

高原鼢鼠干扰对高寒草甸植物群落地上-地下生物量分配格局和土壤理化性质的影响



刘济泽¹ 董 瑞¹ 花立民¹ 楚 彬^{1*} 叶国辉^{2*}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 国家林业和草原局高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 兰州 730070; 2. 内蒙古农业大学草业学院, 呼和浩特 010010)

摘要: 为明晰高原鼢鼠 *Eospalax baileyi* 不同干扰强度对高寒草甸植物生物量分配格局与土壤理化性质的影响, 以高原鼢鼠栖息的高寒草甸为研究对象, 设置无干扰(对照)、轻度、中度、重度和极重度5个干扰强度样地, 调查各样地内植物群落地上生物量、地下生物量和土壤理化性质, 分析不同干扰强度下植物地上-地下生物量分配格局及其与土壤理化性质的关系。结果表明: 随着高原鼢鼠干扰强度增加, 植物地上生物量呈先升高后降低的趋势, 轻度干扰下植物地上生物量最高, 为 400.036 g/m², 显著高于对照, 重度干扰下植物地下生物量最低, 为 812.885 g/m², 显著低于对照、轻度和中度干扰; 高原鼢鼠干扰显著增加了土壤含水量, 降低了土壤紧实度和土壤有机碳含量, 土壤全氮、速效磷、硝态氮和铵态氮含量随着干扰强度增加均呈先升后降的趋势; 轻度、中度和重度干扰下, 植物生物量优先分配至地上部分, 其中轻度和重度干扰下权衡指数最大, 均为 0.027; 极重度干扰下, 植物生物量优先分配至地下部分, 权衡指数为 0.029; 植物地上-地下生物量权衡指数与土壤养分含量均呈负相关关系, 与土壤含水量和 pH 呈正相关关系, 但仅与土壤速效磷含量显著相关。

关键词: 生物量; 分配; 高原鼢鼠; 干扰; 高寒草甸; 土壤

Effects of plateau zokor *Eospalax baileyi* disturbance on the aboveground-belowground biomass allocation pattern of plant communities and soil physicochemical properties in alpine meadow

Liu Jize¹ Dong Rui¹ Hua Limin¹ Chu Bin^{1*} Ye Guohui^{2*}

(1. Engineering and Technology Research Center for Alpine Rodent Pest Control, National Forestry and Grassland Administration; Key Laboratory of Grassland Ecosystem of the Ministry of Education; Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu Province, China; 2. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: To clarify the effects of different disturbance intensities of plateau zokor *Eospalax baileyi* on the plant biomass allocation pattern and the soil physicochemical properties in alpine meadow, five disturbance levels were established, namely no disturbance (control), light disturbance, moderate disturbance, heavy disturbance, and extremely heavy disturbance. Aboveground biomass, belowground biomass, and soil physicochemical properties in each plot were surveyed, and the relationships between the biomass allocation pattern and soil physicochemical properties under different disturbance intensities were analyzed. The results showed that the aboveground biomass of plants initially increased and then decreased with the increase of plateau zokor disturbance. The highest aboveground biomass of plants

基金项目: 国家自然科学基金(32201478), 甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QDFC-2-24-02), 国家林草局草地啮齿动物危害防控创新团队

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: ryan_713@163.com, 18394002004@163.com

收稿日期: 2024-03-24

(400.036 g/m²) was observed under light disturbance, which was significantly higher than the control. The belowground biomass of plants under heavy disturbance (812.885 g/m²) was the lowest and significantly lower than the control, light and moderate disturbances; plateau zokor disturbance significantly increased soil moisture, decreased soil compaction and organic carbon. The contents of soil total nitrogen, available phosphorus, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen first increased and then decreased with increasing disturbance intensity; under light, moderate, and heavy disturbance, plant biomass was preferentially allocated to aboveground parts, with the highest trade-off index observed under light and heavy disturbance (0.027). Under extreme disturbance, the plant biomass allocation shifted towards the below-ground parts, with a trade-off index of 0.029; correlation analysis showed that the trade-off index for plant biomass negatively correlated with soil nutrient content, positively correlated with soil moisture and pH, but only significantly negatively correlated with available phosphorus content in the soil.

Key words: biomass; allocation; plateau zokor; disturbance; alpine meadow; soil

植物生物量是草地生态系统结构和功能的物质基础(Hovenden et al., 2014)。生物量分配反映了植物在生长过程中为适应环境变化将光合作用产物分配至不同器官或功能性状的比例(Poorter et al., 2012)。当植物受到外界干扰时会将生物量优先分配给获取资源最受限的器官,如土壤养分和水分缺乏时,植物地下生物量分配会增加(Niklas, 2006),而环境温度过低或光照不足时,植物地上生物量分配会增加(韩勇等, 2023)。因此,研究植物地上-地下生物量的分配和权衡机制,对于理解环境变化下植物的表型特征和生存策略具有重要意义。

高寒草甸是青藏高原的主要草地类型,不仅为农牧民提供重要的生活物质,而且在涵养水源、保护生物多样性和固碳等方面发挥着重要作用(傅伯杰等, 2021)。近年来,受气候变化和人为干扰等因素的影响,高寒草甸发生退化,退化的高寒草甸更适合啮齿动物生存,导致鼠害发生,进一步加剧草地退化(王德利等, 2016)。高原鼯鼠 *Eospalax baileyi* 属啮齿目鼯形鼠科鼯鼠属 *Eospalax*, 是青藏高原特有的地下啮齿动物,在青藏高原高寒草甸广泛分布(张堰铭和刘季科, 2002)。目前,国内学者关于高原鼯鼠采食、挖掘和造丘活动对高寒草甸土壤理化性质和植物生物量等方面影响的研究较多。如高原鼯鼠干扰增加了土壤水分,降低了土壤紧实度(Niu et al., 2020);随着高原鼯鼠干扰程度的增加,土壤全效养分和速效养分呈单峰变化趋势(Ye et al., 2023);高原鼯鼠干扰会增加植物群落地上生物量,降低植物群落地下生物量(Zhang et al., 2009; 叶国辉, 2023),但关于高原鼯鼠干扰对植物地上-地下生物量分配格局的影响未见报道。

高原鼯鼠干扰会导致植物各器官获取的光合产

物比例发生变化,进而直接影响植物生长(Bardgett & Wardle, 2010);高原鼯鼠干扰形成的凸出鼠丘斑块改变了微地形,导致土壤水分和养分二次分配,增加了环境异质性,进而间接影响植物生长(Zhang et al., 2003)。高原鼯鼠干扰强度不同,对植物的影响也不同,现有高原鼯鼠干扰强度大多以新旧土丘密度或面积为依据划分,忽略了鼠丘斑块的空间分布(于海玲等, 2018; 杨晶等, 2020; 杨子翰等, 2020)。基于此,本研究以鼠丘斑块空间格局指数为依据划分高原鼯鼠干扰强度,通过调查植物群落地上、地下生物量和土壤理化性质(含水量、紧实度、全效养分和速效养分),分析不同干扰强度对植物地上-地下生物量分配格局的影响,明晰植物地上-地下生物量分配与土壤理化性质的关系,以期为深入理解生物干扰下高寒草甸植物的适应策略和维持机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区概况:甘肃省天祝藏族自治县抓喜秀龙乡海拔2 938 m,气候属于典型的高原大陆性气候,有冷暖两季,5—10月为暖季,11月—次年4月为冷季,年均温-0.1℃,年均降水量416.0 mm,降水主要集中在7—9月;草地类型为高寒草甸,土壤为高寒草甸土,是高原鼯鼠的主要分布区(Niu et al., 2019)。

试剂和仪器:本试验所用试剂均为国产分析纯。DF-QT土钻,东方鑫鸿(北京)科技有限公司;SC-900土壤紧实度仪,美国Spectrum有限公司;TZS-IIW土壤温湿度仪,浙江托普仪器有限公司;ST2100 pH计,美国OHAUS公司;FP6431火焰分光

光度计,上海向帆仪器有限公司;FS3100流动分析仪,美国OI Analytical公司;DHG-9030AD台式鼓风干燥箱,上海齐欣科学仪器有限公司;BSA124S分析天平,德国赛多利斯集团。

1.2 方法

1.2.1 高原鼯鼠干扰强度的确定

于2020年7月(盛草期)在研究区选择长400 m、宽200 m的样地进行鼠丘斑块空间格局指数调查。样地内唯一的地下啮齿动物为高原鼯鼠。鼠丘斑块空间格局指数用鼠丘斑块平均近邻距离和鼠丘斑块密度2个参数表示。采用实时动态控制系统技术对样地内高原鼯鼠鼠丘空间分布进行调查(花立民等, 2018),将获取的鼠丘地理坐标导入到ArcGIS 10.5软件中,并将样地划分为145个边长为20 m的方形小区,计算各小区内鼠丘斑块平均近邻距离和鼠丘斑块密度,对各小区的鼠丘斑块平均近邻距离和鼠丘斑块密度进行K-均值聚类分析。当总内部平方和的减小速度明显变缓(聚类个数对应的斜率明显降低)时的聚类个数为最佳聚类个数(龙文佳等, 2020)。鼠丘斑块密度为每个小区内鼠丘斑块数量。计算每个小区鼠丘斑块平均近邻距离 R , $R = 2\sqrt{D} \times \sum_{i=1}^N r_i / N$, 式中, D 为小区鼠丘斑块密度; N 为小区鼠丘斑块数量; r_i 是鼠丘斑块*i*与其邻近鼠丘斑块的距离(Chu et al., 2020)。每个干扰强度随机选择3个小区,小区之间间距大于100 m,每个小区随机选择5个采样点调查植物地上、地下生物量和土壤理化性质,以无鼠丘分布草地为对照。

1.2.2 植物地上和地下生物量调查

调查期间无家畜放牧,高原鼯鼠处于非繁殖期。每个采样点挖取长0.5 m、宽0.5 m、高0.2 m的土方,人工分拣出所有植物,利用剪刀将每株植物的地上和地下部分分开,装入信封做好标记带回实验室,在室内于104℃恒温杀青30 min,75℃下烘干至恒重(李奇等, 2018),分别称量地上和地下生物量。

1.2.3 土壤理化性质测定

在距每个植物采样点10 cm处采用土壤紧实度仪和土壤温湿度仪测定0~20 cm表层土的土壤紧实度和土壤含水量。采用直径为5 cm的土钻在距每个植物采样点10 cm处每隔120°采集0~20 cm的表层土,重复3次,混合为1个样本,分装到2个自封袋中,一份样本带回实验室,于4℃保存,用于测定硝态氮和铵态氮含量;另一份带回室内于105℃烘干至恒重后过筛,用于测定其他化学指标。取过孔径

2 mm筛的风干土5 g,加入25 mL去离子水,充分混合均匀,静置30 min,使用pH计测量土壤pH(杜亚彬等, 2020);取0.5 g烘干土采用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 氧化法测定土壤中有机碳含量;取0.1 g烘干土采用半微量凯氏定氮法测定土壤中全氮含量;取0.5 g烘干土采用钼锑抗-抗坏血酸比色法测定土壤中全磷含量和速效磷含量;取0.5 g烘干土采用乙酸铵浸提-火焰分光光度计法测定土壤中全钾含量;取40.0 g新鲜土壤样品,添加200 mL 2 mol/L氯化钾溶液,于(20±2)℃下振荡1 h,取60 mL浸提悬浮液转移至离心管中,于3 000 g下离心10 min,取上清液转移至玻璃容器中,用流动分析仪测定土壤中铵态氮和硝态氮含量(鲍士旦, 2020)。

1.2.4 植物地上-地下生物量权衡指数计算

采用均方根误差计算不同高原鼯鼠干扰强度下植物地上生物量和地下生物量的相对效益,均方根

误差 = $\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (B_{\text{相对}} - B_j)^2}$, 式中, $B_{\text{相对}}$ 为地上/地

下相对生物量, $B_{\text{相对}} = (B_j - B_{\min}) / (B_{\max} - B_{\min})$, B_j 为同一干扰强度下第*j*个采样点的地上/地下生物的测量值、 $B_{\min}$ 和 $B_{\max}$ 分别为同一干扰强度下地上/地下生物量的最小值和最大值(Liu et al., 2024)。权衡指数是坐标系中地下生物量相对效益*x*和地上生物量相对效益*y*所形成点(*x*, *y*)距权衡线的直线距离*d*(Sun & Wang, 2016), $d = |x - y| / \sqrt{2}$ 。权衡线为*y*=*x*的直线,当权衡指数落在权衡线上,表明零权衡;当权衡指数落在权衡线上方,表明植物生物量向地上权衡;当权衡指数落在权衡线下方,表明植物生物量向地下权衡(Gao et al., 2021)。

1.2.5 植物生物量分配与土壤理化性质的关系分析

采用Pearson相关性分析法分析土壤理化因子与植物地上-地下生物量权衡指数间的相关性。

1.3 数据分析

试验数据均采用SPSS 27.0软件进行统计分析,先进行正态分布检验和方差齐性检验,经检验数据均符合正态分布和方差齐性,采用单因素方差分析中的Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 高原鼯鼠干扰强度划分

K-均值聚类分析表明,随着聚类个数的增加总内部平方和逐渐减小,当聚类个数为4时,对应的斜率(-9.000)低于聚类个数为1~3的斜率(图1),因

此,将高原鼢鼠干扰划分为4个等级。在4个干扰强度下鼠丘斑块密度和鼠丘斑块平均近邻距离均差异显著(表1),说明划分的4个干扰强度较合理。

2.2 高原鼢鼠干扰对植物地上和地下生物量的影响

随着高原鼢鼠干扰强度增加,植物地上生物量呈先升高后降低的趋势,其中轻度干扰下植物地上生物量最大,为 400.036 g/m^2 , 显著高于对照 ($P < 0.05$),与其他干扰强度之间差异不显著;其他干扰强度下植物地上生物量均与对照均差异不显著(图2-A)。高原鼢鼠干扰会降低植物地下生物量,其中重度干扰下植物地下生物量最小,为 812.885 g/m^2 , 显著低于对照、轻度和中度干扰 ($P < 0.05$),但与极重

度干扰间差异不显著(图2-B)。

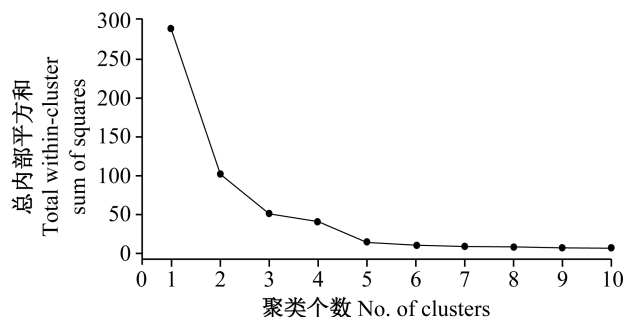


图1 鼠丘斑块空间分布格局指数K-均值聚类分析

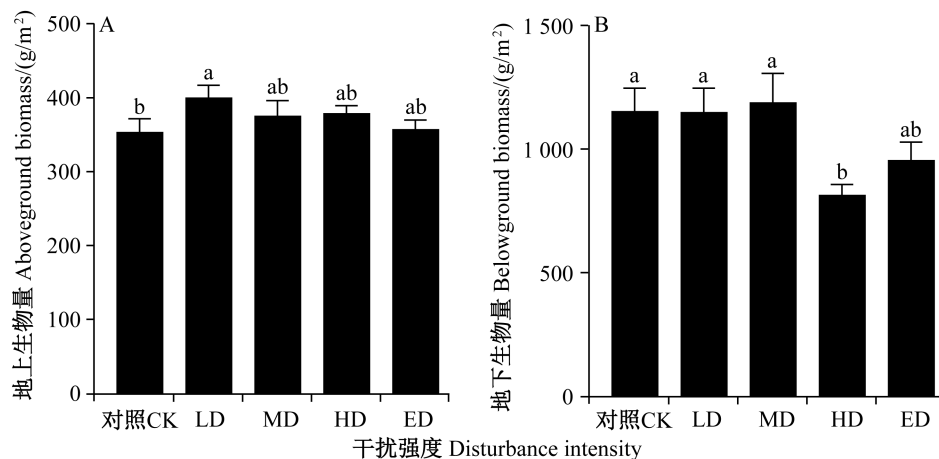
Fig. 1 K-means clustering analysis of spatial pattern index of mound patch

表1 高原鼢鼠干扰强度划分指标

Table 1 Classification index for different disturbance intensities in plateau zokors

指标 Index	轻度干扰 Light disturbance	中度干扰 Moderate disturbance	重度干扰 Heavy disturbance	极重度干扰 Extreme heavy disturbance
斑块平均近邻距离 Nearest neighbor distance of patch	$6.38 \pm 4.98 \text{ d}$	$33.83 \pm 9.79 \text{ c}$	$77.12 \pm 18.06 \text{ b}$	$181.62 \pm 25.42 \text{ a}$
斑块密度(个/ hm^2) Patch density/(No. of patches/ hm^2)	$163.52 \pm 71.09 \text{ d}$	$437.10 \pm 67.97 \text{ c}$	$753.85 \pm 108.90 \text{ b}$	$1\,241.67 \pm 128.29 \text{ a}$

表中数据为平均数 $\pm$ 标准差。同行不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P < 0.05$)。Data are mean $\pm$ SD. Different lowercase letters in the same row indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$).



LD: 轻度干扰; MD: 中度干扰; HD: 重度干扰; ED: 极重度干扰。LD: Light disturbance; MD: moderate disturbance; HD: heavy disturbance; ED: extreme heavy disturbance.

图2 高原鼢鼠干扰对植物地上(A)和地下生物量(B)的影响

Fig. 2 Effects of plateau zokor disturbance on plant aboveground (A) and belowground (B) biomass

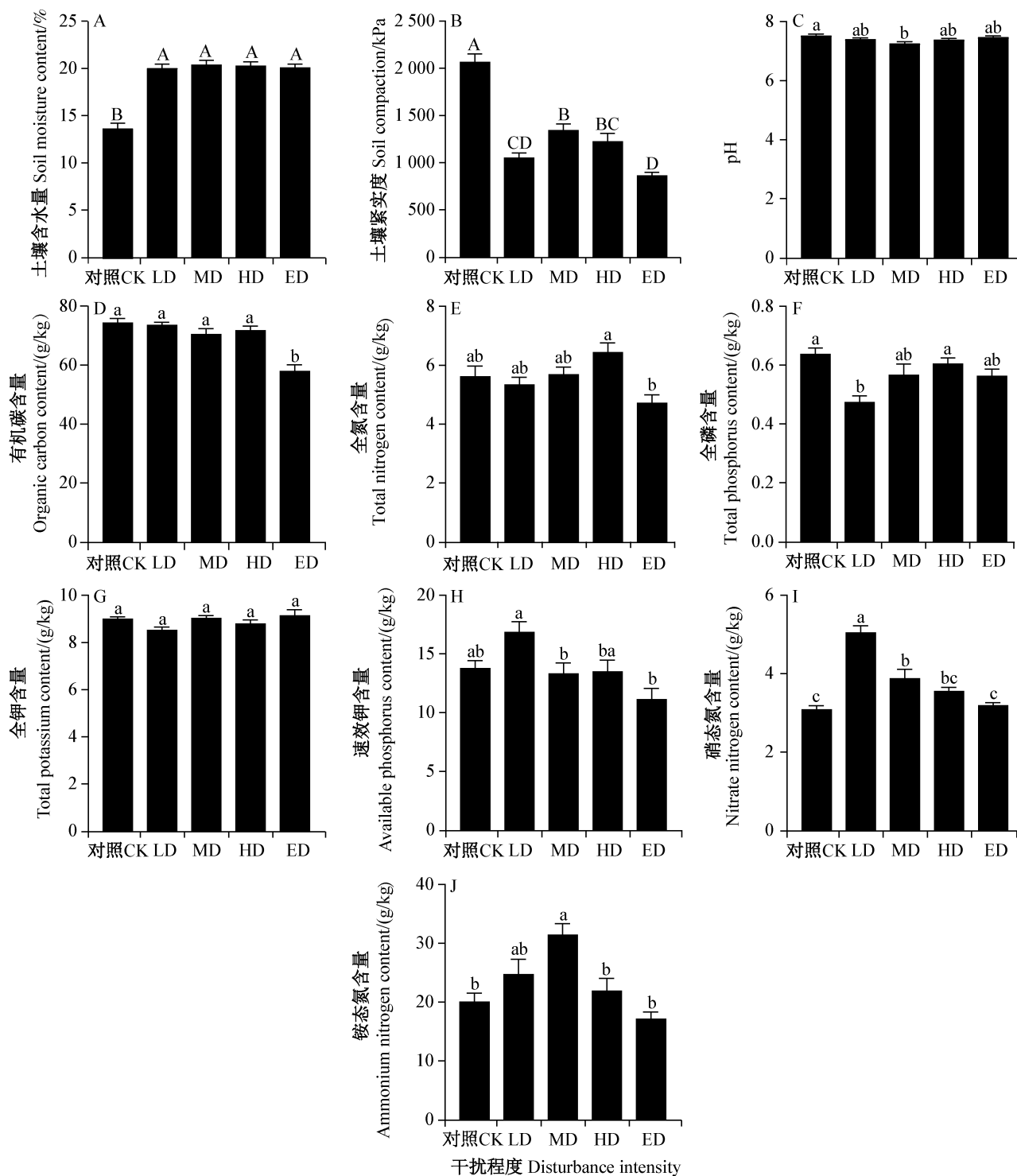
图中数据为平均数 $\pm$ 标准差。不同小写字母表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著($P < 0.05$)。Data are mean $\pm$ SD. Different lowercase letters indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P < 0.05$).

2.3 高原鼢鼠干扰对土壤理化性质的影响

随着高原鼢鼠干扰强度增加,土壤含水量呈增加趋势,且不同干扰强度下土壤含水量均极显著高于对照($P < 0.01$,图3-A)。随着高原鼢鼠干扰强度增加,土壤紧实度呈下降趋势,且不同干扰强度下土

壤紧实度均极显著低于对照($P < 0.01$,图3-B)。高原鼢鼠干扰对土壤pH影响较小,仅中度干扰下土壤pH显著低于对照($P < 0.05$),其他干扰强度与对照之间均无显著差异(图3-C)。高原鼢鼠干扰对土壤有机碳含量有影响,极重度干扰下土壤有机碳含量最

低,为 57.952 g/kg,显著低于其他干扰强度 ($P < 0.05$),其他干扰强度之间均差异不显著(图 3-D)。



LD: 轻度干扰; MD: 中度干扰; HD: 重度干扰; ED: 极重度干扰。LD: Light disturbance; MD: moderate disturbance; HD: heavy disturbance; ED: extreme heavy disturbance.

图3 高原鼯鼠干扰对土壤理化性质的影响

Fig. 3 Effects of plateau zokor disturbance on soil physical and chemical properties

图中数据为平均数±标准差。不同大、小写字母分别表示经Duncan氏新复极差法检验差异显著 ($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$)。Data are mean±SD. Different uppercase or lowercase letters indicate significant difference by Duncan's new multiple range test ($P < 0.01$ or $P < 0.05$).

高原鼯鼠干扰对土壤全氮含量有影响,除重度干扰下土壤全氮含量显著高于极重度干扰外($P<0.05$),其他干扰强度之间均差异不显著(图 3-E)。高原鼯鼠干扰对土壤全磷含量有影响,除对照和重度干扰下土壤全氮含量显著高于轻度干扰外($P<0.05$),其他干扰强度之间均差异不显著(图 3-F)。高原鼯鼠干扰对土壤全钾含量无显著影响(图 3-G)。高原鼯鼠干扰对土壤中速效磷、硝态氮和铵态氮含量均有影响,且均随着高原鼯鼠干扰强度增加呈先升高后降低的趋势;轻度干扰下土壤速效磷含量最高,为 16.857 g/kg,显著高于中度和极重度干扰($P<0.05$),但与其他干扰强度之间差异不显著;轻度干扰下土壤硝态氮含量最高,为 5.047 g/kg,显著高于其他干扰强度($P<0.05$);中度干扰下土壤铵态氮含量最高,为 1.430 g/kg,与轻度干扰差异不显著,但均显著高于其他干扰强度($P<0.05$,图 3-H~J)。

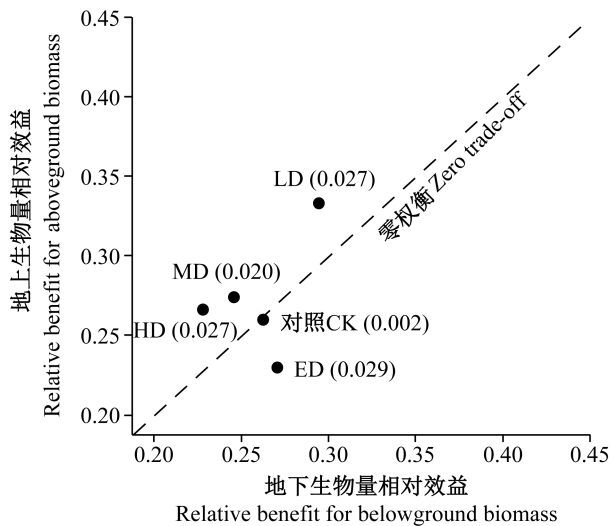
2.4 高原鼯鼠干扰下植物地上-地下生物量分配格局

在高原鼯鼠轻度、中度和重度干扰下,植物生物量被优先分配到地上部分,表现出对地上生物量有益的状态,其中轻度和重度干扰下权衡指数最大,均为 0.027,中度干扰下权衡指数最小,为 0.020(图 4)。无高原鼯鼠干扰和极重度干扰下,植物生物量被优先分配到地下部分,其中无高原鼯鼠干扰(对照)下权衡指数最小,为 0.002,极重度干扰下权衡指数最高,为 0.029(图 4)。

2.5 植物生物量分配与土壤理化性质的关系

高原鼯鼠干扰下植物地上-地下生物量权衡指

数与土壤 pH 和土壤含水量呈正相关关系,与土壤全养分含量呈负相关关系,其中仅与土壤速效磷含量呈显著负相关关系($P<0.01$),但与其他全速养分含量均无显著性(表 2),表明高原鼯鼠干扰后土壤速效磷含量降低,植物通过增加地下生物量的分配比例以满足对养分的需求。



LD: 轻度干扰; MD: 中度干扰; HD: 重度干扰; ED: 极重度干扰。LD: Light disturbance; MD: moderate disturbance; HD: heavy disturbance; ED: extreme heavy disturbance.

图 4 高原鼯鼠干扰强度对植物地上-地下生物量分配格局的影响

Fig. 4 Effects of disturbance intensities of plateau zokor on distribution pattern of aboveground-belowground biomass

土壤理化性质 Soil physical-chemical properties	植物地上-地下生物量权衡指数 Trade-off index of plant aboveground-belowground biomass	
	R	P
土壤含水量 Soil moisture	0.310	0.260
土壤紧实度 Soil compaction	-0.416	0.123
有机碳含量 Organic carbon content	-0.337	0.220
全氮含量 Total nitrogen content	-0.291	0.292
全磷含量 Total phosphorus content	-0.343	0.211
全钾含量 Total potassium content	-0.404	0.135
pH	0.500	0.058
速效磷含量 Available phosphorus content	-0.705	0.003**
硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	-0.033	0.908
铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	-0.112	0.691

**表示在 0.01 水平差异显著。 ** indicates significant difference at 0.01 level.

3 讨论

本研究结果显示,随着高原鼯鼠干扰强度增加,植物地上生物量虽呈下降趋势,但不同干扰强度下植物地上生物量均高于对照,在重度干扰下植物地下生物量显著低于其他干扰强度,与杨晶等(2020)和扬子翰等(2020)的研究结果一致。一般高寒草甸的根毡层主要由禾草科和莎草科植物根系组成,是植物群落地下生物量的主要组成部分(Miehe et al., 2019)。于海玲等(2018)和Niu et al.(2019)报道,随着高原鼯鼠干扰强度增加,原来以禾本科和莎草科为优势种的植物群落结构会逐渐向以杂类草为优势植物的植物群落结构转变,因此,禾本科和莎草科植物根系占比减少,导致植物地下生物量降低。但黄彬(2014)研究结果表明,随着高原鼯鼠鼠丘数量增加,植物地上生物量显著减少,但植物地下生物量显著增加,与已有研究结果不同,究其原因可能是高原鼯鼠干扰强度划分依据和样地大小不同。此外,杨鼎等(2020)研究表明高原鼯鼠干扰增加了植物物种多样性,而植物物种多样性与植物地上生物量存在正相关关系,因此,与对照相比,高原鼯鼠干扰会增加植物地上生物量。

众多研究表明,地下啮齿动物的挖掘活动可降低土壤紧实度,增加土壤含水量(张红艳, 2019; Ye et al., 2023),与本研究结果一致。本研究区内高原鼯鼠干扰活动形成的土丘平均高度约为0.29 m,不仅改变了栖息生境的微地形,而且凸出的土丘可阻挡短波辐射,降低土壤温度,减少土壤水分蒸发;同时,疏松的土壤有利于水分下渗,因此,高原鼯鼠干扰有利于土壤含水量增加。此外,本研究发现在高原鼯鼠极重度干扰下,土壤有机碳含量显著降低。在高寒草甸中植物根系是土壤有机质的主要来源(杨鼎, 2021),当高原鼯鼠极重度干扰后植物群落中禾草科植物的地下生物量下降,导致地下根系总生物量下降,因此土壤中有机碳含量下降。同时,土壤中速效氮和速效磷含量随高原鼯鼠干扰强度增加呈先上升后下降的趋势,究其原因可能是高原鼯鼠适度干扰增加了土壤含水量,促进土壤微生物分解代谢活动,从而土壤中速效氮和速效磷含量增加,但随着干扰强度的进一步增加,植物群落结构由耐受型莎草科植物向快速生长的杂类草转变,加速了对土壤中速效氮和速效磷的消耗,因此土壤中速效氮和有效磷的含量降低(杨晶等, 2020)。

植物生物量分配模式的改变反映其在生长过程

中对环境变化的适应策略。已有研究主要集中在放牧干扰和草地退化下植物地上-地下生物量分配与土壤理化性质的关系方面。如Sun et al.(2018)发现相较于禁牧样地,自由放牧增加了植物生物量向地下分配的比例,而且土壤有机碳和速效氮是影响地上-地下生物量分配的主要因素(Sun & Wang, 2016);张帆等(2021)认为随着退化程度的加剧,地上生物量和地下生物量同步衰退,总生物量也逐渐下降。本研究发现在无高原鼯鼠干扰的样地内,植物生物量优先向地下分配,但分配比例较低。吴江航等(2024)研究认为高寒草甸植被为维持结构稳定会向地下分配较多生物量,与本研究结果一致。此外,本研究结果表明,在高原鼯鼠轻度、中度和重度干扰下植物生物量会优先分配到地上部分,究其原因可能是高原鼯鼠干扰增加了土壤含水量,降低了土壤紧实度,而土壤养分含量无明显变化,植物地下部分更易获取土壤中的水分和养分,从而促进植物生物量向地上分配(Sun et al., 2021)。然而,在极重度干扰下,植物生物量分配更倾向于地下,有较大的权衡指数(0.029),可能是土壤养分匮乏导致植物增加根系投入以获取更多的土壤养分来满足其生长需求(Gugerli & Bauert, 2001; 刘美和马志良, 2021)。本研究通过相关性分析发现,土壤速效磷含量与植物地上-地下生物量权衡指数呈显著负相关关系,因为在缺磷环境中最先受到胁迫的组织是根,根系会通过形态学变化,如增加根的长度和粗细、根毛和侧根的数量和密度来扩大与土壤中磷的接触面积,从而提高植物对磷的吸收效率(李锋和潘晓华, 2002)。因此,植物在高原鼯鼠干扰下通过增加地下生物量,满足其对磷元素的营养需求。

本研究结果仅在较小空间尺度下探讨了高原鼯鼠干扰对植物地上-地下生物量分配和土壤理化性质的影响,在区域尺度或地理尺度下,植物生物量分配格局及其与土壤理化性质的关系是否也有类似的变化趋势尚不明确。本试验仅探讨了鼯鼠干扰和土壤理化性质对植物地上-地下生物量分配的影响,自然界环境复杂,除了鼯鼠、土壤理化性质外,土壤动物和微生物等因素是否影响植物地上-地下生物量的分配有待进一步研究。

参 考 文 献 (References)

- Bao SD. 2000. Soil and agricultural chemistry analysis. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 3版. 北京: 中国农业出版社]

- Bardgett RD, Wardle DA. 2010. Aboveground-belowground linkages: biotic interactions, ecosystem processes, and global change. Oxford: Oxford University Press
- Chu B, Ye GH, Yang SW, Zhou FF, Zhang FY, Zhou JW, Hua LM. 2020. Effect of plateau zokor (*Myospalax fontanierii*) disturbance on plant community structure and soil properties in the eastern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Rangeland Ecology & Management*, 73(4): 520–530
- Du YB, Ma YQ, Wang XF, Chang L. 2020. Effects of rhizosphere effects of Siberian ginseng *Acanthopanax senticosus* and soil environmental factors on Collembola community composition in soil. *Journal of Plant Protection*, 47(6): 1251–1260 (in Chinese) [杜亚彬, 马源洪, 王雪峰, 常亮. 2020. 刺五加根际效应和土壤环境因子对土壤跳虫群落结构的影响. *植物保护学报*, 47(6): 1251–1260]
- Fu BJ, Ouyang ZY, Shi P, Fan J, Wang XD, Zheng H, Zhao WW, Wu F. 2021. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 36(11): 1298–1306 (in Chinese) [傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 2021. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. *中国科学院院刊*, 36(11): 1298–1306]
- Gao XX, Dong SK, Xu YD, Fry EL, Li Y, Li S, Shen H, Xiao JN, Wu SN, Yang MY, et al. 2021. Plant biomass allocation and driving factors of grassland revegetation in a Qinghai-Tibetan Plateau chronosequence. *Land Degradation & Development*, 32(4): 1732–1741
- Gugerli F, Bauert MR. 2001. Growth and reproduction of *Polygonum viviparum* show weak responses to experimentally increased temperature at a Swiss alpine site. *Botanica Helvetica*, 111(2): 169–180
- Han Y, Jiang KS, Du HD, Bi YL. 2023. Effect of open-pit coal mining on grassland plant community characteristics and stability in arid gravel desert area. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 43(6): 1035–1043 (in Chinese) [韩勇, 姜凯升, 杜华栋, 毕银丽. 2023. 干旱砾漠区露天采煤对草地植物群落特征及其稳定性影响. *西北植物学报*, 43(6): 1035–1043]
- Hovenden MJ, Newton PCD, Wills KE. 2014. Seasonal not annual rainfall determines grassland biomass response to carbon dioxide. *Nature*, 511(7511): 583–586
- Hua LM, Chu B, Zhou YS, Ma SJ, Zhou JW. 2018. A method for investigating mounds number of subterranean rodent and its distribution. *Chinese Journal of Zoology*, 53(3): 461–467 (in Chinese) [花立民, 楚彬, 周延山, 马素洁, 周建伟. 2018. 一种地下啮齿动物土丘数量和分布调查的新方法. *动物学杂志*, 53(3): 461–467]
- Huang B. 2014. The relationship between plateau zokor and vegetation, soil factors. Master thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese) [黄彬. 2014. 高原鼢鼠种群密度与植被、土壤因素的关系. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学]
- Li F, Pan XH. 2002. The research development of morphological and physiological characteristics of plant root system under phosphorus deficiency. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 18(5): 65–69, 76 (in Chinese) [李锋, 潘晓华. 2002. 植物适应缺磷胁迫的根系形态及生理特征研究进展. *中国农学通报*, 18(5): 65–69, 76]
- Li Q, Lin FY, Wu ZJ, Wen MD, Hu F. 2018. Effects of agronomic measures and levels of herbicide applied on yields of allelopathic rice and biomass of weeds in fields. *Journal of Plant Protection*, 45(5): 1145–1153 (in Chinese) [李奇, 林芳源, 吴在敬, 文明德, 胡飞. 2018. 农艺措施和除草剂用量对化感稻产量及杂草生物量的影响. *植物保护学报*, 45(5): 1145–1153]
- Liu M, Ma ZL. 2021. Responses of biomass allocation to simulated warming in an alpine scrubland of eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 41(4): 1421–1430 (in Chinese) [刘美, 马志良. 2021. 青藏高原东部高寒灌丛生物量分配对模拟增温的响应. *生态学报*, 41(4): 1421–1430]
- Liu YZ, Zhao XQ, Liu WT, Feng B, Lv WD, Zhang ZX, Yang XX, Dong QM. 2024. Plant biomass partitioning in alpine meadows under different herbivores as influenced by soil bulk density and available nutrients. *Catena*, 240: 108017
- Long WJ, Zhang XF, Zhang L. 2020. Business process clustering method based on *k*-means and elbow method. *Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition)*, 48(1): 81–90 (in Chinese) [龙文佳, 张晓峰, 张链. 2020. 基于 *k*-means 和肘部法则的业务流程聚类方法. *江汉大学学报(自然科学版)*, 48(1): 81–90]
- Miehe G, Schleuss PM, Seeber E, Babel W, Biermann T, Braendle M, Chen FH, Coners H, Foken T, Gerken T, et al. 2019. The *Kobresia pygmaea* ecosystem of the Tibetan highlands-origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem: *Kobresia* pastures of Tibet. *Science of the Total Environment*, 648: 754–771
- Niklas KJ. 2006. A phyletic perspective on the allometry of plant biomass-partitioning patterns and functionally equivalent organ-categories. *New Phytologist*, 171(1): 27–40
- 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
- Niu YJ, Zhou JW, Yang SW, Chu B, Zhu HM, Zhang B, Fang QG, Tang ZS, Hua LM. 2019. Plant diversity is closely related to the density of zokor mounds in three alpine rangelands on the Tibetan Plateau. *PeerJ*, 7: e6921
- Poorter H, Niklas KJ, Reich PB, Oleksyn J, Poot P, Mommer L. 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1): 30–50
- Sun J, Ma BB, Lu XY. 2018. Grazing enhances soil nutrient effects: trade-offs between aboveground and belowground biomass in alpine grasslands of the Tibetan Plateau. *Land Degradation & Development*, 29(2): 337–348
- Sun J, Wang HM. 2016. Soil nitrogen and carbon determine the trade-off of the above- and below-ground biomass across alpine grass-

- lands, Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 60: 1070–1076
- Sun YF, Yang YH, Zhao X, Tang ZY, Wang SP, Fang JY. 2021. Global patterns and climatic drivers of above- and belowground net primary productivity in grasslands. *Science China Life Sciences*, 64 (5): 739–751
- Wang DL, Li XC, Pan DF, De KJ. 2016. The ecological significance and controlling of rodent outbreaks in the Qinghai-Tibetan grasslands. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 42(3): 237–245 (in Chinese) [王德利, 李心诚, 潘多峰, 德科加. 2016. 青藏高原草地鼠害的生态释义及控制. 西南民族大学学报(自然科学版), 42(3): 237–245]
- Wu JH, Li Y, Wang YX, Liu X, Sun J. 2024. Trade-off between aboveground and belowground net primary productivity of plant communities in alpine grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 44(2): 793–804 (in Chinese) [吴江航, 李洋, 王迎新, 刘向, 孙建. 2024. 高寒草地植物群落地上-地下净初级生产力权衡. 生态学报, 44 (2): 793–804]
- Yang D. 2021. Effect of plateau zokor on duration of soil carbon and nitrogen concentration in alpine meadow. Master thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese) [杨鼎. 2021. 高原鼢鼠影响高寒草甸土壤碳氮含量的时间有效性研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学]
- Yang D, Qi HH, Wang Q, Xu HP, Zhang J, Zhang HY, Guo ZG. 2020. Restoration course of vegetation community characteristics in the revegetation of plateau zokor mounds in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 29(2): 114–122 (in Chinese) [杨鼎, 齐昊昊, 王倩, 徐海鹏, 张静, 张红艳, 郭正刚. 2020. 青藏高原高原鼢鼠鼠丘植被恢复过程中植物群落特征的变化. 草业学报, 29(2): 114–122]
- Yang J, Zhang Q, Yao BH, Cai ZY, Wang C, Guo HL, Su JH. 2020. Effects of plateau zokor disturbance on soil physicochemical properties and plant biomass in alpine meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 28(2): 492–499 (in Chinese) [杨晶, 张倩, 姚宝辉, 蔡志远, 王缠, 郭怀亮, 苏军虎. 2020. 高原鼢鼠扰动对高寒草甸土壤理化特性及植物生物量的影响. 草地学报, 28(2): 492–499]
- Yang ZH, Chen TX, Zheng 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(5): 13–20 (in Chinese) [杨子翰, 陈泰祥, 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(5): 13–20]
- 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]
- Ye GH, Chu B, Tang ZS, Hu GX, Bao D, Hua R, Pfeiffer M, Hua LM, Niu YJ. 2023. Soil microbial and macroinvertebrate functional diversity in response to zokor disturbance in Tibetan alpine meadow. *Catena*, 225: 107014
- Yu HL, Fan JW, Li YZ, Shi WJ. 2018. Effects of *Myospalax baileyi* disturbance on plant community at alpine meadow in Three Rivers Headwater Region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(6): 1902–1910 (in Chinese) [于海玲, 樊江文, 李愈哲, 史文娇. 2018. 高原鼢鼠干扰对三江源区高寒草甸群落特征的影响. 应用生态学报, 29(6): 1902–1910]
- Zhang F, Li YC, Wang X, Zhu JX. 2021. Effect of rangeland degradation on biomass allocation in alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Pratacultural Science*, 38(8): 1451–1458 (in Chinese) [张帆, 李元淳, 王新, 朱剑霄. 2021. 青藏高原高寒草甸退化对草地群落生物量及其分配的影响. 草业科学, 38 (8): 1451–1458]
- Zhang HY. 2019. Effects of plateau zokor-mound on plant community and soil nutrients in alpine meadow. Master thesis. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese) [张红艳. 2019. 高原鼢鼠鼠丘对高寒草甸植物群落和土壤养分的影响. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学]
- Zhang WG, Hang XL, Yan L, Ma HY. 2009. Patterns of change amongst plant functional groups along a successional status of zokor mounds in the Qinghai-Tibetan Plateau. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 52(3): 299–305
- Zhang YM, Liu JK. 2002. The biological characteristics of subterranean rodents and their roles in ecosystem. *Acta Theriologica Sinica*, 22(2): 144–154 (in Chinese) [张堰铭, 刘季科. 2002. 地下鼠生物学特征及其在生态系统中的作用. 兽类学报, 22(2): 144–154]
- Zhang YM, Zhang ZB, Liu JK. 2003. Burrowing rodents as ecosystem engineers: the ecology and management of plateau zokors *Myospalax fontanierii* in alpine meadow ecosystems on the Tibetan Plateau. *Mammal Review*, 33(3/4): 284–294

(责任编辑:张俊芳)