversity and soil ecological stoichiometry in alpine meadows. *Acta Pratacultural Sinica*, 32(6): 157–166 (in Chinese) [刘彩凤, 段媛媛, 王玲玲, 王乙茱, 郭正刚. 2023. 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, 32(6): 157-166]
- Luo B. 2023. The effects of nesting behavior of plateau pika on soil animal diversity in Nianqing Tanggula Mountain. Master thesis. Linzhi: Tibet Agricultural and Animal Husbandry University (in Chinese) [罗斌. 2023. 高原鼠兔筑巢行为对念青唐古拉山土壤动物多样性的影响. 硕士学位论文. 林芝: 西藏农牧学院]
- Niu YJ, Yang SW, Zhu HM, Zhou JW, Chu B, Ma SJ, Hua R, Hua LM. 2020. Cyclic formation of zokor mounds promotes plant diversity and renews plant communities in alpine meadows on the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 446(1): 65-79
- Pan DF. 2019. Interactions and mechanisms among herbivores in an alpine meadow of Qinghai-Tibetan Plateau. PhD thesis. Changchun: Northeast Normal University (in Chinese) [潘多锋. 2019. 青藏高原高寒草甸草食动物间的相互作用关系及机制. 博士学位论文. 长春: 东北师范大学]
- Pang XP, Guo ZG. 2018. Response of leaf traits of common plants in alpine meadow to plateau pika disturbance. *The Rangeland Journal*, 40(1): 39
- Pang XP, Wang Q, Zhang J, Xu HP, Zhang WN, Wang J, Guo ZG. 2020. Responses of soil inorganic and organic carbon stocks of alpine meadows to the disturbance by plateau pikas. *European Journal of Soil Science*, 71(4): 706-715
- 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 Prataculturae 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]
- Su JH, Ji WH, Li H, Yao T, Wang JF, Nan ZB. 2020. Zokor disturbances indicated positive soil microbial responses with carbon cycle and mineral encrustation in alpine grassland. *Ecological Engineering*, 144: 105702
- Wang QY, Jiang ZG, Fan NC. 1989. A preliminary study on the interspecies relationship among plateau zokor, plateau pika and Gansu pika. *Acta Zoologica Sinica*, 35(2): 205-212 (in Chinese) [王权业, 蒋志刚, 樊乃昌. 1989. 高原鼢鼠、高原鼠兔以及甘肃鼠兔种间关系的初步探讨. 动物学报, 35(2): 205-212]
- Wei WR, Zhang LF, Yang GR, Xu JW, Fan XD, Zhang WG. 2013. A study on the burrow features and functions of plateau pika. *Acta Prataculturae Sinica*, 22(6): 198-204 (in Chinese) [卫万荣, 张灵菲, 杨国荣, 徐吉伟, 范旭东, 张卫国. 2013. 高原鼠兔洞系特征及功能研究. 草业学报, 22(6): 198-204]
- Xin XJ, Yang YB, Wang G, Ren ZW, Chu CJ, Zhang RY. 2011. Niche dynamics of plant community succession and grassland quality index on zokor mounds. *Chinese Journal of Ecology*, 30(4): 700-706 (in Chinese) [辛小娟, 杨莹博, 王刚, 任正炜, 储诚进, 张仁懿. 2011. 鼢鼠土丘植物群落演替生态位动态及草地质量指数. 生态学杂志, 30(4): 700-706]
- 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 XH. 2017. Grassland rodents control and diet selection of plateau zokors in Qinghai Province. Master thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese) [杨晓慧. 2017. 青海省草地鼠害防治及高原鼢鼠食性研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学]
- Yang ZH, Chen XT, Deng QY, Wei WR. 2020. Effects of the excavation activities of plateau zokor (*Myospalax baileyi*) on the plant community characteristics of alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 29(05): 13-20 (in Chinese) [杨子翰, 陈秦祥, 郑巧燕, 卫万荣. 2020. 高原鼢鼠干扰对高寒草甸植物群落特征的影响. 草业学报, 29(05): 13-20]
- Yang ZY, Jiang XL. 2002. The harm of plateau pika on grassland vegetation and its control threshold value. *Pratacultural Science*, 19(4): 63-65 (in Chinese) [杨振宇, 江小蕾. 2002. 高原鼠兔对草地植被的危害及防治阈值研究. 草业科学, 19(4): 63-65]
- Ye GH. 2023. Effect of *Eospalax baileyi* disturbance on the species and functional diversity of plant and soil biota in alpine meadow. PhD thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University (in Chinese) [叶国辉. 2023. 高原鼢鼠(*Eospalax baileyi*)干扰对高寒草甸植物和土壤生物物种及功能多样性的影响. 博士学位论文. 兰州: 甘肃农业大学]
- Yu C, Pang XP, Wang Q, Jin SH, Shu CC, Guo ZG. 2017. Soil nutrient changes induced by the presence and intensity of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbances in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Ecological Engineering*, 106: 1-9
- Zhang JY, An ZF, Wang ZJ, Chen XQ, Wei DB. 2023. Inhibition of bile acid metabolism in plateau zokor (*Myospalax baileyi*) and plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in high-altitude environments. *Acta Theriologica Sinica*, 43(5): 553-567 (in Chinese) [张佳钰, 安志芳, 王志洁, 陈晓琦, 魏登邦. 2023. 高海拔环境抑制高原鼢鼠和高原鼠兔的胆汁酸代谢. 兽类学报, 43(5): 553-567]
- Zhang XL, Li G. 2015. Effects of rodents activities on grazing land and ecosystem in alpine meadow. *Pratacultural Science*, 32(5): 816-822 (in Chinese) [张兴禄, 李广. 2015. 高原鼠兔和高原鼢鼠在高寒草甸生态系统的作用. 草业科学, 32(5): 816-822]
- Zhang Y, Dong SK, Gao QZ, Liu SL, Liang Y, Cao XJ. 2016. Responses of alpine vegetation and soils to the disturbance of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) at burrow level on the Qinghai-Tibetan Plateau of China. *Ecological Engineering*, 88: 232-236
- Zong WJ, Jiang XL, Yan L. 2006. Effects of plateau zokor disturbance on species diversity of plant communities in alpine meadow. *Pratacultural Science*, 23(10): 68-72 (in Chinese) [宗文杰, 江小蕾, 严林. 2006. 高原鼢鼠的干扰对高寒草地植物群落物种多样性的影响. 草业科学, 23(10): 68-72]

(责任编辑:李美娟)