

高原鼢鼠鼠丘不同演替阶段植物功能群的特征及其影响因素



张静 叶国辉 孙文倩 董隆明 张志莹 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: 为明确高寒草甸高原鼢鼠 *Eospalax baileyi* 鼠丘不同演替阶段植物功能群的特征及其影响因素, 选取不同年限鼠丘及无鼠丘草地对植物的繁殖方式、生活型和根系类型进行调查, 采用冗余分析法探究鼠丘植物功能群(繁殖功能群、生活型功能群和根系功能群)物种数、多度和地上生物量特征及其与土壤环境因子的关系。结果表明: 无鼠丘草地植物繁殖方式以种子繁殖兼具无性繁殖的功能群占优势, 其多度相对百分比为 58.4%, 地上生物量相对百分比为 64.8%, 鼠丘上植物以种子繁殖功能群为主, 在 3 年生鼠丘上占比最高, 多度相对百分比和地上生物量相对百分比分别为 76.4% 和 75.5%; 无鼠丘草地植物的生活型以地面芽和地下芽功能群为主, 其多度相对百分比分别是 52.4% 和 39.8%, 地上生物量相对百分比分别是 47.3% 和 48.5%, 而鼠丘上植物中地面芽功能群减少, 地上芽功能群增多, 2 年生鼠丘上植物以地下芽功能群占优势, 其多度相对百分比和地上生物量相对百分比分别为 68.0% 和 73.6%; 无鼠丘草地植物以根茎型和须根型功能群为主, 其多度相对百分比达到 57.7% 和 28.0%, 地上生物量相对百分比达到 56.9% 和 25.7%, 1 年生和 2 年生鼠丘上植物以轴根型和根茎型功能群为主, 3 年生鼠丘上植物以块根型、轴根型、须根型和根茎型功能群为主, 3 年以上鼠丘上植物以块根型、须根型和根茎型功能群为主。冗余分析结果表明高原鼢鼠干扰主要通过改变土壤水分、土壤氮磷养分等资源条件来影响鼠丘植物功能群特征。

关键词: 高原鼢鼠; 植物功能群; 演替; 繁殖方式; 生活型; 根系类型

Plant functional group characteristics in different successional stages of plateau zokor mounds and influencing factors

Zhang Jing Ye Guohui Sun Wenqian Dong Longming Zhang Zhiying Hua Limin*

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

Abstract: To clarify the characteristics of plant functional groups and the influencing factors at different successional stages of plateau zokor mounds in alpine meadows, a survey of plant reproductive modes, life forms, and root types in mounds of different ages and adjacent non-mounded grassland was conducted. The redundancy analysis was employed to explore the relationship among the species richness, abundance, and biomass characteristics of plant functional groups (reproductive functional groups, life form functional groups, and root functional groups) and soil environmental factors. The results indicated that the plants in non-mounded grassland were predominantly reproducing via seeds with some

基金项目: 国家自然科学基金(32160338), 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-05)

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

收稿日期: 2024-04-26

employing vegetative reproduction, with relative abundance percentage of 58.4% and relative aboveground biomass percentage of 64.8%. In contrast, plants on zokor mounds primarily relied on seed reproduction functional groups, with the highest proportions on three-year-old mounds, where their relative abundance and aboveground biomass percentages were 76.4% and 75.5%, respectively. Life forms in non-mounded grassland were mainly ground bud and underground bud functional groups, with relative abundance percentages of 52.4% and 39.8% and relative aboveground biomass percentages of 47.3% and 48.5%, respectively. Whereas plants on zokor mounds, the ground bud functional group decreased while the aboveground bud functional group increased. On two-year-old mounds, underground bud plants were dominant, with relative abundance and relative aboveground biomass percentages of 68.0% and 73.6%, respectively. Plant roots in non-mounded grassland were mainly rhizome and fibrous root type functional groups, with relative abundance percentages reaching 57.7% and 28.0%, and relative aboveground biomass percentages of 56.9% and 25.7%, respectively. On one-year and two-year-old zokor mounds, the dominant plants were primarily axial root and rhizome functional groups. For three-year-old mounds, the plants consist mainly of tuberous, axial root, fibrous root, and rhizome functional groups, while plants on mounds older than three years were primarily dominated by tuberous, fibrous root, and rhizome functional groups. Redundancy analysis results indicated that plateau zokor disturbance primarily influenced the characteristics of plant functional groups in mounds by altering soil moisture and nitrogen and phosphorus nutrient availability.

Key words: plateau zokor; plant functional group; succession; reproductive mode; life form; root type

植物功能群是由一系列具有确定功能特征的植物组成的集合,旨在研究植物随环境条件和干扰机制的变化(Lavorel et al., 1999; 范玉龙等, 2024)。Grime(1977)提出的竞争-耐胁迫-杂草型植物对策理论是描述植物适应环境的最著名的模型。植物功能群的划分有助于解释物种对生态系统过程的影响机理,简化对具有众多物种生态系统的研究(孙国钧等, 2003)。对于草地生态系统,一般采用生活型功能群(朱晓旭等, 2023)、根系类型功能群(纪羽等, 2019)和繁殖方式功能群(杨亚军, 2019; 刘栩赫等, 2024)来探讨草地植物在干扰或恢复过程中的响应特点和变化规律。

青藏高原草原生态环境敏感、脆弱,受到气候变化和人类活动的双重影响,青藏高原上多达90%的草原已经出现不同程度退化(Bardgett et al., 2021)。高寒草甸的斑块状退化是青藏高原的普遍现象,退化草地中裸露斑块的存在显著影响着高寒草甸生态系统功能(Li et al., 2024)。高原鼯鼠 *Eospalax baileyi* 作为青藏高原优势地下啮齿动物,通过挖掘活动在地面形成鼠丘(鲍根生等, 2016),进而形成鼠丘-植被镶嵌格局,这是影响植物群落组装的关键生态过程。目前,以鼯鼠鼠丘为研究单元,诸多学者相继开展了有关草地不同恢复阶段鼠丘植物群落特征、物种多样性、土壤养分和微生物功能变化等方面的研究(江小雷等, 2004; 胡雷等, 2015; 谈静, 2019)。

这些研究对于探讨鼯鼠干扰对高寒草地鼠丘植被恢复、土壤养分循环具有重要意义。然而,对定植于鼠丘斑块上的草地植物群落及其演替过程中不同植物功能群的响应研究相对有限。

本研究在祁连山东段天祝县通过调查不同年限(1年生、2年生、3年生、3年以上)的高原鼯鼠鼠丘上植物的繁殖方式、生活型和根系类型,从物种数、多度和地上生物量角度来探讨高原鼯鼠干扰后鼠丘植物功能群组成及其演替规律,以期更全面地了解高原鼯鼠对草地生态系统的影响,为物种多样性保护和鼯鼠科学防控提供更有利的支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

供试样地:研究区位于青藏高原北缘祁连山东段天祝县境内的高原鼯鼠栖息地(102°46' E, 37°12' N),海拔2 890 m。气候寒冷潮湿,年均温为-0.1 °C,年均降水量为416 mm,多集中于7、8和9月,无绝对无霜期。主要地形为河谷和洼地,土壤为亚高山草甸土,植被类型为高寒草甸,主要植物有矮生嵩草 *Kobresia humilis*、黑穗薹草 *Carex atrata*、垂穗披碱草 *Elymus nutans*、冷地早熟禾 *Poa crymophila*、鹅绒委陵菜 *Potentilla anserine* 和花苜蓿 *Medicago ruthenica* 等。研究区内高原鼯鼠是唯一地下造丘啮齿动物。

试剂和仪器:本研究所用试剂均为国产分析

纯。Fieldsout SC 900 便携式土壤紧实度仪,美国 Spectrum 公司;TR-8 型土壤温湿度记录仪,深圳顺科达智能装备有限公司;ST2100 pH 计,上海子期实验设备有限公司;Smartchem 450 全自动间断化学分析仪,北京理加联合科技有限公司;FP640 火焰光度计,上海精科实业有限公司;BCE224-1CCN 分析天平,赛多利斯科学仪器北京有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样方设置、植物调查和土壤取样

选择放牧强度一致且有高原鼢鼠栖息的冬季草场作为研究区进行调查,面积约 7 hm²。在研究区随机选择 200 m×200 m 的样地,鼠丘密度约 680 个/hm²。于 2018—2020 年连续 3 年于每年 5 月在样地对新推鼠丘用木桩刷漆标记。其中,3 年以上鼠丘为 2018 年标记且植被盖度在 20% 左右的鼠丘;3 年生鼠丘为 2018 年标记的新生鼠丘;2 年生鼠丘为 2019 年标记的新生鼠丘;1 年生鼠丘为 2020 年标记的新生鼠丘。2020 年 8 月在所有标记的鼠丘中,选择 4 种类型、大小、高度基本一致,符合演替规律且未受其他干扰的鼠丘各 5 个,共 20 个鼠丘。同时,在无鼠丘分布的草地定点标记 5 个 0.5 m×0.5 m 的样方作为对照,对照区与鼠丘分布区域间隔 100 m 以上。在 2020 年 8 月盛草期统一进行鼠丘和无鼠丘草地的植物和土壤样品采集。将在每个 0.5 m×0.5 m 样方中出现的物种数记为物种丰富度,所有物种个体数之和记为物种多度。将样方内植物齐地刈割,进行植物分种鉴定后分别装入信封中带回实验室,在烘箱中于 70 °C 烘干至恒重,用精度 0.000 1 g 分析天平称量干重得到物种地上生物量。通过最大值标准化法计算不同植物的相对多度 *A* 和相对生物量 *B*,得到每种植物的重要值 (important value, *IV*) (叶国辉等, 2024), $IV = (A+B)/2$;并通过累计百分比计算不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物 3 种功能群的多度相对百分比和生物量相对百分比。同时利用直径为 3.5 cm 的土钻在选定的 20 个鼠丘上采集 0~20 cm 深度的植物生长层土样,每个鼠丘用土钻打 3 钻合为 1 个土壤样品,共 20 份鼠丘土壤样本。采用相同方法在对照样方中采集土壤样品。采集后的土壤样品装入自封袋带回实验室阴干后研磨成粉,分别过 0.25 mm 和 1 mm 孔筛后用于土壤理化性质及微生物酶活性测定。

1.2.2 植物繁殖方式、生活型和根茎类型的确定

对 1.2.1 采集鉴定的所有植物种分别按照其繁殖方式、生活型和根茎类型进行功能群划分,并统计鼠丘和无鼠丘草地植物各类型功能群的物种数、多度和地上生物量。植物的繁殖方式和生活型参照宋

永昌(2017)方法划分,繁殖方式划分为孢子繁殖、种子繁殖、无性繁殖和种子繁殖兼具无性繁殖 4 种类型;生活型依据 Raunkiaer 生活型系统划分为高位芽植物、地上芽植物、地面芽植物、地下芽植物和一年生植物 5 种类型。植物的根系类型参照陈世鑽等(2001)方法划分为根茎型、疏丛型、根蘖型、轴根型、块根型和鳞茎型 6 种类型。

1.2.3 土壤理化性质及微生物酶活性的测定

土壤物理指标中土壤紧实度采用土壤紧实度仪测定,用探针在同一鼠丘或对照样方随机取 3 个点测量 0~20 cm 土层的紧实度,取平均值;土壤温度在正午采用土壤温湿度仪测定;土壤水分含量采用水分烘干法测定。土壤化学指标参照《土壤农化分析》(鲍士旦, 2000)测定,其中土壤酸碱度利用 pH 计按照土水质量体积比 1.0:2.5 测定,土壤有机碳含量采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 外加热氧化法测定,土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定,土壤速效氮含量采用全自动间断化学分析仪测定,土壤全磷和速效磷含量采用钼锑抗-抗坏血酸比色法测定,土壤全钾含量采用火焰光度计测定。土壤微生物酶指标中土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定(叶国辉, 2023)。

1.2.4 植物群落与环境因子之间的冗余分析

采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 法分析植物功能群与环境变量之间的关系,利用 Canoco 4.5 软件完成。先对植物功能群进行去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 计算 DCA 排序轴梯度长度,当该值小于 3 时采用 RDA 法。进行 RDA 时,将不同恢复年限高原鼢鼠鼠丘土壤理化性质及微生物酶活性的变化作为解释变量,将高原鼢鼠鼠丘次生演替过程中植物生活型、根茎类型、繁殖方式的变化作为响应变量;利用蒙特卡罗随机置换检验法检验环境因子排序轴的显著性,置换 499 次,显著性水平为 0.05 (赵远娥等, 2024)。最后,在 R 4.3.1 软件中使用程序包 rdacca.hp (Lai et al., 2022; 刘尧等, 2023) 计算各解释变量的单独效应、边际效应和共同效应,评估各环境因子对鼠丘 3 种植物功能群的相对重要性和显著性,利用蒙特卡罗随机置换检验法检验,置换 999 次,显著性水平为 0.05,其中各解释变量的单独效应等于解释变量的边际效应加上与其他解释变量的共同效应的平均分配值。

1.3 数据分析

使用 Excel 2021 软件对试验数据进行整理和计

算,采用SPSS 26软件对试验数据进行正态性和方差齐性检验,对符合检验的植物相关数据应用非参数Kruskal-Wallis H检验法进行差异显著性检验,对土壤相关数据应用最小显著差数(least significant difference, LSD)法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物群落组成对比

高原鼢鼠不同年限鼠丘植物群落组成差异明显(表1)。本研究共调查到18科37属45种鼠丘定植

植物,其中1年生鼠丘植物群落有9科15属16种植物,2年生丘植物群落有14科22属25种植物,3年生鼠丘植物群落有15科25属27种植物,3年以上鼠丘植物群落有13科22属27种植物,无鼠丘干扰草地有12科21属24种植物(表1)。无鼠丘草地以莎草科矮生嵩草和禾本科赖草*Leymus secalinus*为优势种;鼠丘上以委陵菜属*Potentilla*植物占优势地位,其中2年生鼠丘上的优势种是翻白委陵菜*Potentilla discolor*,而其他年限鼠丘上的演替阶段优势种都是鹅绒委陵菜。

表1 高原鼢鼠不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物群落的物种组成

Table 1 Species composition of plant communities on plateau zokor mounds of different years and non-mounded grassland

科 Family	属 Genus	物种 Species	繁殖方式 Reproduction	生活型 Life form	根系类型 Root type	重要值 Important value				
						S1	S2	S3	S4	CK
莎草科 Cyperaceae	嵩草属 <i>Kobresia</i>	矮生嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	种子+无性繁殖 SV	地面芽 HC	根茎型 RZ	/	/	/	/	0.447
莎草科 Cyperaceae	嵩草属 <i>Kobresia</i>	线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	根茎型 RZ	/	0.006	/	/	/
莎草科 Cyperaceae	薹草属 <i>Carex</i>	黑穗薹草 <i>Carex atrata</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	根茎型 RZ	/	0.133	0.017	0.242	0.057
禾本科 Poaceae	隐子草属 <i>Cleistogenes</i>	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	须根型 FB	/	/	0.005	0.004	0.006
禾本科 Poaceae	披碱草属 <i>Elymus</i>	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	须根型 FB	0.029	0.111	0.147	0.222	0.067
禾本科 Poaceae	赖草属 <i>Leymus</i>	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	根茎型 RZ	0.166	0.066	0.036	0.118	0.437
禾本科 Poaceae	洽草属 <i>Koeleria</i>	洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	须根型 FB	0.006	0.035	0.017	0.019	0.285
禾本科 Poaceae	早熟禾属 <i>Poa</i>	冷地早熟禾 <i>Poa crymophila</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	根茎型 RZ	/	/	0.031	0.074	0.089
禾本科 Poaceae	针茅属 <i>Stipa</i>	紫花针茅 <i>Stipa purpurea</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	须根型 FB	/	/	0.027	0.095	0.146
豆科 Fabaceae	棘豆属 <i>Oxytropis</i>	黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	轴根型 AR	0.010	0.002	0.012	0.021	0.028
豆科 Fabaceae	苜蓿属 <i>Medicago</i>	花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	轴根型 AR	0.308	/	0.009	/	0.030
豆科 Fabaceae	黄芪属 <i>Astragalus</i>	黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	轴根型 AR	/	0.075	/	/	/
菊科 Asteraceae	蒲公英属 <i>Taraxacum</i>	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	轴根型 AR	0.026	0.009	0.113	0.009	/
菊科 Asteraceae	风毛菊属 <i>Saussurea</i>	风毛菊 <i>Saussurea hieracioides</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	轴根型 AR	0.005	/	0.002	/	0.021
菊科 Asteraceae	火绒草属 <i>Leontopodium</i>	火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	须根型 FB	0.004	0.029	/	/	/
菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	种子繁殖 SP	地上芽 AB	轴根型 AR	/	/	/	0.001	0.063
菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	种子繁殖 SP	一年生 AP	轴根型 AR	/	0.012	/	0.006	/
菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	根茎型 RT	/	0.060	/	/	/
菊科 Asteraceae	橐吾属 <i>Ligularia</i>	箭叶橐吾 <i>Ligularia sagitta</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	根茎型 RZ	/	/	/	0.004	/
菊科 Asteraceae	香青属 <i>Anaphalis</i>	乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	根茎型 RZ	/	0.018	/	/	/

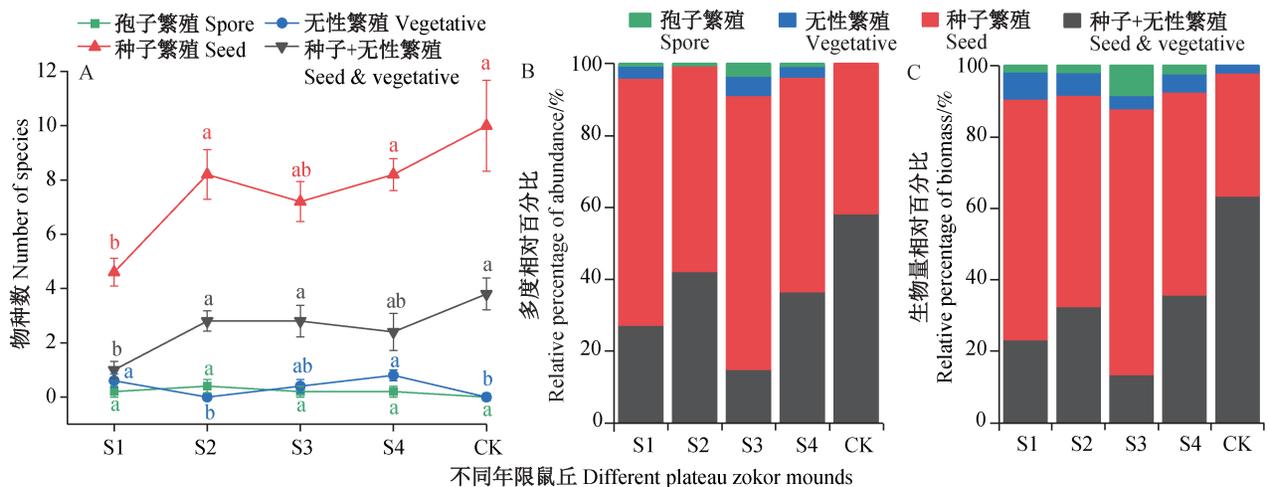
续表1 Continued

科 Family	属 Genus	物种 Species	繁殖方式 Reproduction	生活型 Life form	根系类型 Root type	重要值 Important value				
						S1	S2	S3	S4	CK
伞形科 Apiaceae	迷果芹属 <i>Sphallerocarpus</i>	迷果芹 <i>Sphallerocarpus gracilis</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	轴根型 AR	0.039	/	0.023	0.017	/
毛茛科 Ranunculaceae	唐松草属 <i>Thalictrum</i>	唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	须根型 FB	0.014	/	0.071	0.020	/
毛茛科 Ranunculaceae	金莲花属 <i>Trollius</i>	金莲花 <i>Trollius chinensis</i>	种子繁殖 SP	一年生 AP	须根型 FB	/	0.017	0.001	/	/
毛茛科 Ranunculaceae	毛茛属 <i>Ranunculus</i>	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	须根型 FB	0.006	/	/	0.006	0.001
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	肋柱花 <i>Lomatogonium carinthiacum</i>	种子繁殖 SP	一年生 AP	轴根型 AR	/	/	/	/	0.005
龙胆科 Gentianaceae	龙胆属 <i>Gentiana</i>	秦艽 <i>Gentiana macrophylla</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	轴根型 AR	/	/	/	/	0.007
龙胆科 Gentianaceae	獐芽菜属 <i>Swertia</i>	四数獐芽菜 <i>Swertia tetraptera</i>	种子繁殖 SP	一年生 AP	轴根型 AR	/	0.072	0.077	/	0.001
蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	根蘖型 RT	0.005	0.003	0.076	0.074	0.078
蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	翻白委陵菜 <i>Potentilla discolor</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	轴根型 AR	/	0.516	/	0.005	0.001
蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	种子+无性繁殖 SV	地上芽 GP	块根型 TR	0.335	/	0.544	0.386	/
蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>	多裂委陵菜 <i>Potentilla multifida</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	轴根型 AR	/	0.059	/	0.001	0.013
蓼科 Polygonaceae	蓼属 <i>Polygonum</i>	珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	根茎型 RZ	0.137	0.143	0.001	0.010	/
蓼科 Polygonaceae	蓼属 <i>Polygonum</i>	西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	根茎型 RZ	/	/	0.135	0.065	/
百合科 Liliaceae	葱属 <i>Allium</i>	高山韭 <i>Allium sikkimense</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	鳞茎型 BL	/	0.044	0.001	/	0.005
木贼科 Equisetaceae	木贼属 <i>Equisetum</i>	问荆 <i>Equisetum arvense</i>	孢子繁殖 PS	地下芽 GP	根茎型 RZ	0.011	0.029	0.082	0.020	0.025
唇形科 Lamiaceae	香薷属 <i>Elsholtzia</i>	密花香薷 <i>Elsholtzia densa</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	须根型 FB	/	/	0.002	0.002	/
玄参科 Scrophulariaceae	肉果草属 <i>Lancea</i>	肉果草 <i>Lancea tibetica</i>	无性繁殖 VP	地下芽 GP	根茎型 RZ	0.027	/	0.064	0.041	/
玄参科 Scrophulariaceae	马先蒿属 <i>Grex</i>	马先蒿 <i>Grex Pedicularis</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	须根型 FB	/	0.002	0.001	0.009	0.010
玄参科 Scrophulariaceae	婆婆纳属 <i>Veronica</i>	婆婆纳 <i>Veronica didyma</i>	种子繁殖 SP	一年生 AP	须根型 FB	/	0.013	0.002	/	/
藜科 Chenopodiaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	种子繁殖 SP	一年生 AP	轴根型 AR	/	0.228	/	/	0.017
堇菜科 Violaceae	堇菜属 <i>Viola</i>	西藏堇菜 <i>Viola kunawarensis</i>	种子繁殖 SP	地下芽 GP	轴根型 AR	/	/	0.034	0.001	/
紫草科 Boraginaceae	微孔草属 <i>Microula</i>	微孔草 <i>Microula sikkimensis</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	块根型 TR	/	/	/	0.005	/
罂粟科 Papaveraceae	角茴香属 <i>Hypecoum</i>	细果角茴香 <i>Hypecoum leptocarpum</i>	种子繁殖 SP	一年生 AP	轴根型 AR	/	0.046	0.004	/	/
远志科 Polygalaceae	远志属 <i>Polygala</i>	远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	种子繁殖 SP	地面芽 HC	轴根型 AR	/	/	/	/	0.002
鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	马蔺 <i>Iris lactea</i>	种子+无性繁殖 SV	地下芽 GP	须根型 FB	/	0.423	/	/	/

/: 无数据; S1~S4: 分别为1、2、3年生和3年以上鼠丘; CK: 无鼠丘草地。/: No data. S1~S4: Formed mounds with one, two, three and more than three years, respectively; CK: grassland without plateau zokor mounds. SV: Seed reproduction combined with vegetative repropagation; SP: seed reproduction; PS: spore reproduction; VP: vegetative repropagation. HC: Ground bud plant; GP: underground bud plant; AB: aboveground bud plant; AP: annual plant. RZ: Rhizome plant; FB: fibrous root plant; AR: axial root plant; RT: root tiller type plant; BL: bulbous plant; TR: tuberous root plant.

2.2 不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物繁殖方式对比

高原鼢鼠不同年限鼠丘上不同繁殖方式植物的物种数、多度和地上生物量变化有所不同(图1)。整体看,以种子繁殖的植物物种数明显高于其他繁殖策略的植物物种数;与无鼠丘草地相比,鼠丘的形成显著降低了种子繁殖和种子繁殖兼具无限繁殖的植物物种数,显著增加了无性繁殖的植物物种数,对孢子繁殖的植物物种数无显著影响(图1)。随着鼠丘植被恢复时间的延长,以种子繁殖和以种子繁殖兼具无性繁殖的植物物种数均有所增加,尤以2年生鼠丘上增加最多;以无性繁殖的植物物种数在不同年限鼠丘(除了2年生鼠丘)上均较无鼠丘草地有所增加;而以孢子繁殖的植物物种数在不同年限鼠丘与无鼠丘草地之间无显著差异(图1-A)。



S1~S4: 分别为1、2、3年生和3年以上鼠丘; CK: 无鼠丘草地。S1~S4: Formed mounds with one, two, three and more than three years, respectively; CK: grassland without plateau zokor mounds.

图1 高原鼢鼠不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物繁殖功能群的对比

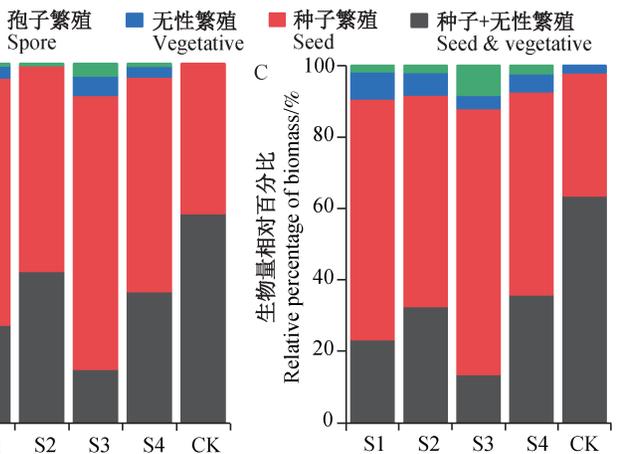
Fig. 1 Comparison of plant reproductive functional groups on plateau zokor mounds of different years and non-mounded grassland

图中数据为平均数±标准误。同色线上不同小写字母表示经Kruskal-Wallis H检验法检验不同年限鼠丘之间差异显著($P < 0.05$)。Data in the figure are mean±SE. Different letters above the same color lines indicate significant difference among different years of mounds by Kruskal-Wallis H test ($P < 0.05$).

2.3 不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物生活型对比

高原鼢鼠不同年限鼠丘上具有不同生活型植物的物种数、多度和地上生物量变化明显不同(图2)。整体上看,地下芽植物的物种数明显高于其他生活型植物的物种数;与无鼠丘草地相比,鼠丘的形成导致地下芽和地面芽植物的物种数显著下降,但随着鼠丘植被恢复时间延长,地下芽和地面芽植物的物种数逐渐增多,其中地下芽植物在2年生和3年以上鼠丘上的物种数甚至高于无鼠丘草地。与无鼠丘草地相比,鼠丘的形成对地上芽和一年生植物的物种数无显著影响,但2年生鼠丘上一年生植物的物种数显著增加,地上芽植物的物种数显著下降,二者在鼠丘

恢复到第3年时与无鼠丘草地无显著差异(图2-A)。1年生鼠丘植物的生活型由地上芽、地下芽和地面芽功能群组成,没有发现一年生植物,其多度相对百分比分别是53.3%、40.5%和6.2%,地上生物量相对百分比分别是61.8%、32.0%和6.2%;在2年生鼠丘上,一年生植物的多度和地上生物量增加,多度相对百分比达到21.7%,地上生物量相对百分比达到15.7%;而地上芽功能群的植物多度相对百分比降至1.8%,地上生物量相对百分比降至1.5%;地下芽功能群的植物多度和地上生物量占据主导地位,多度相对百分比达到68.0%,地上生物量相对百分比达到73.6%;3年生鼠丘和3年以上鼠丘植物主要

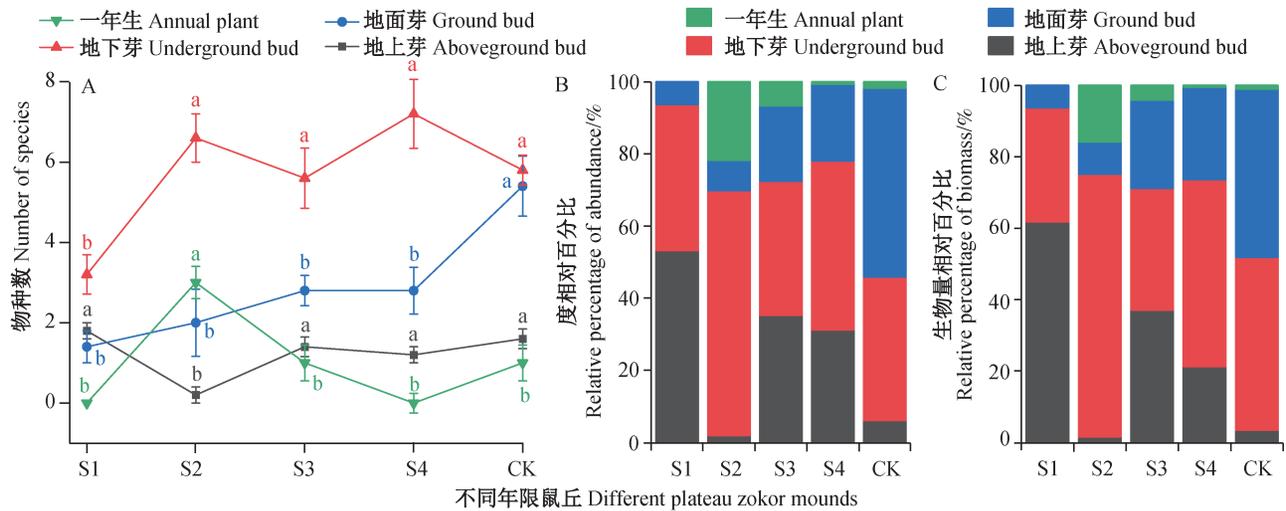


恢复到第3年时与无鼠丘草地无显著差异(图2-A)。

1年生鼠丘植物的生活型由地上芽、地下芽和地面芽功能群组成,没有发现一年生植物,其多度相对百分比分别是53.3%、40.5%和6.2%,地上生物量相对百分比分别是61.8%、32.0%和6.2%;在2年生鼠丘上,一年生植物的多度和地上生物量增加,多度相对百分比达到21.7%,地上生物量相对百分比达到15.7%;而地上芽功能群的植物多度相对百分比降至1.8%,地上生物量相对百分比降至1.5%;地下芽功能群的植物多度和地上生物量占据主导地位,多度相对百分比达到68.0%,地上生物量相对百分比达到73.6%;3年生鼠丘和3年以上鼠丘植物主要

由地面芽、地下芽和地上芽功能群组成;无鼠丘草地植物的生活型主要由地面芽和地下芽功能群组成,

其多度相对百分比分别为52.4%和39.8%,地上生物量相对百分比分别为47.3%和48.5%(图2-B~C)。



S1~S4: 分别为1、2、3年生和3年以上鼠丘; CK: 无鼠丘草地。S1~S4: Formed mounds with one, two, three and more than three years, respectively; CK: grassland without plateau zokor mounds.

图2 高原鼯鼠不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物生活型功能群的对比

Fig. 2 Comparison of plant life form functional groups on plateau zokor mounds of different years and non-mounded grassland

图中数据为平均数±标准误。同色线上不同小写字母表示经Kruskal-Wallis H检验法检验不同年限鼠丘之间差异显著($P < 0.05$)。Data in the figure are mean±SE. Different letters above the same color lines indicate significant difference among different years of mounds by Kruskal-Wallis H test ($P < 0.05$).

2.4 不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物根系类型的对比

高原鼯鼠不同年限鼠丘上具有不同根系类型植物的物种数、多度和地上生物量变化存在显著差异(图3)。根茎型植物、块根型植物和鳞茎型植物的物种数在不同年限鼠丘与无鼠丘草地之间均无显著差异,但鼠丘的形成显著降低了轴根型植物、须根型植物和根蘖型植物的物种数;随着鼠丘植被恢复时间的延长,须根型植物和根蘖型植物的物种数呈上升趋势,在第3年达到稳定;而轴根型植物的物种数与块根型植物的物种数变化趋势相反,2年生鼠丘上轴根型植物的物种数最多,根茎型植物和须根型植物次之,3年生鼠丘上轴根型植物的物种数显著下降,根茎型植物和须根型植物的物种数较稳定;3年以上鼠丘上植物主要以根茎型、须根型和轴根型功能群为主,其物种数逐渐恢复到无鼠丘草地水平(图3-A)。

1年生鼠丘植物主要由轴根型、根茎型和块根型功能群组成,其多度相对百分比分别为39.7%、32.3%和21.0%,地上生物量相对百分比分别为37.7%、32.8%和23.2%;2年生鼠丘植物主要由轴根型、根茎型和须根型功能群组成,其多度相对百分比分别为44.5%、30.3%和20.4%,地上生物量相对百分比分别为43.1%、32.8%和14.2%;3年生鼠丘上植

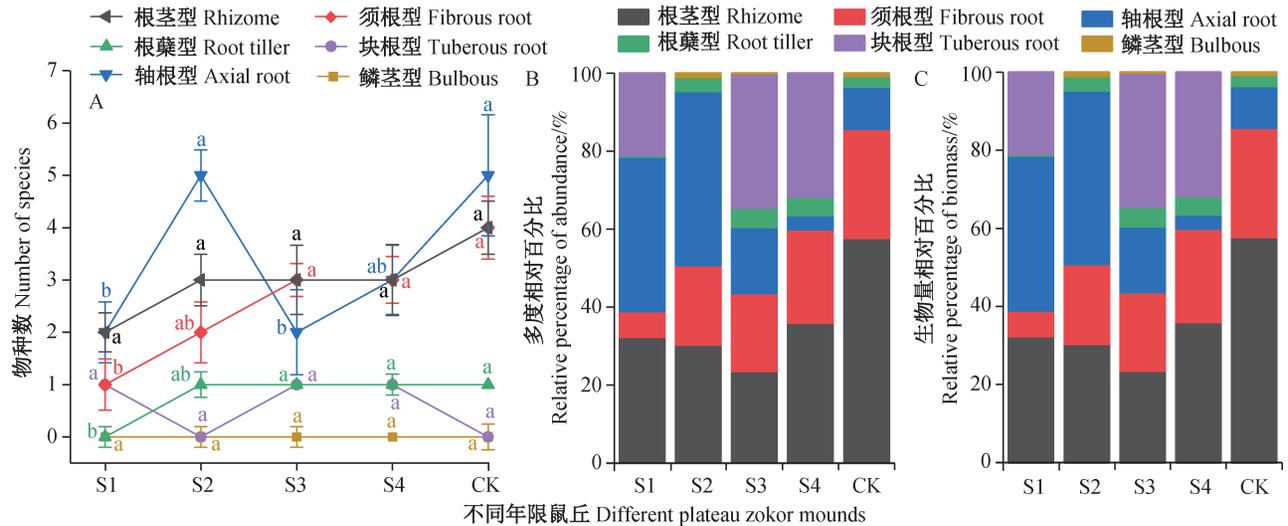
物主要由块根型、轴根型、须根型和根茎型功能群组成,其多度相对百分比分别为34.5%、16.8%、20.1%和23.5%,地上生物量相对百分比分别为32.8%、17.4%、21.5%和23.2%;3年以上鼠丘上植物主要由块根型、须根型和根茎型功能群组成,其多度相对百分比分别为31.7%、23.9%和35.9%,地上生物量相对百分比分别为32.1%、20.5%和34.6%;无鼠丘草地植物主要由根茎型和须根型功能群组成,其多度相对百分比达到57.7%和28.0%,地上生物量相对百分比达到56.9%和25.7%;鳞茎型功能群只在2年生鼠丘和无鼠丘草地中发现(图3-B~C)。

2.5 不同年限鼠丘和无鼠丘草地土壤指标的差异

土壤温度在鼠丘形成初期与无鼠丘草地土壤无显著差异,仅3年生鼠丘的土壤温度显著低于无鼠丘草地土壤(表2)。不同年限鼠丘土壤水分含量均显著高于无鼠丘草地土壤,而不同年限鼠丘土壤紧实度显著低于无鼠丘草地土壤,这2个指标在不同年限鼠丘之间均差异不显著;土壤有机质含量随着鼠丘恢复年限的增加整体呈下降趋势,除了1年生鼠丘外,其余年限鼠丘土壤有机质含量均显著低于无鼠丘草地土壤;土壤全氮、全钾和速效磷含量均在鼠丘恢复第2年升至最高,随后逐年下降,但均与无鼠丘草地相当,其中仅2年生鼠丘土壤速效磷含量

显著高于无鼠丘草地土壤;土壤全磷含量随着鼠丘恢复年限的增加先升高后降低,在第3年达到峰值,且显著高于无鼠丘草地土壤;土壤酸碱度和速效氮含量在不同鼠丘土壤之间均无显著差异,且与无鼠丘草地土壤亦无显著差异(表2)。土壤碱性磷酸酶

活性在鼠丘形成初期显著高于无鼠丘草地土壤,而鼠丘的形成导致土壤的脲酶活性显著低于无鼠丘草地土壤,二者均随着鼠丘恢复年限的增加而逐渐降低;土壤过氧化氢酶活性在不同年限鼠丘土壤与无鼠丘草地土壤之间均无显著差异(表2)。



S1~S4: 分别为1、2、3年生和3年以上鼠丘; CK: 无鼠丘草地。S1~S4: Formed mounds with one, two, three and more than three years, respectively; CK: grassland without plateau zokor mounds.

图3 高原鼢鼠不同年限鼠丘和无鼠丘草地植物根系功能群的对比

Fig. 3 Comparison of plant root type functional groups on plateau zokor mounds of different years and non-mounded grassland
图中数据为平均数±标准误。同色线上不同小写字母表示经Kruskal-Wallis H检验法检验不同年限鼠丘之间差异显著(P<0.05)。Data in the figure are mean±SE. Different letters above the same color lines indicate significant difference among different years of mounds by Kruskal-Wallis H test (P<0.05).

表2 高原鼢鼠不同年限鼠丘和无鼠丘草地土壤指标的比较

Table 2 Comparison of soil index on plateau zokor mounds of different years and non-mounded grassland

土壤指标 Soil index	S1	S2	S3	S4	CK
土壤温度 Soil temperature/°C	32.12±1.20 a	32.72±1.82 a	28.05±3.72 b	29.46±3.63 ab	31.93±1.67 a
土壤水分含量 Soil water content/%	31.99±2.38 a	31.77±0.65 a	30.77±2.89 a	28.77±3.53 a	25.09±2.20 b
土壤紧实度 Soil compactness/kPa	338.38±91.18 c	389.76±95.79 c	496.00±73.00 c	740.69±86.84 b	1 894.13±265.91 a
土壤有机质含量 Soil organic matter content/(g/kg)	73.91±6.56 a	64.67±5.99 b	59.31±6.74 b	62.55±4.36 b	73.91±6.56 a
土壤全氮含量 Soil total nitrogen content/(g/kg)	5.80±0.54 ab	6.71±0.18 a	5.60±0.83 b	5.72±1.01 b	6.23±0.45 ab
土壤全磷含量 Soil total phosphorus content/(g/kg)	0.63±0.02 b	0.73±0.10 ab	0.78±0.12 a	0.69±0.04 ab	0.64±0.06 b
土壤全钾含量 Soil total potassium content/(g/kg)	8.73±0.40 b	9.31±0.40 a	8.88±0.34 ab	8.80±0.32 ab	9.00±0.50 ab
土壤酸碱度 Soil pH	7.43±0.27 a	7.43±0.28 a	7.39±0.21 a	7.56±0.31 a	7.66±0.25 a
土壤速效氮含量 Soil available nitrogen content/(mg/kg)	2.38±0.85 a	2.13±0.30 a	2.04±0.34 a	2.12±0.29 a	2.42±0.72 a
土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content/(mg/kg)	14.45±2.47 ab	17.96±1.67 a	15.34±4.00 ab	12.13±1.64 b	13.60±3.20 b
土壤脲酶活性 Soil urease activity/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.62±0.15 b	0.51±0.06 bc	0.45±0.05 c	0.38±0.03 c	0.78±0.13 a
土壤碱性磷酸酶活性 Soil alkaline phosphatase activity/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	2.18±0.38 ab	2.29±0.34 a	1.20±0.14 c	1.85±0.39 b	0.99±0.11 c
土壤过氧化氢酶活性 Soil catalase activity/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	4.37±0.47 a	3.74±0.70 a	3.91±0.53 a	3.83±0.34 a	3.76±0.26 a

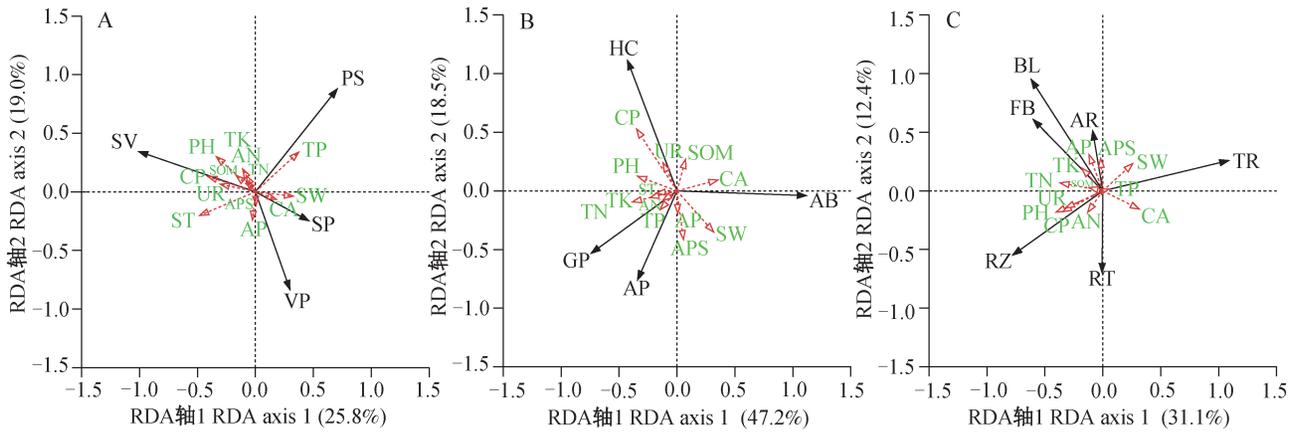
S1~S4: 分别为1、2、3年生和3年以上鼠丘; CK: 无鼠丘草地。表中数据为平均数±标准差。同行不同小写字母表示经LSD法检验差异显著(P<0.05)。S1~S4: Formed mounds with one, two, three and more than three years, respectively; CK: grassland without plateau zokor mounds. Data in the table are mean±SD. Different letters in the same row indicate significant difference by LSD test (P<0.05).

2.6 鼠丘恢复过程中植物群落与环境因子的关系

RDA结果表明高原鼯鼠鼠丘演替过程中土壤理化环境因子对植物生活型功能群、根系类型功能群有显著影响(图4)。RDA轴1、轴2对植物不同繁殖方式功能群变异的共同效应为44.8%($F=1.19, P>0.05$),对植物不同生活型功能群变异的共同效应为65.7%($F=1.978, P<0.05$),对植物不同根系类型功能群变异的共同效应为43.5%($F=1.58, P<0.05$)。土壤水分含量和过氧化氢酶活性与地上芽植物、块根型植物呈正相关;土壤紧实度、土壤有机质含量和土壤脲酶活性与地面芽植物、根茎型植物、根蘖型植物呈正相关;土壤全氮含量、速效氮含量、全磷含量、速效磷含量与地下芽植物、须根型植物、鳞茎型植物呈

正相关;土壤全磷含量、速效磷含量和碱性磷酸酶活性与一年生植物、轴根型植物呈正相关(图4)。

RDA结果显示,在12个土壤环境因子中,对植物繁殖功能群的相对重要性排前3位的依次是土壤酸碱度、土壤温度和土壤水分含量,单独效应分别为10.63%、8.10%和3.56%;对植物生活型功能群的相对重要性排在前5位的依次是土壤全氮含量、土壤酸碱度、土壤碱性磷酸酶活性、土壤全磷含量和土壤温度,单独效应分别为7.91%、7.57%、5.68%、4.87%和4.86%;对植物根系功能群的相对重要性排在前4位的依次是土壤全氮含量、土壤温度、土壤酸碱度和土壤水分含量,单独效应分别为9.21%、7.91%、7.42%和6.68%(表3)。



RDA: 冗余分析。PS: 孢子繁殖; SP: 种子繁殖; VP: 无性繁殖; SV: 种子繁殖兼具无性繁殖; AB: 地上芽植物; HC: 地面芽植物; GP: 地下芽植物; AP: 一年生植物; RZ: 根茎型植物; FB: 须根型植物; AR: 轴根型植物; RT: 根蘖型植物; TR: 块根型植物; BL: 鳞茎型植物; ST: 土壤温度; SW: 土壤水分含量; CP: 土壤紧实度; SOM: 土壤有机质含量; TN: 土壤全氮含量; TP: 土壤全磷含量; TK: 土壤全钾含量; pH: 土壤酸碱度; AN: 土壤速效氮含量; AP: 土壤速效磷含量; UR: 土壤脲酶活性; APS: 土壤碱性磷酸酶活性; CA: 土壤过氧化氢酶活性。RDA: Redundancy analysis. PS: Spore reproduction; SP: seed reproduction; VP: vegetative propagation; SV: seed reproduction combined with vegetative propagation; AB: aboveground bud plant; HC: ground bud plant; GP: underground bud plant; AP: annual plant; RZ: rhizome plant; FB: fibrous root plant; AR: axial root plant; RT: root and tiller type plant; TR: tuberous root plant; BL: bulbous plant; ST: soil temperature; SW: soil water content; CP: soil compactness; SOM: soil organic matter content; TN: soil total nitrogen content; TP: soil total phosphorus content; TK: soil total potassium content; pH: soil pH; AN: soil available nitrogen content; AP: soil available phosphorus content; UR: soil urease activity; APS: soil alkaline phosphatase activity; CA: soil catalase activity.

图4 高原鼯鼠不同年限鼠丘植物繁殖方式(A)、生活型(B)和根系类型(C)功能群与环境因子的关系

Fig. 4 The relationship among plant reproductive mode (A), life form (B) and root type (C) of plateau zokor mounds with different years and environmental factors

3 讨论

本研究结果显示,高原鼯鼠造丘促进了样地尺度上草地植物物种丰富度的增加;在鼠丘植被恢复的不同阶段分别以多年生杂类草伴生多年生禾本科植物、一年生杂类草伴生多年生杂类草向多年生杂类草伴生多年生禾本科植物和莎草科植物为主逐渐过渡;繁殖方式从以种子繁殖兼具无性繁殖为主转

变为以种子繁殖为主;生活型以地面芽和地下芽为主转变为以地下芽和地上芽为主;根系类型以根茎型和须根型为主转变为以根茎型、轴根型和块根型为主。这与其他学者的研究结果相似,如Niu et al. (2020)也发现高原鼯鼠造丘促进了高寒草甸植物群落更新和物种多样性维持。高寒草地植物主要依赖种子繁殖兼无性繁殖的方式进行繁衍,确保后代在相对恶劣的寒冷环境中得以生存(Bai et al., 2024)。

高原鼯鼠通过挖掘将地下土壤上翻至地表,将多年生植物的种子移至表层受到光照刺激,打破种子休眠,促进种子萌发(吕俊平等,2012)。另外,鼠丘的出现为孢子繁殖植物提供了定植机会,使无性繁殖植物得以扩展,为鹅绒委陵菜的生长创造了条件(张彩军等,2023)。高寒草地植物以地面芽和地下芽功能群占主导,这反映了植物对寒冷环境的适应策略。植物倾向于通过地面芽和地下芽来适应寒冷气候和风蚀,以避免过度的水分蒸发和机械损伤(焉志远等,2012)。高寒草地植物地下根茎网络能够储存丰富的水分和养分,为植物提供足够的能量,降低植物组织的冻结风险。高原鼯鼠造丘后,丘上土壤在紫外线直射、风蚀作用下相对干燥,不利于须根型植

物的生存。轴根型植物因其深根结构有助于获取更深层的水分和养分,鼠丘草地恢复到第2年,轴根型功能群占据优势地位,根蘖型、须根型功能群也缓慢增加,而块根型功能群受到短暂抑制。这是土壤条件波动下的植物此消彼长模式(Gadgil & Solbrig, 1972)。鼠丘草地恢复到第3年,轴根型功能群逐渐减少,而须根型和块根型功能群逐渐增多,达到相对稳定。这可能归因于高原鼯鼠的选择性采食。高原鼯鼠选择性采食轴根型植物,导致其数量减少,进而释放了土壤中的水分和养分。在这种新的资源利用格局下,须根型和块根型植物功能群迅速利用释放的水分和养分,表现出更强的竞争优势。

表3 土壤环境因子对高原鼯鼠鼠丘植物群落3种功能群的单独效应

Table 3 Individual effects of soil environmental factors on three functional groups of plateau zokor mounds' plant communities

环境因子 Environment factor	单独效应 Individual effect/%		
	繁殖功能群 Reproductive mode	生活型功能群 Life form	根系功能群 Root type
土壤温度 Soil temperature	8.10	4.86	7.91*
土壤水分含量 Soil water content	3.56	2.87	6.68
土壤全氮含量 Soil total nitrogen content	-0.54	7.91*	9.21*
土壤全磷含量 Soil total phosphorus content	-1.05	4.87	-0.93
土壤全钾含量 Soil total potassium content	-2.85	1.84	-2.84
土壤酸碱度 Soil pH	10.63	7.57*	7.42
土壤速效氮含量 Soil available nitrogen content	-1.96	-3.01	-2.59
土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	-3.42	-2.79	0.01
土壤有机质含量 Soil organic matter content	0.90	-1.57	-1.02
土壤脲酶活性 Soil urease activity	-2.38	-2.51	0.65
土壤碱性磷酸酶活性 Soil alkaline phosphatase activity	-2.80	5.68	-0.72
土壤过氧化氢酶活性 Soil catalase activity	0.92	3.35	3.20

表示经蒙特卡罗置换检验法检验该环境因子的影响显著($P<0.05$)。 indicates the impact of this environmental factor is significant by Monte Carlo permutation test ($P<0.05$).

植物功能群是研究植物随环境因子变化的基本单元,植物通过功能类群重组来适应复杂多变的环境(王婷等,2020)。本研究发现高原鼯鼠干扰引起的土壤理化性质和水解酶活性的改变会显著影响植物功能群特征。不同植物功能群在鼠丘草地恢复各阶段的响应不一致,说明不同功能类型的植物在不同年限鼠丘上形成不同的生态对策,如在鼠丘草地恢复初期,土壤水分是主要限制因子,而土壤质地、疏松程度以及氮磷等限制养分对高寒草甸植物群落的恢复有调控作用。Du et al.(2020)研究表明植物生长受土壤水分和可用性养分的限制,尤其是在受到氮素限制的高寒草地生态系统。Niu et al.(2022)研究发现土壤养分缺乏会抑制高大禾草的生长,但会促进矮小杂类草的物种丰富度,尤其是土壤磷含

量的下降。本研究还发现根蘖型、轴根型、须根型和鳞茎型植物都与磷循环相关指标呈正相关,表明杂类草植物在磷循环过程中发挥着重要的生态功能。但在生态系统中涉及多种因素的交互影响,还需进一步的研究和数据分析才能更深入地理解这种正相关的生态机制。

高原鼯鼠鼠丘植物群落演替过程中不同功能群组成及其演替规律存在差异。繁殖功能群以种子繁殖功能群先萌发定居,随后以种子繁殖兼无性繁殖功能群占比增加;生活型功能群以一年生、地上芽和地下芽功能群率先做出响应,随后地面芽植物逐渐恢复,最终与地下芽植物共同占据主导地位;根系功能群以块根型和轴根型根系功能群先响应,随后根茎型、须根型功能群占据优势;土壤水分和氮磷养分

含量是影响鼠丘植物功能群组成的主要环境因子。植物功能型的转变反映了植物群落对环境条件的灵活适应。本研究是用定性的方法根据不同演替阶段鼠丘植物名录确定了生活型、繁殖方式、根系类型3种功能群,在后续的研究中应结合实地取样调查,进一步系统解析鼠丘不同演替阶段植物功能群的变化规律,为更好地理解鼠丘-植被镶嵌体中植物群落的动态变化提供参考。

参 考 文 献 (References)

- Bai MM, Xu JJ, Wei KT, Jing YY, Xu CL, Yu XJ. 2024. Rest grazing from the critical period of soil thawing in alpine meadow of Tibetan Plateau is conducive to the sexual reproduction of *Polygonum viviparum*. *Sustainability*, 16(5): 1984
- Bao GS, Wang HS, Wang YQ, Zeng H, Ma GL, Luozangangmao. 2016. Effects of plateau zokor burrowing activity on soil nutrient spatial heterogeneity in alpine grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 25(7): 95-103 (in Chinese) [鲍根生, 王宏生, 王玉琴, 曾辉, 马戈亮, 洛藏昂毛. 2016. 高原鼯鼠造丘活动对高寒草地土壤养分空间异质性的影响. *草业学报*, 25(7): 95-103]
- 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, Bullock JM, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, L Fry E, Johnson D, et al. 2021. Combating global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2: 720-735
- Chen SH, Zhang H, Wang LQ, Zhanbula, Zhao ML. 2001. Grass plant roots in northern China. Changchun: Jilin University Press, pp. 531 (in Chinese) [陈世鑽, 张昊, 王立群, 占布拉, 赵萌莉. 2001. 中国北方草地植物根系. 长春: 吉林大学出版社, pp. 531]
- Du EZ, Terror C, Pellegrini AFA, Ahlström A, van Lissa CJ, Zhao X, Xia N, Wu XH, Jackson RB. 2020. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation. *Nature Geoscience*, 13: 221-226
- Fan YL, Hu N, Ding SY. 2024. Formation and maintenance mechanism of ecosystem services based on plant functional groups. *Acta Ecologica Sinica*, 44(1): 60-66 (in Chinese) [范玉龙, 胡楠, 丁圣彦. 2024. 基于植物功能群的生态系统服务形成与维持机制研究. *生态学报*, 44(1): 60-66]
- Gadgil M, Solbrig OT. 1972. The concept of *r*- and *K*-selection: evidence from wild flowers and some theoretical considerations. *The American Naturalist*, 106(947): 14-31
- Grime JP. 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 111(982): 1169-1194
- Hu L, Ade LJ, Zi HB, Wang CT. 2015. Effects of plateau zokor disturbance and restoration years on soil nutrients and microbial functional diversity in alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(9): 2794-2802 (in Chinese) [胡雷, 阿的鲁骥, 字洪标, 王长庭. 2015. 高原鼯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. *应用生态学报*, 26(9): 2794-2802]
- Ji Y, Yuan S, Fu HP, Yue C, Man DH, Yang SW, Wu XD. 2019. The relationships between the mounds of transbaikal zokor and plants with different root types. *Acta Theriologica Sinica*, 39(2): 162-171 (in Chinese) [纪羽, 袁帅, 付和平, 岳闯, 满都呼, 杨素文, 武晓东. 2019. 草原鼯鼠土丘与不同根系类型植物的关系. *兽类学报*, 39(2): 162-171]
- Jiang XL, Zhang WG, Yang ZY, Du GZ. 2004. Plant diversity variations in zokor-mound communities along a successional stage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(5): 814-818 (in Chinese) [江小雷, 张卫国, 杨振宇, 杜国祯. 2004. 不同演替阶段鼯鼠土丘群落植物多样性变化研究. *应用生态学报*, 15(5): 814-818]
- 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
- Lavorel S, Rochette C, Lebreton JD. 1999. Functional groups for response to disturbance in Mediterranean old fields. *Oikos*, 84(3): 480
- Li CY, Li XL, Yang YW, Shi Y, Zhang J. 2024. Comparative responses of carbon flux components in recovering bare patches of degraded alpine meadow in the source zone of the Yellow River. *Science of the Total Environment*, 908: 168343
- Liu XH, Fu CX, Fan GH, Huang YX. 2024. Research progress on the trade-off relationship of reproductive traits in grassland plants. *Chinese Journal of Ecology*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240119.1409.006.htm> (in Chinese) [刘翔赫, 付常兴, 范高华, 黄迎新. 2024. 草地植物繁殖性状权衡关系研究进展. *生态学杂志*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240119.1409.006.html>]
- Liu Y, Yu X, Yu Y, Hu WH, Lai JS. 2023. Application of "rdacca.hp" R package in ecological data analysis: case and progress. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47(1): 134-144 (in Chinese) [刘尧, 于馨, 于洋, 胡文浩, 赖江山. 2023. R程序包"rdacca.hp"在生态学数据分析中的应用: 案例与进展. *植物生态学报*, 47(1): 134-144]
- Lü JP, Zhang CH, Zhang L, Zhang YY, Du GZ, Wang CY. 2012. A study on seed germination characteristics of 15 Chenopodiaceae and Polygonaceae species of the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 29(2): 238-244 (in Chinese) [吕俊平, 张春辉, 张蕾, 张莹莹, 杜国祯, 王晨阳. 2012. 青藏高原东缘15种藜科和蓼科植物种子萌发特性. *草业科学*, 29(2): 238-244]
- Niu KC, Ji SN, Badingqiuying, Smith AT, Lechowicz M. 2022. Embedding trait-based ecology within indigenous knowledge to advance sustainable management of Tibetan rangeland. *Applied Vegetation Science*, 25(4): e12687
- 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
- Song YC. 2017. Vegetation ecology. 2nd edition. Beijing: Higher Education Press, pp. 703 (in Chinese) [宋永昌. 2017. 植被生态学. 2版. 北京: 高等教育出版社, pp. 703]
- Sun GJ, Zhang R, Zhou L. 2003. Trends and advances in researches on plant functional diversity and functional groups. *Acta Ecologica Sinica*, 23(7): 1430–1435 (in Chinese) [孙国钧, 张荣, 周立. 2003. 植物功能多样性与功能群研究进展. *生态学报*, 23(7): 1430–1435]
- Tan J. 2019. Study on soil denudation and plant community succession in pika mound. Master thesis. Xining: Qinghai University (in Chinese) [谈静. 2019. 鼠丘土壤剥蚀及植物群落演替的研究. 硕士学位论文. 西宁: 青海大学]
- Wang T, Yang SW, Hua R, Chu B, Ye GH, Niu YJ, Tang ZS, Hua LM. 2020. Response characteristics of composition of plant functional groups to various grassland degradation conditions in alpine steppe on the Tibetan Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 40(7): 2225–2233 (in Chinese) [王婷, 杨思维, 花蕊, 楚彬, 叶国辉, 牛钰杰, 唐庄生, 花立民. 2020. 高寒草原植物功能群组成对退化程度的响应. *生态学报*, 40(7): 2225–2233]
- Yan ZY, Huang QY, Wang JF, Xie LH, Ni HW. 2012. Composition and life form spectrum analysis of plant species in Lanyuan grassland nature preserve area of Heilongjiang Province. *Territory & Natural Resources Study*, (3): 94–96 (in Chinese) [焉志远, 黄庆阳, 王继丰, 谢立红, 倪红伟. 2012. 黑龙江兰远草原自然保护区植物的种类组成与生活型谱分析. *国土与自然资源研究*, (3): 94–96]
- Yang YJ. 2018. The study of variation in resource allocation and reproductive strategies of two species of *Saussurea* DC. with elevation in Qinghai-Tibet Plateau. Master thesis. Lanzhou: Northwest Normal University (in Chinese) [杨亚军. 2018. 青藏高原两种风毛菊属植物资源分配与繁殖对策随海拔的变化研究. 硕士学位论文. 兰州: 西北师范大学]
- 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. 高原鼯鼠(*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, Zhang FY, Hua XZ, Tang ZS, Hua LM. 2024. Relation between plant community species distribution and soil factors in plateau zokor habitat in alpine meadow, the eastern Qilian Mountains. *Grassland and Turf*, 44(1): 168–174 (in Chinese) [叶国辉, 楚彬, 张飞宇, 华铎泽, 唐庄生, 花立民. 2024. 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. *草原与草坪*, 44(1): 168–174]
- Zhang CJ, Yang J, Kang YK, Zhang Q, Fang QH, Cai ZY, Yao BH, Su JH. 2023. Effects of disturbance of plateau zokor on asexual reproduction characteristics of *Potentilla anserina*. *Grassland and Turf*, 43(1): 59–64 (in Chinese) [张彩军, 杨晶, 康宇坤, 张倩, 方青慧, 蔡志远, 姚宝辉, 苏军虎. 2023. 高原鼯鼠扰动对鹅绒委陵菜无性系特征的影响. *草原与草坪*, 43(1): 59–64]
- Zhao YE, Lei ZY, Wan YX, Zhou CL, Yi GP, Ji R. 2024. Characteristics of shrub insect community and its response to environmental factors and plant community characteristics in the Irtysh River Basin. *Journal of Plant Protection*, 51(3): 609–618 (in Chinese) [赵远娥, 雷子怡, 万育欣, 周成龙, 易光平, 季荣. 2024. 额尔齐斯河流域灌木昆虫群落特征及对环境因子和植物群落特征的响应. *植物保护学报*, 51(3): 609–618]
- Zhu XX, Wen ZM, Zheng C, Gao Y, Zhang GY, Wang WW, Diao XC, Wan JF. 2023. Functional traits of plant life forms and their responses to environmental factors in the Yanhe River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 30(6): 328–336 (in Chinese) [朱晓旭, 温仲明, 郑诚, 高原, 张格语, 王维维, 刁晓晨, 万锦枫. 2023. 延河流域不同生活型植物功能性状特征及其对环境变化的响应. *水土保持研究*, 30(6): 328–336]

(责任编辑:李美娟)