

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.019

引用格式:袁颖,李希来,柴瑜,等.高寒草甸生态修复成效评估——植物群落与土壤特征对不同鼠害干扰的响应[J].草地学报,2026,34(1):191—202

YUAN Ying, LI Xi-lai, CHAI Yu, et al. Assessment of the Effectiveness of Alpine Meadow Ecological Restoration and the Responses of Plant Communities and Soil Characteristics to Different Rodent Disturbances[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1): 191—202

高寒草甸生态修复成效评估——植物群落 与土壤特征对不同鼠害干扰的响应

袁颖^{1,2}, 李希来^{1,2*}, 柴瑜^{1,2}, 张静^{2*}, 伍希², 周怡志^{1,2}, 高佩^{1,2}

(1. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016;

2. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要:本研究以河南县高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*, OC)干扰、高原鼢鼠(*Eospalax fontanierii*, EF)干扰及其共生干扰研究区(OC+EF)下退化高寒草甸3个生态修复区为研究对象,通过测定生态修复区植物群落物种多样性和土壤理化性质的变化,研究生态修复后高寒草甸植物群落特征和土壤理化性质对OC, EF以及OC+EF干扰的响应,评估不同啮齿动物干扰模式下生态修复的成效,为避免草地二次退化提供理论指导。结果表明:OC+EF的物种丰富度和物种多样性显著优于OC; EF的植被总盖度与植物平均高度均较高, OC, EF, OC+EF三种干扰研究区的植被总盖度分别为84.33%, 97.33%, 88.56%, 植物群落平均高度分别为47.70, 168.23, 139.47 cm, EF的禾本科、豆科、莎草科及其他杂类草的地上生物量均高于OC与OC+EF, 生态修复后EF牧草产量最高。EF的土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量显著高于其他干扰样地($P < 0.05$); OC, EF和OC+EF的土壤速效磷(Available phosphorus, A-P)含量分别为0.053, 0.055和0.035 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。综合植物群落特征和土壤理化性质各项指标, EF下生态修复成效最为显著, OC+EF次之, OC最差并容易出现二次退化。因此, OC下需要采取非传统生态修复措施, 比如增加免耕补播中镇压强度和覆盖无纺布等措施, 将有利于提高其生态修复的治理成效。

关键词:修复成效评估; 高寒草甸; 生态修复; 鼠害干扰; 植物群落; 土壤养分

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0191-12

Assessment of the Effectiveness of Alpine Meadow Ecological Restoration and the Responses of Plant Communities and Soil Characteristics to Different Rodent Disturbances

YUAN Ying^{1,2}, LI Xi-lai^{1,2*}, CHAI Yu^{1,2}, ZHANG Jing^{2*}, WU Xi², ZHOU Yi-zhi^{1,2}, GAO Pei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China;

2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China)

Abstract: This paper researched the effects of disturbances of plateau pika (*Ochotona curzoniae*, OC), plateau zokor (*Eospalax fontanierii*, EF), and the symbiotic interference of plateau pika and plateau zokor (OC+EF) on plant and soil properties in three ecologically restored areas of formerly degraded alpine meadow in Henan County. It investigated how alpine meadow plant community characteristics, as measured by the changes in plant community species diversity and soil physical and chemical properties in the ecologically restored areas, responded to the disturbances of OC, EF and OC+EF. It also evaluated the effectiveness of ecological restora-

收稿日期:2025-02-17;修回日期:2025-04-07

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U23A20159, U21A20191);青海省科学技术厅项目(2023-QY-210)和高等学校学科创新引智计划(D18013)资助

作者简介:袁颖(2001-),女,汉族,青海西宁人,硕士研究生,主要从事退化草地生态修复的研究, E-mail: yying04111208@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: xilai-li@163.com; qhlx12001@163.com

tion in different disturbance patterns of rodents, and provided theoretical guidance to avoid secondary degradation. The results show that species richness and species diversity in the OC+EF disturbed area are significantly higher than those in the OC disturbed area. Total vegetation coverage and average plant height in the EF disturbed area are relatively high. Total vegetation coverage in the three externally disturbed areas of OC, EF, and OC+EF is 84.33%, 97.33% and 88.56%, respectively. The height of plant communities averages 47.70 cm, 168.23 cm and 139.47 cm, respectively, in the three treatments. The aboveground biomass of Gramineae, Leguminosae, Cyperaceae, and other miscellaneous herbs in EF is higher than that in OC and OC+EF. After ecological restoration, the forage yield of EF is the highest. Its soil organic carbon content is significantly higher than that of the other two disturbed areas ($P<0.05$). The soil available phosphorus contents of OC, EF, and OC+EF are $0.053 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $0.055 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $0.035 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Judging by the comprehensive indicators of plant community characteristics and soil physical and chemical properties studied, the ecological restoration effects in the EF disturbance is the most pronounced, followed by the OC+EF disturbance, while the effects under OC disturbance is the least tangible and likely attributable to secondary degradation. Therefore, if disturbed by OC only, it is necessary to adopt non-traditional ecological restoration measures, such as increasing soil compactness during no-tillage reseeding and covering the sowed soil with non-woven fabrics, both of which will be conducive to improving the effectiveness of ecological restoration.

Key words: Assessment of restoration effectiveness; Alpine meadow; Ecological restoration; Rodent disturbance; Plant community; Soil nutrients

青藏高原高寒草甸作为重要的生态屏障,正面临着严峻的退化挑战。过度放牧和极端气候的变化等因素导致其生态系统功能严重受损,突出表现为植被破碎化、土壤退化和鼠害发生,高原鼠兔和高原鼢鼠频繁暴发。鼠害发生加剧了土壤养分流失、微生物多样性降低及生态系统多功能性下降,对区域生态安全和畜牧业可持续发展构成重大威胁^[1-2]。针对退化高寒草甸的生态修复,国内外研究证实免耕补播、围栏封育、减畜轮牧等技术措施在提升植被生产力和恢复土壤养分方面具有显著成效^[3-5]。其中,返青期休牧措施可显著提高草地植被的盖度和生物量^[6]。乡土物种补播,如垂穗披碱草、青海中华羊茅等,可以显著提高草地植被的盖度和生物量。研究表明,补播后地上生物量增加了55.74%^[7]。控鼠+补播等综合修复措施在重度退化草地治理效果显著^[8]。围栏封育结合施用有机肥+微生物菌肥能够改善土壤肥力,促进植物生长^[9]。然而,由于高寒草地空间分布格局差异大,高寒草地发育程度不均一,受气候变化、家畜放牧和啮齿动物等因素影响程度也不一致,常常形成高原鼠兔、高原鼢鼠、高原鼠兔+高原鼢鼠共生为主导的3种典型鼠害发生区,导致高寒草地退化和植被破碎化的不一致性。研究表明,高原鼠兔与高原鼢鼠的干扰机制存在显著差异^[10-11]。高原鼠兔的挖掘行为破坏了草地草皮层,导致“黑土型”退化草地的形成,出现大量裸地、土丘和洞口裸斑等干扰斑块^[12]。有研究表明高原鼠兔的活动对重度退化草地的影响尤为显著,表现为土壤坚实度降低、植物

生物量减少、地上生物量干湿比增大、植物丰富度指数增加等^[13]。其洞穴和推出的土丘受水冲、风蚀易造成土壤肥力损耗,土壤疏松,从而导致草群性质、结构和生产力受到破坏^[14-15]。高原鼠兔活动所造成的裸斑呈现分形几何不规则分布,而高原鼢鼠的斑块则呈规则几何圆形分布。高原鼠兔的干扰斑块在演替过程中经历了土丘形成阶段、斑块连通阶段和斑块扩散阶段,最终导致大面积退化斑块的出现,强烈抑制植被恢复。相比之下,高原鼢鼠的干扰斑块对退化草地的影响较小,因此在退化草地治理中,控制高原鼠兔种群密度比控制高原鼢鼠更重要^[16]。高原鼢鼠营地下生活,靠采食植物根茎为生,高原鼢鼠的挖掘活动会改变土壤的结构和肥力,形成土丘和塌陷,影响草地的平整度和水分分布^[17]。其活动导致的草地退化,具体表现为植物群落的改变,从以莎草科和禾本科植物为主转变为以杂类草植物为主的群落,降低土壤紧实度^[18]。这些变化进一步影响了土壤微生物群落和大型无脊椎动物群落的结构和功能^[19],并加剧陡坡强降雨区的土壤侵蚀与养分流失^[20]。在高原鼠兔与高原鼢鼠共生干扰区,两种鼠类的活动相互叠加,对高寒草地的破坏有着双重的影响^[21]。尽管现有修复措施取得一定成效,但近年来退化草地生态修复成效参差不齐,部分退化草地修复技术方案制定未针对以上三类退化类型,后期管护不到位,生态修复效果不理想,出现二次退化,生态修复成效在空间上表现不一致。这表明目前的生态修复技术体系在应对不同鼠害主导的退化类型时,其针对性、有效性

和可持续性仍需深入研究和优化。鉴于此,本文以河南县高原鼠兔干扰、高原鼯鼠干扰以及高原鼠兔与高原鼯鼠共生干扰下斑块化退化高寒草甸3个生态修复区为研究对象,通过测定生态修复区植物群落物种多样性和土壤理化性质的变化,揭示现有生态修复措施对不同鼠害干扰的响应,回答哪些技术可以集成,哪些不能集成,哪些技术需要创新提升等现实问题,在科学分析高寒草地生态修复后出现二次退化原因的基础上,形成可持续生态修复新技术模式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于青海省黄南藏族自治州河南蒙古族自治县(34°05′52″~34°56′36″N、100°53′06″~102°16′12″E),平均海拔约3600 m,属高原大陆性气候区,日照时间长、辐射强、热量低、昼夜温差大,年均温-1.3~1.6℃,年降水量597.3~615.5 mm,其中80%~90%的降水集中在5—9月,草地植物生长期为120~140 d,无霜期28 d^[22]。主要草地类型为高寒草甸,优势植物种包括矮生嵩草(*Carex alatauensis*)、高山嵩草(*C. parvula*)、青藏苔草(*C. moorcroftii*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)以及冷地早熟禾(*Poa crymophila*)等。据统计(2015 a)河南

县内天然草地存在不同程度的退化,其中高原鼠兔危害面积达到99 200 hm²,占全县可利用草场面积的15%,高原鼯鼠危害面积达到109 600 hm²,占全县可利用草场面积的17%^[23]。

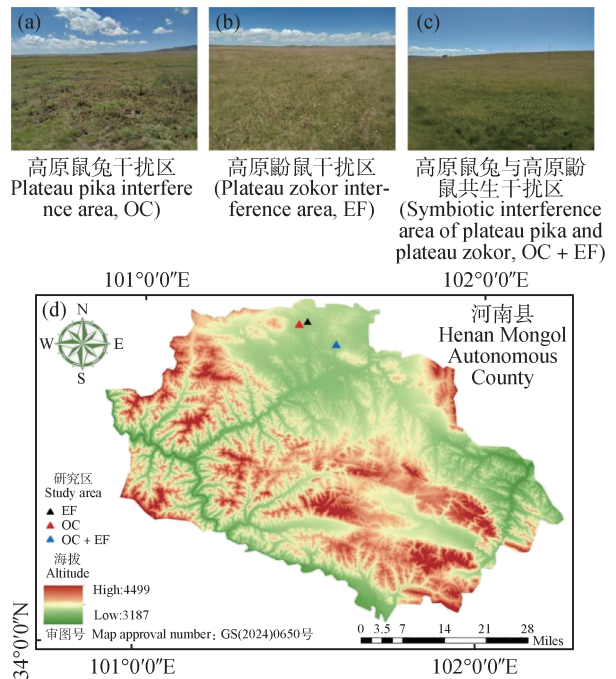


图1 3种干扰景观图及研究区位置分布

Fig. 1 Landscape appearance of three types of disturbed areas (a-c) and the map showing the location of the study area (d)

表1 研究区基本情况

Table 1 Basic information of the study area

研究区 Study area	海拔 Altitude/m	地理位置 Geographical location	补播后裸露斑块面积占比 Proportion of bare patch area after reseeding/%
高原鼠兔干扰样地(OC)	3547	101°45′39″E 34°84′67″N	≤16%
高原鼯鼠干扰样地(EF)	3544	101°47′83″E 34°85′44″N	≤3%
高原鼠兔与高原鼯鼠共生干扰样地(OC+EF)	3539	101°56′50″E 34°79′71″N	≤12%

1.2 样地选择

依托“河南县2022年第一批中央林业草原生态保护恢复项目”,在河南县南旗村退化高寒草甸,选取OC,EF,OC+EF三个生态修复区为研究对象(见图1、表1),且这三类干扰区的强度均为中度干扰,这些生态修复区技术路线为“作业区选择→鼠害防治→牧草品种选择→免耕施肥播种→建后管护”,使用19行以上分层免耕播种机进行播种,配套动力90马力以上,一次性完成开沟、播种、施肥、覆土、镇压作业。总播种量75.0 kg·hm⁻²,其中:同德

短芒披碱草(*Elymus breviaristatus* ‘Tongde’)52.5 kg·hm⁻²,青海草地早熟禾(*Poa pratensis* ‘Qinghai’)7.5 kg·hm⁻²,青海冷地早熟禾(*Poa crymophila* ‘Qinghai’)15.0 kg·hm⁻²。播种期为2022年5—6月,底肥为颗粒有机肥,施肥量为975.0 kg·hm⁻²,质量标准执行(NY/T525-2021)。为更好的保护修复的区域成效,退化草地生态修复后进行围栏建设,按照项目区实际情况结合围栏建设进行封育,建植当年全年禁牧,第二年开始生长期禁牧,11月封冻后至4月进行适当放牧利用。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 植物样品采集与分析 2024年8月中旬植物生长旺盛期,在OC,EF与OC+EF三个干扰研究区内,分别随机选取9个0.5 m×0.5 m的重复样方,进行样方内植被群落调查及土壤样品采集工作。植被调查时分别记录样方内的物种数、分种高度、盖度和密度,群落高度和盖度及经济类群地上生物量。植物群落特征调查结束后将样方内植物齐地面刈割带回实验室,将其在室内经杀青(105℃, 30 min),烘干(65℃, 48 h)至恒重后称取干重作为地上生物量^[24]。在样方中心处,用直径5 cm的根钻采集0~20 cm土壤样品,将该土壤样品置于纱布袋内清洗分离出植物根系在室内经杀青(105℃, 30 min),烘干(65℃, 48 h)至恒重后称取根系干重作为地下生物量^[25]。

将植物样品研磨后利用元素分析仪(Flash-EA1112, ThermoSci-entific, 美国)测定植物中碳元素与氮元素的含量。

1.3.2 土壤样品采集与分析 在植被采集后的样方中利用环刀法,采集土壤容重样品。使用直径5 cm的根钻采集0~20 cm的土壤样品用于测定土壤理化性质。将所采集的土壤样品剔除动植物残体和小石块,过2 mm筛后分为两部分储存。第一部分置于阴凉通风处风干,制成风干土用于测定土壤碳、氮、磷的含量,第二部分置于4℃冰箱保鲜保存,用于测定土壤含水量和土壤pH值。

参照鲍士旦^[26]第三版土壤农化分析,进行土壤物理化学性质的测定。其中,土壤pH值使用pHS-25酸度计(土水比=1:2.5)测定。土壤含水量采用烘干法测定(105℃, 24h);SOC含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定;土壤全氮(Soil total nitrogen, STN)和全磷(Soil total phosphorus, STP)含量用浓H₂SO₄消煮得到消煮液,土壤硝态氮(Nitrate nitrogen, NO₃⁻-N)、铵态氮(Ammonium nitrogen, NH₄⁺-N)含量用KCl溶液浸提得到浸提液, A-P含量用NaHCO₃溶液浸提得到浸提液,将上述三种液体利用AA3连续流动注射分析仪(AA3-Auto Analyzer III, 德国)测定得到相关含量。

1.4 数据处理

1.4.1 物种多样性指数计算方法 为比较不同鼠害干扰下植物物种多样性的变化特征,本研究计算了重要值、Shannon-Wiener指数(H)、Simpson指数

(D)、Margalef指数(R)和Pielou均匀度指数(J)。相关计算公式如下:

重要值=(相对密度+相对盖度+相对高度)/3 (1)

Shannon-Wiener指数: $H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ (2)

Simpson指数: $D = 1 - \sum P_i^2$ (3)

Margalef指数: $R = \frac{(S-1)}{\ln N}$ (4)

Pielou均匀度指数: $J = H/\ln S$ (5)

式中, S 表示物种总数; N 表示所有物种的个体总数; P_i 表示第 i 种植物的个体数在总个体数中所占的比例, $P_i = N_i/N$ ^[27-28]。

1.4.2 统计分析 采用Excel 2010软件进行原始数据的整理。使用IBM SPSS Statistics 25.0软件进行数据统计分析:采用单因素方差分析(One-way ANOVA)($P < 0.05$)检验不同干扰下植物理化性质和土壤理化性质的差异;利用GraphPad Prism 9.1.0.221与ArcGIS 2013软件进行制图^[29-30]。数据采用算数平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸植物群落特征对不同鼠害干扰的响应

由图2可知,OC+EF的物种Shannon-Wiener指数极显著高于OC($P < 0.01$),OC+EF的Simpson指数显著高于OC($P < 0.05$),OC+EF的Pielou均匀度指数极显著高于OC($P < 0.01$),表明生态修复后OC+EF中物种多样性的提高更显著。Margalef指数在三种鼠害干扰之间无显著差异。由图2可知,生态修复之后OC,EF及OC+EF的物种数由多到少依次呈现为OC+EF>OC>EF,生态修复后EF的物种数显著差异于其他两个干扰($P < 0.05$)。

由表2可知,退化高寒草甸生态修复后不同鼠害干扰的草地群落物种组成发生了明显变化。在OC下,同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾、高山嵩草为优势种,其重要值分别为0.31, 0.17, 0.17和0.15;在EF下,同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾、鹅绒委陵菜(*Argentina anserina*)的重要值位居前四位,重要值分别为0.35, 0.22, 0.14, 0.10;在OC+EF下,同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾成为群落优势种,重要值分别为0.25, 0.14, 0.13。三个

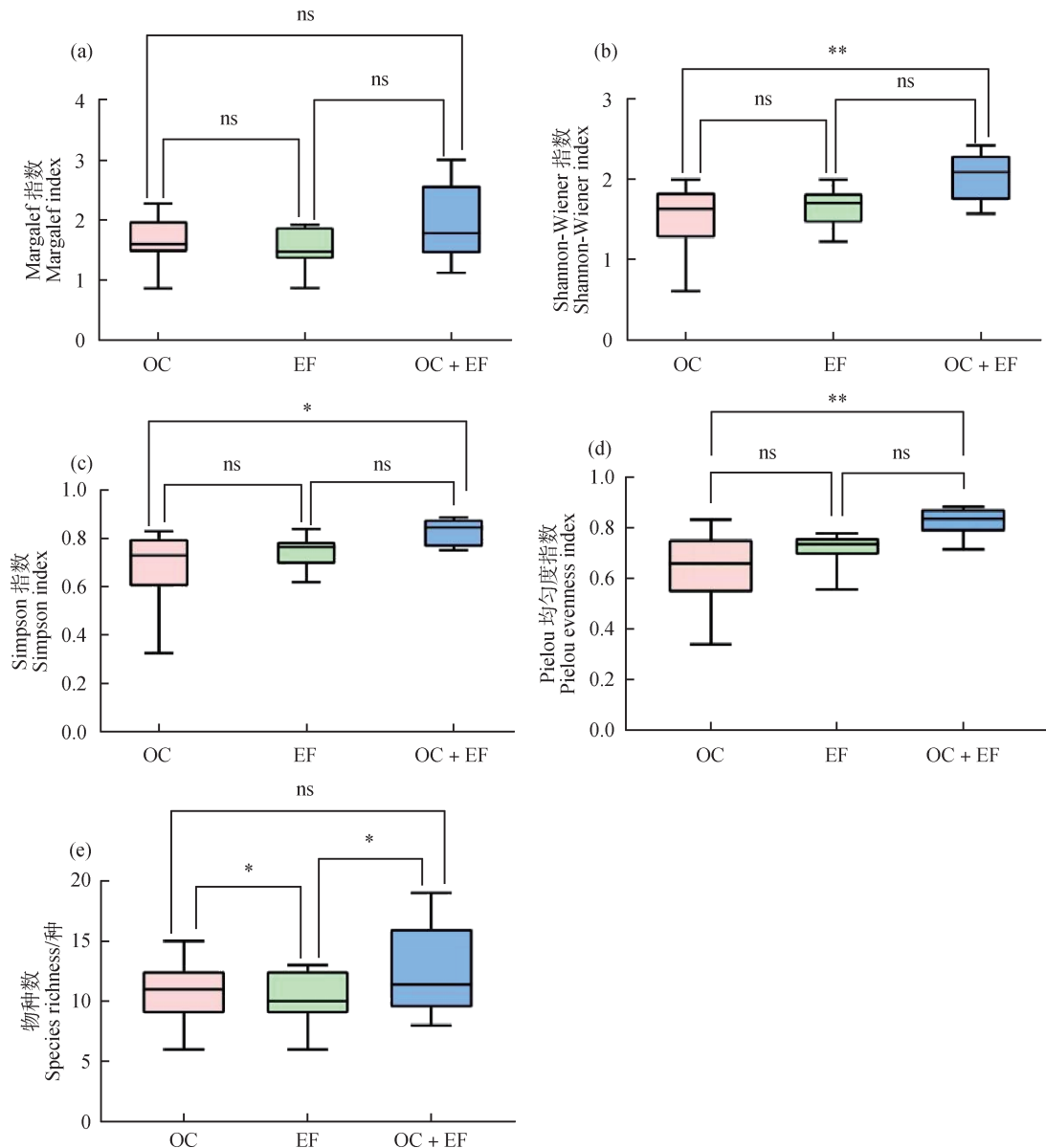


图 2 植物群落物种多样性对不同鼠害干扰的响应

Fig. 2 Responses of species diversity in plant communities to different types of rodent disturbance

注:图中*表示差异达到显著水平($P<0.05$);**表示差异达到极显著水平($P<0.01$);ns表示差异不显著;OC为高原鼠兔干扰下斑块化退化高寒草甸, $n=9$;EF为高原鼢鼠干扰下斑块化退化高寒草甸, $n=9$;OC+EF为高原鼠兔和高原鼢鼠共生干扰下斑块化退化高寒草甸, $n=9$ 。下同

Note: In the figure, * indicates significant difference level ($P<0.05$); ** indicates a highly significant difference level ($P<0.01$); ns indicates no significant difference. OC represents the patchily degraded alpine meadow by the disturbance of plateau pika, with $n=9$; EF represents the patchily degraded alpine meadow under the disturbance of plateau zokors, with $n=9$; OC+EF represents the patchily degraded alpine meadow in the symbiotic disturbance of plateau pikas and plateau zokors, with $n=9$. The same applies hereinafter

鼠害干扰区均表现为同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾的优势度较高;其中EF中同德短芒披碱草的重要值显著高于OC+EF,青海冷地早熟禾的重要值显著高于OC与OC+EF($P<0.05$)。因此,OC,EF,OC+EF三种干扰生态修复成效差异显著($P<0.05$),从优到次排序依次为:EF>OC+EF>OC。

由表3可知,生态修复之后OC,EF及OC+EF的植被总盖度与植物平均高度均表现为EF>OC+EF>OC,EF在植被总盖度方面显著高于其他两个干扰($P<0.05$),EF与OC+EF两个干扰的植株平均高度显著高于OC($P<0.05$)^[31]。EF的地上生物量在四类植物上表现均高于其他两个干扰;其中,EF的禾本科地上生物量比OC和OC+EF分别高出

表 2 不同干扰下群落物种组成及其重要值

Table 2 Species composition of the plant community and the importance values of species in different disturbed areas

研究区 Study area	主要植物物种(重要值) Major plant species (importance value)
OC	同德短芒披碱草(0.31±0.11 ^{ab})、青海冷地早熟禾(0.17±0.01 ^b)、青海草地早熟禾(0.17±0.03 ^a)、高山嵩草(0.15±0.11)、针茅(<i>Stipa capillata</i>)(0.09±0.06)、密花香薹(<i>Elsholtzia densa</i>)(0.08±0.08)
EF	同德短芒披碱草(0.35±0.08 ^a)、青海冷地早熟禾(0.22±0.04 ^a)、青海草地早熟禾(0.14±0.06 ^a)、鹅绒委陵菜(<i>Argentina anserina</i>)(0.10±0.05)、矮生嵩草(0.09±0.05)、洽草(<i>Koeleria macrantha</i>)(0.09±0.04)
OC+EF	同德短芒披碱草(0.25±0.08 ^b)、青海冷地早熟禾(0.14±0.02 ^b)、青海草地早熟禾(0.13±0.07 ^a)、中华羊茅(<i>Festuca sinensis</i>)(0.11±0.08)、高山嵩草(0.11±0.05)、针茅(0.11±0.02)

注:同一物种不同小写字母表示变量在不同扰动之间存在显著差异($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters for the same species indicate significant differences in variables among different disturbances ($P<0.05$)

162.30%,185.80%,显著高于OC与OC+EF两个干扰研究区($P<0.05$);EF的豆科地上生物量比OC和OC+EF分别高出406.50%,82.60%,EF显著高于OC($P<0.05$);EF的莎草科地上生物量比

OC和OC+EF样地分别高出78.68%,233.33%;EF的其他杂草类地上生物量比OC和OC+EF样地分别高出342.09%,10.71%;这说明生态修复之后EF修复效果最好。

表 3 生态修复后试验样区群落高度、盖度及经济类群生物量基本情况

Table 3 Community height, coverage, and the biomass of economic groups in the experimental sample area after ecological restoration

研究区 Study area	植被总盖度 Total vegetation coverage/%	平均高度 Mean height/cm	地上生物量 Above-ground biomass/(g·m ⁻²)			
			禾本科 Poaceae	豆科 Fabaceae	莎草科 Cyperaceae	其他(杂类草) Others (weeds)
OC	84.33±9.21 ^b	47.70±12.19 ^b	734.00±23.27 ^b	12.40±1.77 ^b	89.60±8.48 ^{ab}	230.00±19.60 ^b
EF	97.33±3.46 ^a	168.23±35.29 ^a	1925.2±71.28 ^a	62.80±6.04 ^a	160.00±14.64 ^a	1016.80±64.41 ^a
OC+EF	88.56±6.84 ^b	139.47±26.02 ^a	673.60±20.79 ^b	34.40±3.67 ^{ab}	48.00±5.88 ^b	918.40±30.80 ^a

注:同列数据中不同小写字母表示变量在不同扰动之间存在显著差异($P<0.05$);数据采用算数平均值±标准差表示

Note: In the data of the same column, different lowercase letters indicate that there are significant differences in variables among different disturbances ($P<0.05$). The data are presented as arithmetic mean ± standard deviation

由图3可知,生态修复后植物叶片C元素含量在不同干扰下的差异不大,N元素含量在不同干扰下均有一定差异。禾本科植物C含量为42.43%~43.12%,N含量为1.38%~1.78%;豆科植物C含量为42.94%~43.52%,N含量为1.43%~1.81%;莎草科植物C含量为43.00%~43.60%,N含量为1.39%~1.97%;其他杂类草植物C含量为41.81%~43.22%,N含量为2.04%~2.91%。其中EF与OC+EF中豆科植物的C含量显著高于OC($P<0.05$);禾本科、莎草科、其他杂类草的C含量在三个干扰区中均无显著差异。OC中禾本科植物的N含量显著高于EF与OC+EF($P<0.05$),豆科植物的N含量显著高于EF($P<0.05$)。

2.2 高寒草甸土壤特征对不同鼠害干扰的响应

由图4可知,退化高寒草甸生态修复后,EF的SOC含量显著高出OC的272.50%($P<0.05$)。从SOC含量来看,三个生态修复区成效由高到低依次为EF>OC+EF>OC。OC的TN和NO₃⁻-N含量分别显著高出OC+EF的44.65%,88.89%($P<$

0.05);OC的NO₃⁻-N含量显著高出EF的70.00%($P<0.05$)。OC,EF,OC+EF三个干扰之间的TP,A-P及NH₄⁺-N的差异不显著。研究区土壤呈微碱性,土壤pH值为7.42~7.59;生态修复后,OC的土壤含水量显著高于EF与OC+EF($P<0.05$),分别高出60.00%和30.00%;EF与OC+EF的容重显著高于OC($P<0.05$),分别高出33.33%和37.00%^[32]。

3 讨论

针对河南省高寒草甸典型退化草地,本研究通过分析“作业区选择→鼠害防治→牧草品种选择→免耕施肥播种→建后管护”生态修复措施对OC,EF及OC+EF下高寒草甸的响应,揭示了不同鼠害干扰对植物群落和土壤理化特征的影响。研究结果验证了修复措施的有效性,为斑块化退化草甸的精准修复提供了理论依据。

3.1 生态修复后植物群落对不同鼠害干扰的响应

多项研究表明,上述生态修复措施可显著增加

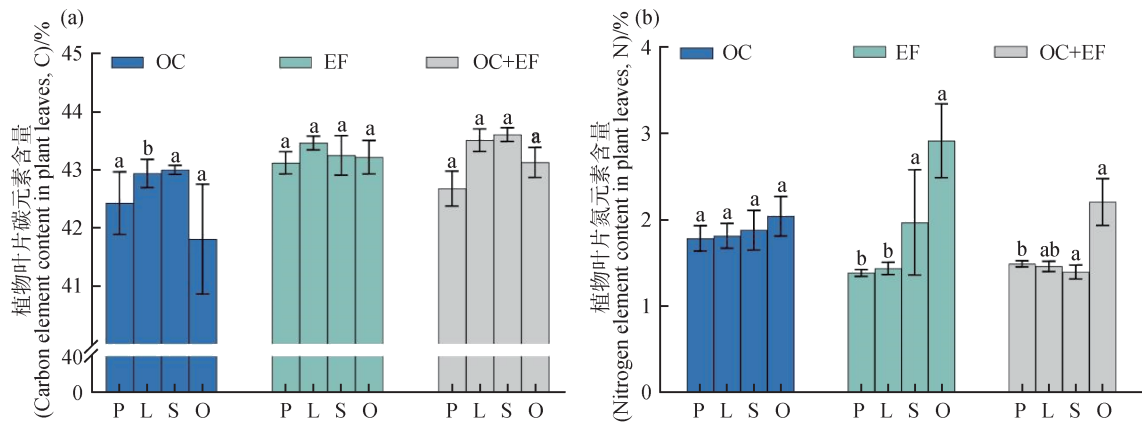


图3 植物叶片C、N元素含量对不同鼠害干扰的响应

Fig. 3 Responses of carbon (C) and nitrogen (N) element contents in plant leaves to different types of rodent disturbance

注:图中不同小写字母表示同一植物类别不同鼠害干扰下差异显著($P < 0.05$);P代表禾本科植物;L代表豆科植物;S代表莎草科植物;O代表其他科植物

Note: In the figure, different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different types of rodent disturbance for the same plant category. P, Poaceae plants; L, Leguminosae plants; S, Cyperaceae plants; O, Plants from other families

植物群落的物种丰富度和多样性指数。段成伟等^[33]河南县退化高寒草甸生态修复的研究证实,上述技术措施能显著增加高寒草甸物种丰富度指数。本研究中,草地物种多样性和补播牧草同德短芒披碱草优势度在OC+EF中表现最佳。这与李鑫洋等^[34]在冀西北坝上地区的研究结果一致。本研究结果显示,生态修复后EF的禾本科地上生物量显著优于其他干扰类型,且三种鼠害干扰样地植被盖度、高度、地上生物量均有所提高,其中EF的修复效果最为显著,OC+EF效果次之,OC最差。这与李苗等^[35]在黑土滩退化草地上的研究结果一致。因此,从生态修复后草地植被盖度、高度与多样性指数调查结果可以得出结果,三种鼠害干扰样地的生态修复效果为EF>OC+EF>OC。

3.2 生态修复后土壤特征对不同鼠害干扰的响应

相关研究结果表明,小型啮齿动物如高原鼠兔和高原鼢鼠的暴发活动对植被和土壤特性有显著影响。本文研究结果表明退化高寒草甸生态修复后,SOC含量EF优于OC。其中高原鼢鼠主要以植物的地下部分(如根系)为食,并且其挖掘活动范围广且深,这会导致更多的植物残体和有机物质混入土壤深层,这些根系残留在土壤中,经过微生物分解后增加了土壤有机碳含量。相比之下,高原鼠兔主要食用植物的地上部分,对土壤的翻动和有机物质的掩埋作用相对较弱。本文研究结果表明,OC的TN和 NO_3^- -N含量对比其他样地较高,这可能与小型啮齿动物的食物来源有关。高原鼠兔主要食用

地上植物部分,植物地上部分的氮素含量相对较高,因此,高原鼠兔的粪便和尿液中氮素的归还量较多。在草地土壤中,这些氮素经过微生物的矿化和硝化作用等过程,产生较多的 NO_3^- -N,由此导致OC的TN和 NO_3^- -N含量高于EF,这与于成等^[36]的研究结果一致。在OC+EF中,由于高原鼢鼠的挖掘活动改变了土壤结构和微生物群落,影响了氮素的矿化和硝化过程,导致 NO_3^- -N含量降低。因此,OC的TN和 NO_3^- -N含量显著高出OC+EF。

3.3 高原鼢鼠和高原鼠兔的行为活动是导致生态修复效果差异的主要原因

高原鼢鼠的深层次挖掘活动(20~50 cm)将地表凋落物和根系残体埋入深层土壤,促进有机碳的垂直迁移与稳定化^[37],同时高原鼢鼠活动形成的洞穴网络改善了土壤通气性和水分渗透性,加速微生物对有机质的分解^[38]。这与Huang等^[39]在青藏高原的研究结果一致,高原鼢鼠扰动可使土壤有机碳储量提升30%~50%。杨晶等^[40]的研究显示,随着高原鼢鼠种群密度增加,土壤有机碳含量呈上升趋势,可能与扰动加速植物残体混合和根系分泌物增加有关。刘锦上等^[41]报道,适度洞道空间(35%~45%)能促进植被多样性,进而通过植物生物量增加间接提升碳输入。叶国辉^[42]的研究表明,在高原鼢鼠重度干扰下,土壤有机碳和全氮含量显著下降。这可能是由于过度扰动破坏植物根系(减少碳输入)并加速有机质分解。相比之下,高原鼠兔以地表取食为主,其活动所造成的跑道导致植被破碎化,

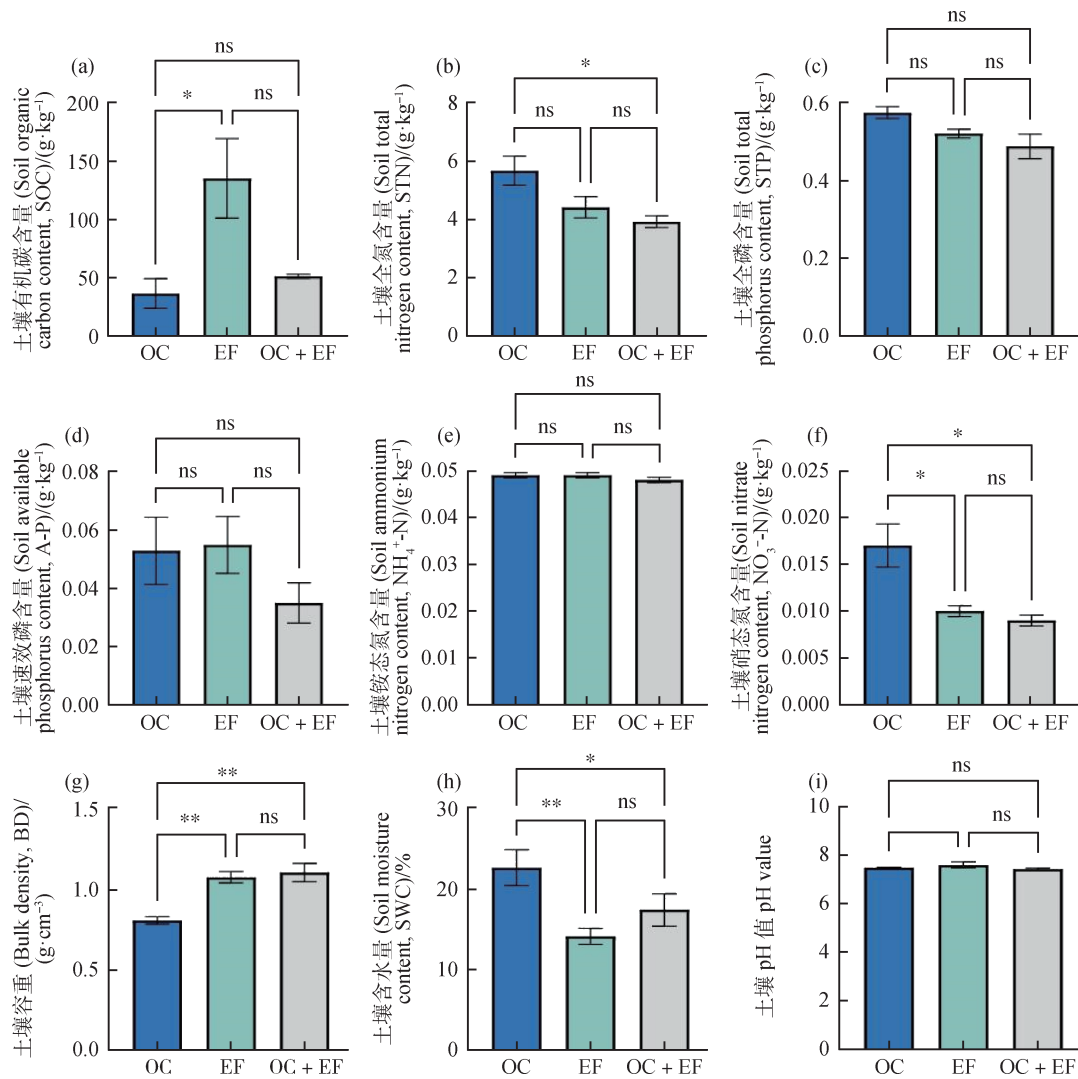


图 4 土壤特征对不同鼠害干扰的响应

Fig. 4 Responses of soil characteristics to different types of rodent disturbance

注:图中*表示同一土壤特征在不同鼠害干扰下差异显著($P < 0.05$);ns表示表示同一土壤特征在不同鼠害干扰下差异不显著

Note: In the figure, * indicates a significant difference ($P < 0.05$) in the same soil characteristics in different types of rodent disturbance; ns indicates no significant difference in the same soil characteristic under different types of rodent disturbance

且高原鼠兔的土壤扰动范围较浅,限制了SOC的积累(表4)^[43]。这与一些在若尔盖湿地和青海湖流域的研究结果一致,表明高原鼠兔活动将下层土壤转移至地表,改变了土壤通气状况,显著增加BD,降低了SOC含量^[44-45]。

EF中禾本科与豆科植物的优势度较高,可能与高原鼢鼠对深根性植物的偏好有关,此类植物能更高效利用深层养分^[46]。有研究发现,EF深根系植物的生物量占比较高,OC的深根系植物生物量逐渐减少,杂类草功能群生物量增加^[47]。而OC+EF中两者的交互作用可能引发竞争性资源分配,削弱了单一干扰的正效应,这与赵国琴等^[48]在青海湖流域高寒草地研究中提出的高原鼠兔和高原鼢鼠的

干扰行为相互作用对高寒草甸生态系统产生了显著的负效应的结果相符。

3.4 植物群落与土壤养分有效利用的协同响应原因

EF的SOC含量显著升高,为植物根系发育提供了碳源,而较低的NO₃⁻-N含量(对比OC降低70%)可能减少了氮素淋失风险,促进养分循环闭合^[49]。这与胡同欣等^[50]和翁伯琦等^[51]的研究结果一致,表明碳氮协同提升是生态修复的关键机制。EF的豆科植物地上生物量(62.80 g·m⁻²)显著高于其他干扰,其根瘤菌的固氮能力可补充土壤氮库,缓解高寒草甸的氮限制^[52]。其中OC中较高的TN

和 NO_3^- -N含量(表4)可能与高原鼠兔排泄物的氮素归还有关,这与张玉霞等^[53]在高寒草地上的研究结果一致;但过量 NO_3^- -N易通过淋溶流失,长期可能加剧土壤酸化(pH OC7.48 vs. EF7.59),需通过调控放牧强度维持氮平衡。这与Bai等^[54]在内蒙古草原的研究结果相符,表明高原鼠兔活动导致的退化草地 NO_3^- -N淋失量显著高于自然草甸的 NO_3^- -N淋失量。

3.5 生态修复后放牧管控措施和鼠害二次暴发原因

如果高寒草地生态修复后没有进行禁牧措施,在放牧活动的影响下高原鼢鼠和高原鼠兔种群数量会快速恢复,导致草地二次退化现象发生。研究发现OC干扰的高原鼠兔种群数量恢复速度最快,由于高原鼠害的高密度和迅速扩散的能力,一旦修复区的放牧加重和防控措施中断,鼠害可能迅速反弹^[55-57]。

土壤水分是青藏高原斑块化退化高寒草甸生态修复的关键限制因子,青藏高原近年冻融交替频率增加,可能加剧土壤侵蚀、土壤水分散失,尤其OC,其表层土壤松散区域,易引发裸斑再生^[58-59]。因此,在生态修复过程中需要采取重度镇压措施或者覆盖遮阴网/无纺布可以改善和维持退化高寒草甸各类斑块的表层水分,有利于提高其生态修复的治理成效。

4 结论

河南县退化高寒草甸生态修复后,在不同鼠害干扰下,播种牧草同德短芒披碱草优势度最高,在高原鼢鼠干扰研究区中优势度达到极显著水平。高原鼠兔和高原鼢鼠共生干扰研究区草地物种数最多,植被总盖度与植物平均高度均表现为高原鼢鼠干扰研究区>高原鼠兔和高原鼢鼠共生干扰研究区>高原鼠兔干扰研究区。高原鼠兔和高原鼢鼠共生干扰研究区的Shannon-Wiener指数极显著高于高原鼠兔干扰研究区,Simpson指数显著高于高原鼠兔干扰研究区。退化高寒草甸在生态修复后,高原鼢鼠干扰研究区的土壤有机碳含量显著高出高原鼠兔干扰研究区,高原鼠兔干扰研究区全氮、硝态氮含量显著高出高原鼠兔和高原鼢鼠共生干扰研究区,三个鼠害干扰研究区的土壤全磷、速

效磷及铵态氮含量无显著差异。总之,不同鼠害干扰区生态修复效果存在显著差异,其中高原鼢鼠干扰研究区生态修复效果最好,共生干扰研究区次之,高原鼠兔干扰研究区最差。因此,在青藏高原退化草地生态修复实践中高原鼠兔干扰的高寒草甸,最容易形成两次退化现象。

参考文献

- [1] 胡雷,阿的鲁骥,字洪标,等. 高原鼢鼠扰动及恢复年限对高寒草甸土壤养分和微生物功能多样性的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(9):2794-2802
HU L, ADE L J, ZI H B, et al. Effects of plateau zokor disturbance and restoration years on soil nutrients and microbial functional diversity in alpine meadow [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2794-2802
- [2] 杨元武,李希来,周旭辉,等. 高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J]. 草地学报,2016,24(6):1211-1217
YANG Y W, LI X L, ZHOU X H, et al. Study on relationship between plant community degradation and soil environment in an alpine meadow [J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(6): 1211-1217
- [3] 段成伟. 黄河源区高寒草甸斑块化退化机理与其恢复研究[D]. 西宁:青海大学,2023,63-143
DWAN C W. Study on mechanisms of alpine meadow patchy-degradation and its restoration in the Source Zone of the Yellow River [D]. Xining: Qinghai University, 2023, 63-143
- [4] 刘延斌,张典业,张永超,等. 不同管理措施下高寒退化草地恢复效果评估[J]. 农业工程学报,2016,32(24):268-275
LIU Y B, ZHANG D Y, ZHANG Y C, et al. Evaluation of restoration effect in degraded alpine meadow under different regulation measures [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 268-275
- [5] 苏建红. 围栏封育对亚高山草原土壤质量的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013:41-44
SU J H. Effects of enclosure on soil quality in the Subalpine Steppe [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013: 41-44
- [6] 马玉寿,李世雄,王彦龙,等. 返青期休牧对退化高寒草甸植被的影响[J]. 草地学报,2017,25(2):290-295
MA Y S, LI S X, WANG Y L, et al. Effect of rest-grazing in the greenup period on degraded vegetation in Alpine Meadow [D]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(2): 290-295
- [7] 郑华平,陈子萱,牛俊义,等. 补播禾草对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. 草业学报,2009,18(3):28-33
ZHENG H P, CHEN Z X, NIU J Y, et al. Effects of interseed-ing on plant diversity and productivity in Maqu alpine desertified meadow [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(3): 28-33
- [8] 刘承杰,李智燕,王汝富,等. 综合修复措施对高寒重度退化草地植被群落特征的影响[J]. 甘肃畜牧兽医,2022,52(9):

- 62-65
LIU C J, LI Z Y, WANG R F, et al. The Effects of comprehensive restoration measures on the characteristics of vegetation communities in alpine severely degraded grasslands[J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2022, 52(9): 62-65
- [9] 李智燕, 杨浩, 莫负涛, 等. 综合修复措施对高寒退化草地土壤特性的影响[J]. 甘肃畜牧兽医, 2023, 53(6): 111-116
LI Z Y, YANG H, MO F T, et al. The effects of comprehensive restoration measures on soil properties of alpine degraded grasslands[J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2023, 53(6): 111-116
- [10] 宋梓涵, 李希来, 李杰霞, 等. 高寒草甸不同扰动斑块植物功能群和根土复合体特征变化研究[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 31
SONG Z H, LI X L, LI J X, et al. Characteristics of plant functional groups and root-soil complexes of different disturbed patches in alpine meadow[J]. Ecological Science, 2022, 41(1): 31-38
- [11] 刘伟, 王溪, 周立, 等. 高原鼠兔对小嵩草草甸的破坏及其防治[J]. 兽类学报, 2003, 23(3): 214-219
LIU W, WANG X, ZHOU L, et al. Studies on destruction prevention and control of plateau pikas in kobresia pygmaea meadow[J]. Acta Theriologica Sinica, 2003, 23(3): 214-219
- [12] 刘伟, 王启基, 王溪, 等. 高寒草甸“黑土型”退化草地的成因及生态过程[J]. 草地学报, 1999(4): 300-307
LIU W, WANG Q J, WANG X, et al. Ecological process of forming “Black-Soil-Type” degraded grassland[J]. Acta agrestia sinica, 1999(4): 300-307
- [13] 张卫红, 苗彦军, 赵玉红, 等. 高原鼠兔对西藏邦杰塘高寒草甸的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 115-122
ZHANG W H, MIAO Y J, ZHAO Y H, et al. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on alpine meadow in Tibet[J]. Acta agrestia sinica, 2018, 27(1): 115-122
- [14] KHAN A A, HUSSAIN I, MUNIR S. Munir. Control of rodent damage to groundnuts in the Pothwar Plateau region of Pakistan [J]. Pakistan Journal of Zoology, 2009, 41(3): 203-207
- [15] 肖运峰, 梁杰荣, 杜庆, 等. 高原鼠兔对不同草场植被类型的危害特点及植被恢复的途径[J]. 中国草原, 1979(2): 32-48
XIAO Y F, LIANG J R, DU Q, et al. The damage characteristics of plateau pika on different grassland vegetation types and the approaches for vegetation restoration [J]. Chinese Journal of Grassland, 1979(2): 32-48
- [16] 赵健赞, 姜传礼, 李国荣, 等. 高原鼠兔干扰与高寒草甸退化的时空耦合关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 212-219
ZHAO J Y, JIANG C L, LI G R, et al. Spatiotemporal coupling relationship between plateau pika disturbance and alpine meadow degradation [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2023, 43(5): 212-219
- [17] 梁大林, 唐海萍. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 287-300
LIANG D L, TANG H P. Analysis of vegetation changes and water temperature driving factors in two alpine grasslands on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta ecologica sinica, 2022, 42(1): 287-300
- [18] 于海玲, 樊江文, 李愈哲, 等. 高原鼠兔干扰对三江源区高寒草甸群落特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1902-1910
YU H L, FAN J W, LI Y Z, et al. Effects of *Myospalax baileyi* disturbance on plant community at alpine meadow in Three Rivers Headwater Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1902-1910
- [19] 叶国辉. 高原鼠兔 (*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 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023, 28-31
YE G H. Effect of *Eospalax baileyi* disturbance on the species and functional diversity of plant and soil biota in Alpine Meadow [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023, 28-31
- [20] LI G R, LI X L, LI J F, et al. Influences of plateau zokor burrowing on soil erosion and nutrient loss in alpine meadows in the Yellow River source zone of West China [J]. Water, 2019, 11(11): 2258
- [21] 樊松林, 仙巍, 杨增平. 基于低空遥感的若尔盖高寒草地鼠害监测研究[J]. 世界生态学, 2024, 13(1): 1
FAN S L, XIAN W, YANG Z P. Research on monitoring rodent pests in ruoergai alpine grassland based on Low-Altitude remote sensing [J]. International Journal of Ecology, 2024, 13(1): 1
- [22] 柴瑜, 李希来, 于金峰, 等. 有机肥施用量对黄河源不同坡向退化高寒草甸土壤团聚体及有机碳的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1613-1620
CHAI Y, LI X L, YU J F, et al. Effects of different applications of organic fertilizer in degraded alpine meadow on soil aggregates and organic carbon in the Source Zone of Yellow River [J]. Acta Agrestia sinica, 2022, 30(7): 1613-1620
- [23] 王晓勇. 海晏县草地鼠虫害防治现状与措施 [J]. 青海草业, 2006, 3(4): 46-48, 52
WANG X Y. Current situation and measurement of controlling grassland rodents and pests in Haiyan County [J]. Qinghai prataculture, 2006, 3(4): 46-48, 52
- [24] 赵文, 尹亚丽, 李世雄, 等. 祁连山不同类型草地植被群落及牧草营养特征研究 [J]. 草地学报, 2022, 30(6): 1328-1335
ZHAO W, YIN Y L, LI S X, et al. Study on vegetation communities and forage nutrition characteristics of different types of grassland in Qilian Mountains [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(6): 1328-1335
- [25] 徐文印, 苏乐乐, 秦燕, 等. 施肥和控鼠对黄河源区斑块化退化高寒草甸植被特征及植物化学计量的影响 [J]. 西北农业学报, 2023, 32(11): 1767-1776
XU W Y, SU L L, QIN Y, et al. Effects of fertilization and rodent control on vegetation characteristics and plant stoichiometry of degraded alpine meadow in Source Zone of Yellow River [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(11):

- 1767-1776
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:14-97
BAO S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis (3rd Edition)[M]. Beijing:China Agricultural Press, 2000: 14-97
- [27] 符明珠,符溶,杜尚嘉,等. 2种人工林演变的次生林植物群落特征与土壤理化性质研究[J]. 热带作物学报, 2023, 44(6): 1288-1296
FU M Z, FU R, DU S J, et al. Plant community characteristics and soil physical and chemical properties of secondary forests evolved from two plantations[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(6):1288-1296
- [28] 高荣,成向荣. 间伐对杉木人工林林下植物多样性及其水源涵养能力研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(8):7-11, 62
GAO R, CHENG X R. Effect of thinning on understory plant diversity and water conservation capacity in cunninghamia lanceolata plantation[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(8):7-11, 62
- [29] 高佩,李希来,柴瑜,等. 羊板粪与枯草芽孢杆菌配施对退化高寒草甸土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(11):29-36
GAO P, LI X L, CHAI Y, et al. Effects of sheep plate manure and bacterial fertilizer on the soil nutrient and enzyme activity of degenerate alpine mead[J]. Soils and Fertilizers in China, 2024 (11):29-36
- [30] 孙华方,李希来,金立群,等. 黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化[J]. 环境科学, 2022, 43(9):4662-4673
SUN H F, LI X L, JIN L Q, et al. Changes in soil bacterial community diversity in degraded patches of alpine meadow in the Source Area of the Yellow River[J]. Environmental Science, 2022, 43(9):4662-4673
- [31] 张文丽,夏会娟,张远,等. 东辽河河岸带草本植物物种多样性及群落数量分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5):1142-1149
ZHANG W L, XIA H J, ZHANG Y, et al. Herbaceous species diversity and community quantitative analysis in the riparian zone of East Liaohe River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5):1142-1149
- [32] 邢光延,申紫雁,刘昌义,等. 三种影响条件下黄河源区高寒草地土壤物理及力学性质[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 180-189
XING G Y, SHEN Z Y, LIU C Y, et al. Soil physical and mechanical properties of alpine grassland in the source region of the Yellow River under three influence conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(16):180-189
- [33] 段成伟,李希来,柴瑜,等. 不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(18):7652-7662
DUAN C W, LI X L, CHAI Y, et al. Effects of different rehabilitation measures on plant community and soil nutrient of degraded alpine meadow in the Yellow River Source[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18):7652-7662
- [34] 李鑫洋,杜俊颖,杨莉,等. 免耕补播对冀西北坝上地区草原植被群落特征的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(9):2249-2254
LI X Y, DU J Y, YANG L, et al. Effects of no-tillage reseed-ing on plant community characteristics in northwest of Hebei Province[J]. Acta agrestia sinica, 2022, 30(9):2249-2254
- [35] 李苗,马玉寿,李世雄,等. 黑河上游黑土滩退化草地植被恢复试验研究[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2015, 45(6):7-10
LI M, MA Y S, LI S X, et al. Experiment of vegetation restoration on the Hetutan degradation grassland in Heihe river upstream[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2015, 45(6):7-10
- [36] 于成,贾婷婷,庞晓攀,等. 高原鼠兔干扰强度对高寒草甸土壤碳氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3):768-778
YU C, JIA T T, PANG X P, et al. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbing soil carbon and nitrogen distribution in Alpine Meadow[J]. Acta pedologica sinica, 2016, 53(3):768-778
- [37] 田永亮,姬程鹏,楚彬,等. 高原鼯鼠挖掘活动对采食洞道土壤水肥的影响[J]. 草原与草坪, 2016, 36(4):16-20
TIAN Y L, JI C P, CHU B, et al. Effect of burrowing activity of plateau zokor (*Myospalax baileyi*) on soil moisture and nutrition in foraging tunnel[J]. Grassland and Turf, 2016, 36(4): 16-20
- [38] 姬程鹏,杨思维,周延山,等. 祁连山东段高原鼯鼠洞道土壤微生物和土壤酶[J]. 兽类学报, 2017, 37(3):284-292
JI C P, YANG S W, ZHOU Y S, et al. Soil microorganisms and enzymes in burrows of plateau zokor in eastern Qilian Mountain region[J]. Acta Theriologica Sinica, 2017, 37(3): 284-292
- [39] HUANG M, GAN D Z, LI Z, et al. Unexpected no significant soil carbon losses in the Tibetan grasslands due to rodent bioturbation[J]. PNAS Nexus, 2023, 2(3):314
- [40] 杨晶,张倩,姚宝辉,等. 高原鼯鼠扰动对高寒草甸土壤理化特性及植物生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 492-499
YANG J, ZHANG Q, YAO B H, et al. Effects of plateau zokor disturbance on soil physicochemical properties and plant biomass in alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 492-499
- [41] 刘锦上,张卫国,江小雷,等. 高原鼯鼠洞道空间对高寒草甸植被性状的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6):927-932
LIU J S, ZHANG W G, JIANG X L, et al. Effects of burrow space of plateau zokor on vegetation characters in alpine meadows[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(6):927-932
- [42] 叶国辉,楚彬,张飞宇,等. 祁连山东段高原鼯鼠栖息地植物群落物种分布与土壤因子的关系[J]. 草原与草坪, 2024, 44(1):168-174
YE G H, CHU B, ZHANG F Y, et al. Relation between plant community species distribution and soil factors in plateau zokor habitat in alpine meadow, the eastern Qilian Mountains[J]. Grassland and Turf, 2024, 44(1):168-174

- [43] 宋梓涵,李希来,李杰霞,等. 高原鼠兔跑道对高寒草甸退化斑块扩大与连通的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3276-3284
SONG Z H, LI X L, LI J X, et al. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) trails on enlargement and connection of degraded patches in alpine meadow [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3276-3284
- [44] 刘文玲,马育军,吴艺楠,等. 青海湖流域高原鼠兔扰动对土壤养分及微生物量碳氮的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 254-260
LIU W L, MA Y J, WU Y N, et al. Effects of plateau pika's disturbance on soil nutrients, microbial biomass C and N of different land surface types in Qinghai Lake watershed [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(2): 254-260
- [45] ZHOU Y, JIAO S, Li N, et al. Impact of plateau pikas (*Ochotona curzoniae*) on soil properties and nitrous oxide fluxes on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. PLOS ONE, 2018, 13(9): e0203691
- [46] 舒朝成. 高原鼯鼠采食洞道干扰对植物群落及土壤养分的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019, 13-23
SHU C C. The effects of plateau zokor feeding-burrows disturbance on plant community and soil nutrients [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019, 13-23
- [47] 金少红,刘彤,庞晓攀,等. 高原鼠兔干扰对青海湖流域高山嵩草草甸植物多样性及地上生物量的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(5): 29-39
JIN S H, LIU T, PANG X P, et al. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbances on plant species diversity and aboveground plant biomass in a *Kobresia pygmaea* meadow in the Qinghai Lake Region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(5): 29-39
- [48] 赵国琴,李广泳,马文虎,等. 高原鼠兔扰动对高寒草地植物群落特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2122-2128
ZHAO G Q, LI G Y, MA W H, et al. Impacts of *Ochotona palasi* disturbance on alpine grassland community characteristics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2122-2128
- [49] SHU X Y, HU Y F, LIU W J, et al. Linking between soil properties, bacterial communities, enzyme activities, and soil organic carbon mineralization under ecological restoration in an alpine degraded grassland [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1131836
- [50] 胡同欣,丁海磊,孙龙. 火干扰对森林土壤氮素循环与转化的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2024, 43(2): 372-382
HU T X, DING H L, SONG L. Research progress on effects of fire disturbance on nitrogen cycling and transformation in forest soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(2): 372-382
- [51] 翁伯琦,郑祥洲,丁洪,等. 植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3610-3616
WENG B Q, ZHENG X Z, DING H, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3610-3616
- [52] 王刘杰. 高寒草甸豆科植物固氮作用及其对群落的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2010, 12-23
WANG L J. The nitrogen fixational legumes and effect of community in alpine meadow [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010, 12-23
- [53] 张玉霞,姚拓,王国基,等. 高寒生态脆弱区不同扰动生境草地植被及土壤无机氮变化特征[J]. 草业学报, 2014, 23(4): 245-252
ZHANG Y X, YAO T, WANG G J, et al. Characteristics of vegetation and soil inorganic nitrogen concentrations under different disturbed habitats in a weak alpine ecosystem [J]. Acta prataculturae sinica, 2014, 23(4): 245-252
- [54] BAI Y F, WU J G, CLARK C M, et al. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands [J]. Global Change Biology, 2010, 16: 889-889
- [55] 何勇,王占和,曹玉贵,等. 汾西县扁桃产地的鼠类及鼠害防治初探[J]. 农业技术与装备, 2015, (9): 69-71, 73
HE Y, WANG Z H, CAO Y G, et al. Rodent pest control in almond origin [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2015, (9): 69-71, 73
- [56] HAN T H, HUA L M, XU G C. Rodent damage assessment on the plateau pika [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 5: 130-137
- [57] GUANG D, WEI X, SHAO H Y, et al. Performance of multiple models for estimating rodent activity intensity in alpine grassland using remote sensing [J]. Remote Sens, 2023, 15: 1404
- [58] 段成伟,李希来,李成一,等. 黄河源区高寒草甸裸露斑块形成机理与生态修复关键限制因子[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 6952-6964
DUAN C W, LI X L, LI C Y, et al. Formation mechanism of alpine meadow bare patches and key factors limiting their restoration in the Source Zone of the Yellow River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 6952-6964
- [59] 宋梓涵,李希来,苏晓雪,等. 高原鼠兔和高原鼯鼠种群暴发区干扰斑块空间分布格局与演替规律[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2949-2958
SONG Z H, LI X L, SU X X, et al. Spatial distribution pattern and succession of disturbance patches formed by plateau pika and plateau zokor in their population outbreak areas in alpine meadow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2949-2958

(责任编辑 付宸)