

DOI: 10.5846/stxb202012253273

方青慧, 杨晶, 张彩军, 张倩, 苏军虎. 放牧管理模式对高原鼢鼠 (*Eospalax baileyi*) 鼠丘形态特征的影响. 生态学报, 2022, 42(4): 1619-1628.

Fang Q H, Yang J, Zhang C J, Zhang Q, Su J H. Effects of grazing management regimes on mound morphological characteristics of plateau zokors (*Eospalax baileyi*). Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1619-1628.

放牧管理模式对高原鼢鼠 (*Eospalax baileyi*) 鼠丘形态特征的影响

方青慧^{1,2,3}, 杨晶^{1,2,3}, 张彩军^{1,2,3}, 张倩^{1,2,3}, 苏军虎^{1,2,3,*}

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/甘肃省草业工程实验室/中美草地畜牧业可持续发展研究中心, 兰州 730070

2 甘肃农业大学-新西兰梅西大学草地生物多样性研究中心, 兰州 730070

3 甘肃省祁连山草原生态系统野外科学观测研究站, 武威 733200

摘要:为明晰放牧对高原鼢鼠 (*Eospalax baileyi*) 造丘活动的影响, 于 2019 年 5 月、8 月和 10 月分别对禁牧 (No grazing, NG)、生长季休牧 (Rest grazing in growing season, RG)、传统放牧 (Traditional grazing, TG) 和连续放牧 (Continuous grazing, CG) 4 种放牧管理模式样地下高原鼢鼠的新鼠丘 (2 个月内形成) 半径、高度、表面积和体积等进行测定, 并分析其表面积、体积与土壤和植被生物量间的关系。结果发现, 放牧管理模式显著影响了高原鼢鼠鼠丘形态特征, 且具有季节性差异。NG 下鼠丘的半径、表面积和体积最大, 而 CG 下鼠丘的体积和表面积显著变小 ($P < 0.05$), 在 8 月和 10 月, 鼠丘半径在 CG 样地显著小于其他 3 种放牧模式样地 ($P < 0.05$); 8 月 TG 下鼠丘高度最高, 而 5 月和 10 月 NG 下鼠丘高度最高, 鼠丘高度在 CG 样地显著小于 NG 样地 ($P < 0.05$)。冗余分析 2 个排序轴几乎全部解释了土壤因子及地下生物量与鼠丘特征之间的关系, 但各放牧管理模式影响因子不同, NG 样地的土壤容重 ($P < 0.05$)、土壤紧实度 ($P < 0.01$) 和莎草科植物的地上生物量 ($P < 0.01$), RG 样地的地下生物量 ($P < 0.01$)、土壤紧实度 ($P < 0.01$) 和豆科植物的地上生物量 ($P < 0.01$), TG 样地的禾本科和豆科植物的地上生物量 ($P < 0.01$), CG 样地的土壤水分、地下生物量、土壤紧实度 ($P < 0.05$) 和莎草科植物的地上生物量 ($P < 0.01$) 均显著影响了鼠丘的形态特征。可见, 放牧会影响高原鼢鼠的鼠丘形态特征, 进而对草地的演替产生不同的影响。

关键词:放牧管理; 高原鼢鼠; 鼠丘体积; 鼠丘表面积

Effects of grazing management regimes on mound morphological characteristics of plateau zokors (*Eospalax baileyi*)

FANG Qinghui^{1,2,3}, YANG Jing^{1,2,3}, ZHANG Caijun^{1,2,3}, ZHANG Qian^{1,2,3}, SU Junhu^{1,2,3,*}

1 College of Grassland Science, Key Laboratory of Grassland Ecosystem (Ministry of Education), Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U.S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Gansu Agricultural University-Massey University Research Centre for Grassland Biodiversity, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

3 Gansu Qilianshan Grassland Ecosystem Observation and Research Station, Wuwei 733200, China

Abstract: The rodent damage by plateau zokor in the process of alpine meadow grazing is a key problem in its utilization and management. Grazing is one of the most important ways to use grassland. Grazing management regimes, as a utilization system index to control grazing intensity, maintain livestock quantity and grassland ecosystem balance, which have different influences on grassland community structure, grassland productivity, soil structure, and nutrient properties. The plateau zokor (*Eospalax baileyi*) is a kind of underground rodent endemic to the Qinghai-Tibet Plateau, the embodiment of their

基金项目:国家自然科学基金项目 (31760706); 甘肃省陇原青年创新创业人才项目 (LYRC2018-02) 和甘肃省科技计划项目 (20JR10RA564)

收稿日期: 2020-12-25; **网络出版日期:** 2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sujh@gsau.edu.cn

different functions is the key to judge the "benefit and harm". Their continuous earthmoving and mound building is also one of the important manifestations of their harm, and the size of the mound building and the change of the excavated soil properties are the key factors affecting the grassland. Therefore, it is of great significance for rodent control and grassland management and utilization by elucidating the changes of mound characteristics in alpine meadow under different grazing management systems. In order to clarify the effect of grazing management regimes on the mound-building activity of plateau zokors, the radius, height, surface area and volumes of new mounds (formed within 2 months) under four kinds of grazing management regimes, namely no grazing (NG), rest grazing in the growing season (RG), traditional grazing (TG), and continuous grazing (CG) plots, were measured in May, August, and October 2019, and the relationship between surface area and volume and soil and vegetation biomass was analyzed. The results showed that the grazing management regimes significantly affected the morphological characteristics of mounds with seasonal differences. The radius, surface area and volume of mounds under no grazing regime were the largest, while the volume and surface area of mounds under continuous grazing regime decreased significantly ($P < 0.05$), and the radius of mounds under the continuous grazing regime was significantly less than that of other three grazing regimes in August and October ($P < 0.05$); the height of mounds under traditional grazing regime was the largest in August, while they were the largest under no grazing regime in May and October, and they were significantly less under continuous grazing regime than that under no grazing regime ($P < 0.05$). The two sequencing axes of redundancy analysis almost entirely explained the relationship of mounds with environmental factors and underground biomass. However, the influencing factors were different under different grazing management regimes. There were great effects on the characteristics of zokor mounds from soil bulk density ($P < 0.05$), soil compactness ($P < 0.01$) and aboveground biomass of cyperaceae plants ($P < 0.01$) under no grazing regimes. There were great effects on the characteristics of zokor mounds from underground biomass ($P < 0.01$), soil compactness ($P < 0.01$) and aboveground biomass of leguminosae plants ($P < 0.01$) under rest grazing in growing season regime. There were great effects on the characteristics of zokor mounds from aboveground biomass of gramineae and leguminosae plants ($P < 0.01$) under traditional grazing regimes, and there were great effects on the characteristics of zokor mounds from soil moisture, underground biomass, soil compactness ($P < 0.05$) and aboveground biomass of cyperaceae plants ($P < 0.01$) under continuous grazing regimes. Grazing can affect the mound-building activity of plateau zokors, and then had different effects on the succession of grassland.

Key Words: grazing management; plateau zokors; volume of mounds; surface area of mounds

放牧是草地的主要利用方式之一,对草地的演替和草地生产力有显著影响^[1]。放牧过程中家畜采食、践踏和排泄会影响草地及其功能的发挥,不同时间的扰动及草地植物、微生物和动物等各个组分间的相互作用,也会对草地产生显著不同的影响。然而,家畜放牧除对土壤理化性质、植被特性和草地生产力等有着显著影响外^[2],对啮齿动物的分布、生活空间和繁殖特性等也有影响^[3]。家畜的踩踏和采食可使啮齿动物喜食杂草比例上升,其食物资源的分布结构发生改变^[4]。同时,较低的覆盖水平会使小型哺乳动物的种类增加,成为草地管理的一个棘手问题^[5],而啮齿动物的推土造丘活动是其对草地影响的主要因素,会影响到草地土壤特性及植物群落结构的改变,甚至会出现草地秃斑,造成严重的水土流失等。

放牧管理模式作为控制放牧强度、维持家畜数量和草地生态系统平衡的利用体系指标^[2],对草地群落结构、草地生产力、土壤结构和养分性质等产生了不同的影响^[6]。针对放牧强度和放牧频率的草原管理模式,已经有禁牧、自由放牧和轮牧等不同模式^[7],其中禁牧是草地管理最常用及草地恢复最快最有效的手段,也是促进草地生态系统中物质循环和能量流动,调节食草动物与植物之间关系的有效方法,但长期禁牧不利于地上植被的继续恢复,甚至会导致草地生产力降低等^[1]。通过对家畜放牧强度与放牧时间上的调整,近年来又产生了传统放牧和生长季休牧等不同的放牧管理模式^[8],而确定合理的放牧管理模式和放牧时期更有利于草地健康发展和草地保护。因此,全面评价不同放牧管理模式对草地的影响,并采用适宜的管理措施是草地可持续利用的关键。

高原鼢鼠(*Eospalax baileyi*)是青藏高原独有的地下啮齿动物^[9],其在取食、交配、构筑巢窝和洞道挖掘等活动中不断啃食牧草,并向地表堆土形成鼠丘,过多的鼠丘会覆盖植物,造成植物死亡,在一定程度上也造成了水土流失,影响着草地生态系统的结构和功能^[10-11]。鼠丘的表面积大小及其土壤性质的变化也是对草地产生影响的关键,高原鼢鼠推土形成的新鼠丘属于次生裸地^[12],在水力和风力长期侵蚀及家畜践踏的过程中其形状发生改变,形成的鼠丘斑块面积增大^[13]。由于鼠丘斑块中心与边缘的理化性质不同^[14],其差异导致斑块的边缘和中心演替程度不同,对草地产生的影响不同。除此之外,家畜的踩踏也会使土壤结构发生改变,土壤变紧实,增加高原鼢鼠在挖掘过程中的能量消耗^[15],这些因素都会影响高原鼢鼠的造丘活动,鼠丘的不同特征也直接关系到其影响的性质(危害性)及其大小。目前仅见鼠丘分布格局^[16]、鼠丘演替过程中植被及其土壤理化性质的变化和鼠丘密度等的研究^[17-18]。而阐明不同放牧管理模式下高寒草甸高原鼢鼠鼠丘的变化特征,对评价高原鼢鼠的危害和影响及草地管理利用具有重要意义。基于此,本研究于5月、8月和10月测定禁牧、生长季休牧、传统放牧和连续放牧4种放牧管理模式下高原鼢鼠当季鼠丘(采样时近2个月内形成)的半径、高度、表面积和体积,同时结合其土壤紧实度、水分、容重和地上、地下生物量的不同变化,旨在明确放牧对高原鼢鼠鼠丘形态特征的影响,为高原鼢鼠影响评价、鼠害防治及草地管理提供理论依据。

1 样地概况及研究方法

1.1 样地概况

试验样地位于甘肃省武威市天祝藏族自治县抓喜秀龙镇马营沟附近(37°11'N,102°32'E),海拔为2700—3100m,昼夜温差较大,空气较为稀薄,太阳辐射强,气候寒冷潮湿,年均降水量416mm,主要集中于7—9月份,年蒸发量为1592mm,年均气温-0.1℃,≥0℃的年积温1380℃,无绝对无霜期。优势种主要有矮嵩草(*Kobresia humilis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和苔草(*Carex humilis*)等,坡地有灌丛分布;动物以啮齿类为主,有高原鼢鼠和达乌尔黄鼠(*Spermophilus dauricus*)等近10种,其中高原鼢鼠是当地的优势种之一^[19]。

1.2 试验设计与取样方法

本试验选择4种放牧管理模式的高寒草甸样地,包括禁牧(NG)样地(样地面积为7hm²,自2010年起全年禁牧,无放牧)、生长季休牧(RG)样地(样地面积为18hm²,管理模式大于10年,每年在4月20日—9月20日间休牧,其余时间自由放牧,放牧率为4.86羊hm⁻²a⁻¹)、传统放牧(TG)样地(样地面积为18hm²,管理模式大于10年,每年在6月20日—9月20日间休牧,其余时间自由放牧,放牧率为6.08羊hm⁻²a⁻¹)和连续放牧(CG)(样地面积为2hm²,管理模式大于20年,全年自由放牧,放牧率为8.57羊hm⁻²a⁻¹)^[8]。

分别于2019年5月下旬,8月中旬和10月下旬在试验样地内选取25个当季(即5月、8月和10月不同时期鼠丘是采样时近2个月内形成的)形成的新鼠丘(不足25个新鼠丘则全部选取),用卷尺测得其最大直径、最小直径及其高度,以鼠丘的俯视图最大直径和最小直径的均值作圆^[20],利用球缺公式计算其体积(*V*)和表面积(*S*)大小。

$$V = \frac{1}{6}\pi h(3r^2 + h^2)$$

$$S = 2\pi rh$$

式中, π 为圆周率, r 为鼠丘半径, h 为鼠丘高度。

分别于这3个时期在各试验样地选取9个样点,在每个样点附近挖取一个30cm的剖面,以10cm为间隔,用体积为100cm³的环刀取土壤样品,用铝盒烘干法测定其水分和容重;取样后用SC-900土壤紧实度仪在选取的9个样点附近任选5个点测定每个样地的土壤紧实度,每2.5cm记录一次,测0—30cm的紧实度,求其平均值^[21]。最后,在每个样地内按照“W”型选取9个样点,清除地表杂物,每个样点建立20cm×20cm的样方,分0—10,10—20,20—30cm取生物量,将土样装入60目尼龙网袋,抖落散土,并用清水冲洗干净,并在70℃下烘至恒重,称其干重,其中在8月植物生长旺盛时期进行地上生物量的测定,在每个样地内设9个样

方,按照禾本科、莎草科、豆科和杂草类 4 大功能群分类,齐地刈割地上植物,将其装入信封,在恒温 70℃ 下烘干称重^[22]。

1.3 数据分析

用 Excel 2016 进行数据统计并制作表格;用 SPSS 23.0 软件对各指标数据进行 One-way ANOVA 分析,并对鼠丘表面积和体积与植物各功能群地上生物量之间进行相关性分析;应用 R 语言软件 Vegan 软件包基于线性模型对鼠丘特征与土壤因子(土壤水分、土壤容重和土壤紧实度)及地下生物量之间的关系进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA),所有排序的显著性均由 Permutation test(置换 999 次)进行检验^[23];用 GraphPad Prism8 进行图片绘制。

2 结果与分析

2.1 放牧管理模式对植物地上、地下生物量的影响

放牧管理模式显著影响了植物地上生物量(表 1)。与 NG 相比,禾本科植物和豆科植物的地上生物量在 RG、TG 和 CG 样地均显著降低($P<0.05$),其大小依次为 $NG>RG>TG>CG$;莎草科植物的地上生物量在 RG 和 CG 样地分别较 NG 样地降低了 73.86% 和 84.62%,在 TG 样地增加了 38.30%,其中在 TG 样地显著高于 NG、RG 和 CG 样地($P<0.05$);放牧管理模式也显著影响了杂草类植物的地上生物量,其中 TG 和 CG 样地分别较 NG 样地增加了 20.32% 和 8.95%,而在 RG 样地降低了 15.65% ($P<0.05$)。

放牧管理模式显著影响了植物地下生物量的变化,除 8 月 10—20cm 土层的地下生物量外,5 月、8 月和 10 月 0—20cm 土层的地下生物量均为 $NG>TG>RG>CG$,其中在 0—10cm 土层,5 月和 8 月 NG 样地的地下生物量在显著大于 RG、TG 和 CG 样地的地下生物量($P<0.05$),而 10 月 CG 样地的地下生物量显著小于 NG、RG 和 TG 样地的地下生物量($P<0.05$),10—20cm 土层和 20—30cm(5 月和 10 月)土层的地下生物量在 CG 样地均显著小于其它 3 种放牧管理模式($P<0.05$)。8 月 RG、TG 和 CG 样地 20—30cm 土层的地下生物量较 NG 分别减少了 59.79%、25.80% 和 56.12%,其中在 RG 和 CG 样地与 NG 样地存在显著差异($P<0.05$)(表 1)。

表 1 不同放牧管理模式下地上地下生物量变化特征

Table 1 Change characteristics of aboveground and underground biomass under different grazing management regimes

月份 Months	处理 Treatments	地下生物量 Underground biomass			地上生物量 Aboveground biomass			
		0—10cm	10—20cm	20—30cm	GRA	CYP	LEG	MIS
5	NG	2321.83±180.43a	905.31±84.06a	409.34±4.49a	—	—	—	—
	RG	1329.94±48.43c	762.63±18.92a	445.01±64.81a	—	—	—	—
	TG	1844.59±35.30b	886.63±87.42a	419.53±36.78a	—	—	—	—
	CG	1222.93±114.89c	387.26±51.55b	122.29±19.29b	—	—	—	—
8	NG	4875.75±145.64a	669.33±58.05a	449.92±16.75a	193.86±2.81a	67.80±2.33b	83.91±2.79a	112.62±7.17b
	RG	2726.92±221.90b	636.00±116.08a	180.92±67.88b	168.98±4.35b	17.72±2.49c	69.03±3.48b	95.00±7.11c
	TG	2758.42±1234.45b	553.33±125.35a	333.83±102.23ab	137.98±9.09c	93.77±4.19a	59.56±2.31c	135.50±0.47a
	CG	2631.75±324.41b	352.42±49.10b	197.42±5.28b	27.54±1.10d	10.43±0.51c	6.07±0.09d	122.70±1.26ab
10	NG	2895.75±442.64a	522.67±84.79a	312.92±119.68a	—	—	—	—
	RG	2716.83±305.56a	538.83±70.02a	362.50±39.26a	—	—	—	—
	TG	2780.08±289.40a	527.58±65.69a	390.75±143.23a	—	—	—	—
	CG	2210.67±72.02b	351.33±31.26b	234.25±24.91b	—	—	—	—

NG:禁牧 No grazing;RG:生长季休牧 Growing season rest grazing;TG:传统放牧 Traditional grazing;CG:连续放牧 Continuous grazing;GRA:禾本科 Gramineae;CYP:莎草科 Cyperaceae;LEG:豆科 Leguminosae;MIS:杂草类 Miscellaneous;—:无数据 No data;不同的字母表示同一季节不同放牧管理模式间的差异性显著($P<0.05$)

2.2 放牧管理模式对土壤因子的影响

放牧管理模式显著影响了土壤水分含量的变化,5 月 RG、TG 和 CG 样地的土壤水分分别较 NG 样地增加

了 11.65%、8.43% 和 19.35%; 8 月和 10 月 CG 样地的土壤水分显著大于 NG、RG 和 CG ($P < 0.05$); 5 月、8 月和 10 月土壤容重大小依次为 $CG > TG > RG > NG$, 其中 5 月 CG 样地的土壤容重较 NG 样地显著增加 ($P < 0.05$), 8 月 RG、TG 和 CG 样地分别较 NG 样地分别增加了 8.33%、10.42% 和 29.17% (5 月), 2.94%、11.76% 和 91.18% (8 月) 及 8.82%、14.71% 和 61.76% (10 月), 而只有 CG 样地的土壤容重较 NG 样地变化显著 ($P < 0.05$); 5 月 RG、TG 和 CG 样地的土壤紧实度较 NG 样地均显著增加 ($P < 0.05$), 8 月和 10 月 4 种放牧管理模式土壤紧实度的大小依次为 $CG > TG > RG > NG$, 其中在 CG 样地显著高于其它样地 ($P < 0.05$) (图 1)。

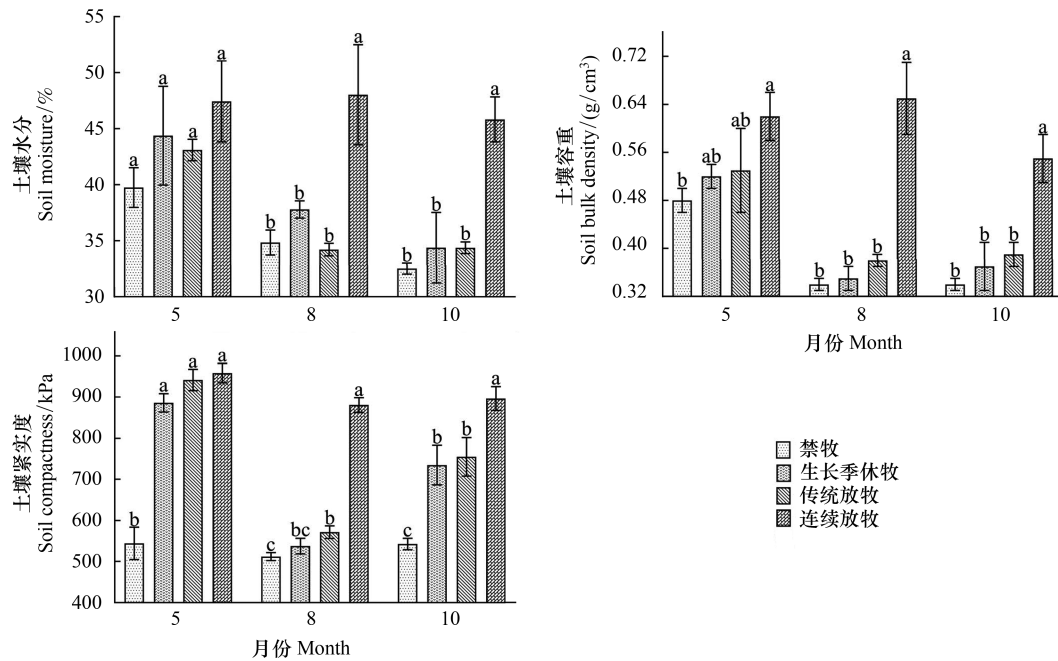


图 1 不同放牧管理模式土壤因子的变化

Fig.1 The change of different grazing management remiges on soil factors

2.3 不同放牧管理模式高原鼢鼠鼠丘形态特征变化

不同放牧管理模式高原鼢鼠的鼠丘形态特征变化存有显著差异, 5 月放牧管理模式对高原鼢鼠鼠丘半径的影响不显著, 但 8 月和 10 月 CG 样地的鼠丘半径显著小于其它放牧管理模式鼠丘半径 ($P < 0.05$); RG、TG 和 CG 样地的鼠丘体积在 5 月较 NG 样地分别降低了 20.09%、14.62% 和 31.72%, 其中在 NG 和 CG 样地存在显著差异 ($P < 0.05$), 8 月鼠丘体积在 RG 和 CG 样地显著小于 NG 和 TG 样地 ($P < 0.05$), 10 月鼠丘体积在 NG、RG、TG 和 CG 样地依次减小且在 CG 样地较其它样地变化显著 ($P < 0.05$); 5 月鼠丘高度在 NG、RG、TG 和 CG 样地依次减小, 其中 CG 和 NG 样地存在显著差异 ($P < 0.05$), 8 月 RG 和 CG 样地的鼠丘高度较 NG 和 TG 样地的鼠丘高度显著减小 ($P < 0.05$), 10 月 CG 样地鼠丘高度显著小于其它样地的鼠丘高度 ($P < 0.05$); 鼠丘表面积在 5 月和 8 月的大小依次为 $NG > TG > RG > CG$, 其中在 CG 样地显著小于 NG 样地, 而 10 月在 NG、RG、TG 和 CG 样地依次减小, 其中在 CG 样地显著小于其它样地 ($P < 0.05$) (图 2)。

2.4 放牧管理模式鼠丘形态特征与土壤因子及植被特征间的关系

以土壤水分、土壤容重、土壤紧实度和地下生物量作为解释变量, 鼠丘体积和表面积作为响应变量进行 RDA 分析 (图 3)。NG 样地的地下生物量对鼠丘体积的影响较大, CT 样地各土壤因子和地下生物量对鼠丘体积和表面积的影响均较小, RG 样地的土壤水分、土壤容重和地下生物量对鼠丘表面积和体积的影响较大, CG 样地的土壤水分、容重和地下生物量对鼠丘表面积影响较大, 而土壤紧实度对鼠丘体积影响较大。

不同放牧管理模式高原鼢鼠鼠丘大小与土壤因子、地下生物量 RDA 结果 (表 2) 表明, NG 样地土壤因

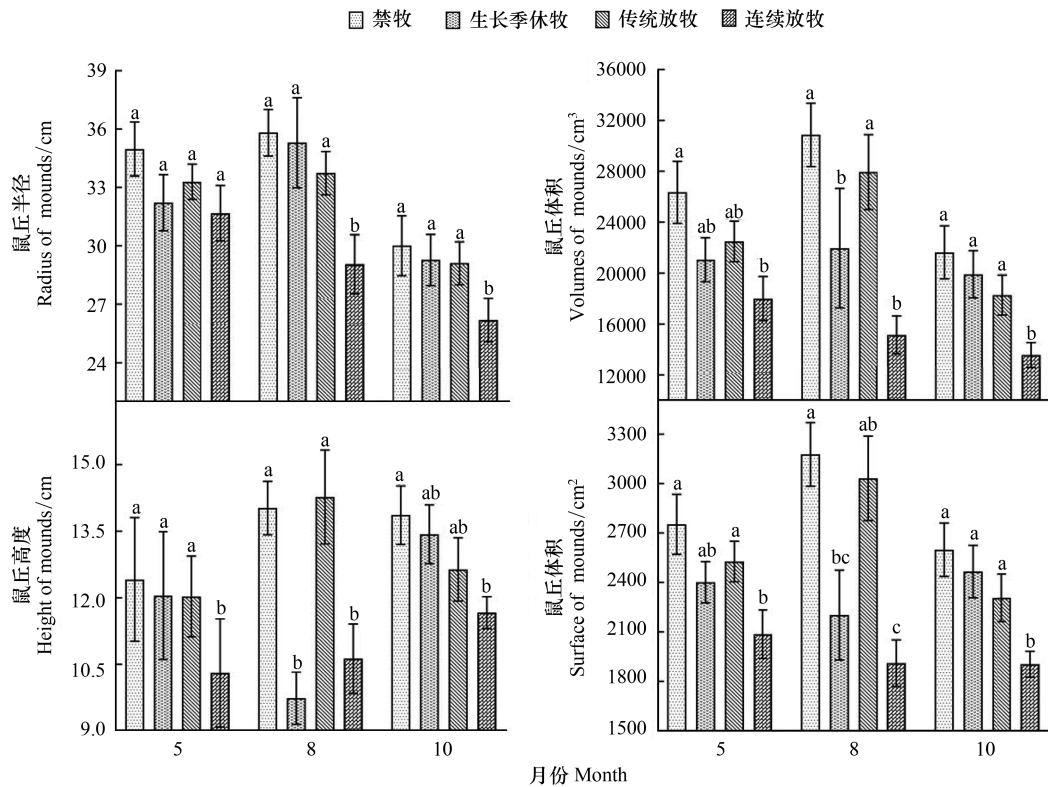


图 2 不同放牧管理模式下高原鼯鼠鼠丘形态特征

Fig.2 The mound morphological characteristics of mound in the plateau zokor under different grazing management regimes

表 2 不同放牧管理模式下鼠丘表面积和体积与土壤因子、地下生物量 RDA 结果

Table 2 RDA results of surface area and volumes of mounds and soil factors and underground biomass under different grazing management regimes

参数 Parameter	禁牧 No grazing		生长季休牧 Rest grazing in growing season		传统放牧 Traditional grazing		连续放牧 Continuous grazing	
	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2
特征值 Eigenvalues	0.16	0.02	0.80	0.03	0.20	0.01	0.53	0.03
鼠丘大小变化百分比/% Percentage change in mound size	8.21	1.17	39.87	1.42	9.75	0.29	26.37	1.47
鼠丘大小变化累积百分比/% Cumulative percentage change in mound size	8.21	9.38	39.87	41.29	9.75	10.04	26.37	27.84
土壤因子、地下生物量-鼠丘大小变化 百分比/% Soil factors, underground biomass-Percentage change in mound size	87.54	12.45	96.57	3.42	97.10	2.89	94.73	5.26
土壤因子、地下生物量-鼠丘大小累积变化 百分比/% Soil factors, underground biomass-cumulative percentage change in mound size	87.54	99.99	96.57	100.00	97.10	99.99	94.73	99.99
蒙特卡罗置换检验 Monte Carlo replacement test	P=0.700		P=0.018		P=0.659		P=0.107	

RDA: 冗余分析, Redundancy analysis

子及地下生物量只能解释 9.38% 的鼠丘大小变化, 2 轴累计解释 99.99% 的土壤因子及地下生物量与鼠丘特征之间的关系; 生长季休牧第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 39.87% 和 1.42% 的鼠丘大小变化, 土壤水分、土壤容重、土壤紧实度和地下生物量只能解释 41.29% 的鼠丘特征变化, 还有 58.71% 是其不能解释的。第 1 排

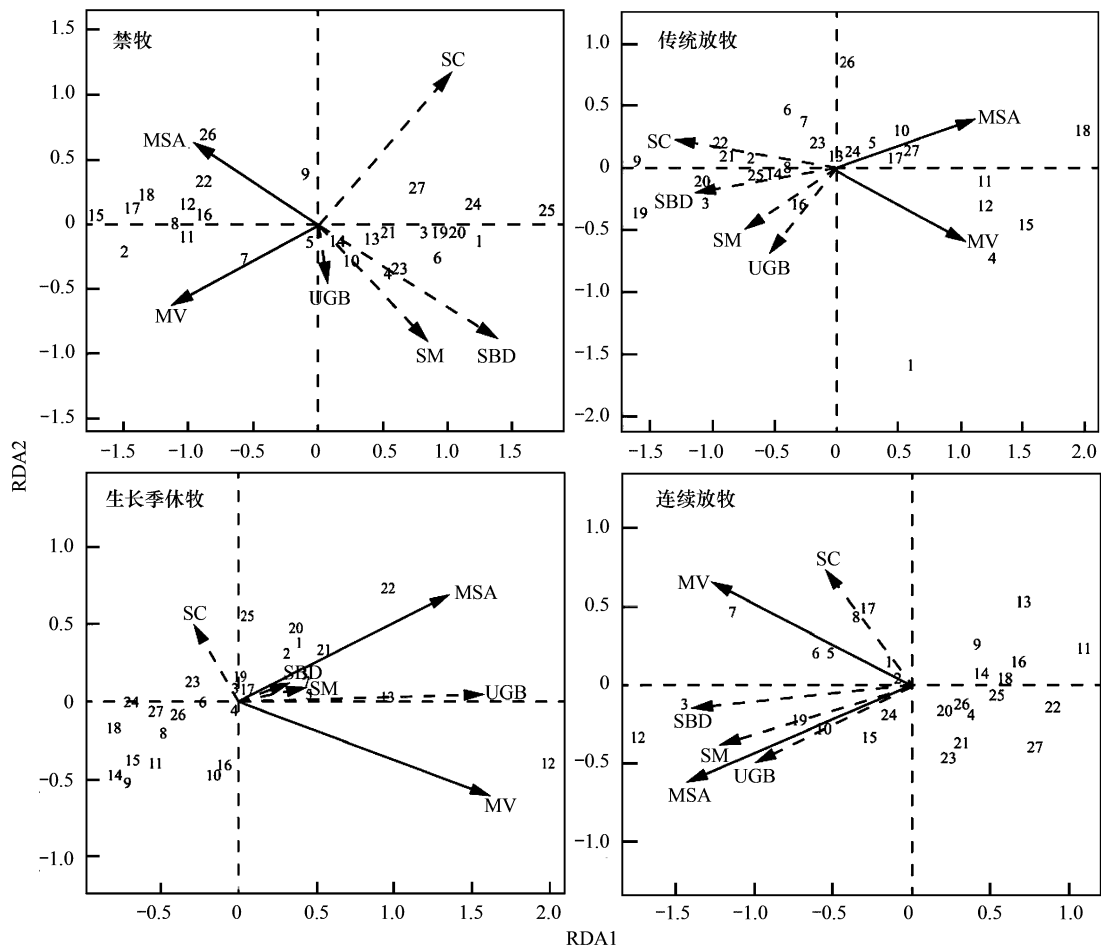


图 3 鼠丘表面积和体积与土壤因子、地下生物量的 RDA 排序图

Fig.3 RDA ranking between surface area and volumes of mounds and soil factors, underground biomass

MV: 鼠丘体积, Volumes of mounds; MSA: 鼠丘表面积, Surface area of mounds; SM: 土壤水分, Soil moisture; SBD: 土壤容重, Soil bulk density; SC: 土壤紧实度, UGB: 地下生物量, Underground biomass; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis

序轴和第 2 排序轴解释分别解释 96.57% 和 3.43% 的土壤因子及地下生物量与鼠丘特征之间的关系, 2 轴累计解释 100.00%; 传统放牧样地 RDA 分析的 2 轴累计解释 10.04% 的鼠丘大小变化, 第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 97.10% 和 2.89% 的土壤因子及地下生物量与鼠丘特征之间的关系; 连续放牧样地 RDA 分析的 2 轴累计解释 27.84% 的鼠丘大小变化, 第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释 94.73% 和 5.26% 的土壤因子及地下生物量与鼠丘特征之间的关系, 由此可说明土壤因子及地下生物量的变化并不能完全解释鼠丘大小的变化, 但排序轴能很好地反映土壤因子及地下生物量与鼠丘的大小之间的变化关系。生长季休牧下蒙特卡罗置换检验结果显著 ($P < 0.05$), 禁牧、传统放牧和连续放牧下蒙特卡罗置换检验结果不显著 ($P > 0.05$)。

在各土壤因子及地下生物量与鼠丘特征的 RDA 排序相关系数中, 放牧管理模式影响下土壤水分、土壤容重、土壤紧实度和地下生物量对鼠丘特征的影响不同, 按照决定系数 r^2 排序, 禁牧样地的结果为土壤紧实度 > 土壤容重 > 土壤水分 > 地下生物量, 其中土壤容重对鼠丘特征的影响显著 ($P < 0.05$), 土壤紧实度对鼠丘特征的影响极显著 ($P < 0.01$); 生长季休牧和传统放牧样地的结果均为地下生物量 > 土壤紧实度 > 土壤水分 > 土壤容重, 其中土壤紧实度对鼠丘特征的影响显著 ($P < 0.05$), 地下生物量对鼠丘特征的影响极显著 ($P < 0.01$); 传统放牧样地各因子对鼠丘特征的影响均不显著 ($P > 0.05$)。连续放牧样地的结果为土壤紧实度 > 地下生物量 > 土壤水分 > 土壤容重, 其中土壤紧实度, 地下生物量和土壤水分对鼠丘特征的影响显著 ($P < 0.05$) (表 3)。

表 3 不同放牧管理模式下鼠丘表面积和体积与土壤因子和地下生物量的 RDA 排序相关系数

Table 3 RDA ranking correlation coefficients of different grazing management regimes between surface area and volumes of mounds and soil factors and underground biomass

环境因子 Environmental factors	禁牧 No grazing		生长季休牧 Rest grazing in growing season		传统放牧 Traditional grazing		连续放牧 Continuous grazing	
	r^2	P	r^2	P	r^2	P	r^2	P
土壤水分 Soil moisture	0.2124	0.059	0.0199	0.808	0.0451	0.568	0.2288	0.038
土壤容重 Soil bulk density	0.2191	0.044	0.0125	0.876	0.0396	0.639	0.1911	0.080
地下生物量 Underground biomass	0.0756	0.360	0.4956	0.006	0.0674	0.433	0.2446	0.039
土壤紧实度 Soil compactness	0.4630	0.001	0.2742	0.017	0.0534	0.499	0.3173	0.010

相关性分析结果表明,NG 样地鼠丘体积和表面积与莎草科植物的地上生物量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$);RG 样地鼠丘体积和表面积与豆科植物的地上生物量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),鼠丘表面积与莎草科植物的地上生物量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$);TG 样地鼠丘体积和表面积与禾本科和豆科植物的地上生物量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$);CG 样地的鼠丘体积和表面积与莎草科植物的地上生物量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),鼠丘体积与禾本科和豆科植物的地上生物量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$) (表 4)。

表 4 鼠丘表面积和体积与植物各功能群地上生物量的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of surface area and volumes of mounds and aboveground biomass of each functional group of plants

功能群 Functional group	鼠丘体积 Volumes of mounds				鼠丘表面积 Surface area of mounds			
	NG	RG	TG	CG	NG	RG	TG	CG
GRA	0.255	-0.135	-0.994 **	-0.871 *	0.160	-0.042	-0.970 **	-0.789
CYP	0.965 **	-0.791	0.696	0.984 **	0.935 **	-0.844 *	0.593	1.000 **
LEG	-0.704	0.997 **	-0.994 **	-0.871 *	-0.632	0.986 **	-0.970 **	-0.789
MIS	0.710	-0.135	0.593	0.010	0.775	-0.042	0.696	-0.137

** 表示 0.01 水平上的相关性显著, * 表示 0.05 水平上的相关性显著

3 讨论

3.1 放牧管理模式对高原鼯鼠微生境特征的影响

放牧显著影响了高原鼯鼠的微生境特征。从植被地上、地下生物量的变化上可看出不同放牧管理模式下高原鼯鼠食物资源的丰度变化,而其土壤水分、容重和紧实度是高原鼯鼠取食活动的能量消耗,代表了获取食物的代价等。与 NG 相比,其它放牧管理模式禾本科和豆科植物的地上生物量显著减少 ($P < 0.05$),而杂草类植物(TG 管理模式除外)的地上生物量显著增加 ($P < 0.05$);0—20cm 层的地下生物量(除 8 月 10—20cm 层的地下生物量)在 NG→CG 管理模式依次减少,该结果与前人的研究结果相似^[24]。放牧家畜的采食和践踏能够使植物变低矮,影响植物的地上和地下部分生长发育,同时也使其物种组成发生变化,优质牧草减少,杂草种类和数量增加^[4],加之放牧管理模式是在放牧时间和空间上的调整,而 RG、TG 和 CG 均会在植物返青时期进行放牧,此时植物刚生长露出地面,光合强度较弱,而家畜啃食和践踏破坏了草地植物的地上部分,进而影响植物的生长发育和草地恢复,导致放牧后植物的生物量变小^[25]。本研究发现,NG→CG 管理模式下土壤容重和紧实度依次增加,土壤水分在 CG 模式下显著高于 NG 模式,家畜的践踏是土壤结构发生改变,增加了土壤的紧实程度,植物的组成和类型发生改变,而高密度和细根构型的草毡表层会增加土壤的紧实状况^[26]。与本研究不同的是,有研究发现放牧会降低土壤水分含量^[27],因为土壤水分会受降水量、土壤紧实度和植被类型等多个因素的影响,而草地土壤生态系统本身也具备一定的复杂性和弹性,这使得不同的放牧压力对草地土壤特性的影响不同,也与放牧压力、放牧家畜的种类与结构、草地生态系统的类型有关^[28]。

3.2 放牧管理模式对高原鼯鼠鼠丘形态特征的影响

放牧显著影响了高原鼯鼠鼠丘的形态特征。RG、TG 和 CG 管理模式下高原鼯鼠的鼠丘半径、表面积和体

积较 NG 均变小。这与放牧家畜践踏增加了土壤紧实度、土壤容重和水分,减少了植物地下生物量有关,放牧导致了高原鼯鼠的食物资源变少,挖掘难度加大,能量消耗增加,向地表的推土量变少,鼠丘变小^[29]。有研究发现,高原鼯鼠比较喜欢土壤松软而杂草较多的环境^[30],放牧过程中家畜的践踏和采食使得优质牧草(禾本科)减少,杂草增多,使高原鼯鼠的食物结构发生改变^[29],进一步导致高原鼯鼠的分布发生改变,其对资源的竞争也是导致高原鼯鼠鼠丘的形态特征出现差异的原因之一。本研究中 5 月、8 月和 10 月鼠丘的半径、体积和表面积均在 NG 样地最大,CG 样地最小且差异显著($P < 0.05$)。放牧管理模式对鼠丘形态特征的影响存在着季节性差异,这可能是高原鼯鼠在不同季节的挖掘目的不同所致^[18],5 月高原鼯鼠刚经历过越冬且处于繁殖期,需要更多的能量补充,此时食物资源的分布和数量及配偶的分布是影响高原鼯鼠挖掘的主要因素^[31],而 0—20cm 土层地下生物量与鼠丘的形态特征具有一致的变化规律也对此进行了更好的诠释。8 月高原鼯鼠处于育幼时期,其活动范围相对较小,而且充足的雨水和较高的温度使得植物生长比较茂盛,根系发达,食物资源充足^[18];10 月高原鼯鼠由于受高寒气候的影响,草原植被逐渐进入枯黄期,高原鼯鼠为储备长达 5 个月越冬期的食物,因此食物(地下生物量)是影响该季节高原鼯鼠挖掘的主要因素^[20]。总之,家畜的践踏和干扰及季节的更替引起土壤结构、土壤性质和植物物种组成发生改变,会进一步导致高原鼯鼠在挖掘过程中的耗能和代价增加,食物资源和分布结构的改变,是导致其鼠丘形态特征变化的原因之一。然而,在高原鼯鼠掘洞造丘过程中,还受到放牧家畜的卧息^[15]、天敌、种内和种间的竞争^[32]及自身的生物学特性^[33]等多个因素的影响。鼯鼠本身的生活方式也可能导致高原鼯鼠鼠丘的形态特征发生变化,如群居生活的高原鼯鼠鼠丘可能较独居生活的鼯鼠鼠丘大。另外,高寒草甸植物地上部分能够拦截和蓄积降雨,也能够抵抗风力,植物地下根系具有固结土壤和增加土壤入渗的作用^[34],而本研究所选取的均为 2 个月以内新鼠丘,植被盖度低且土质松软,易受家畜的践踏和风雨侵蚀等因素的影响^[12],导致其形态特征发生改变。

3.3 放牧管理模式对鼠丘、环境因子及地上、地下生物量关系的影响

高原鼯鼠是青藏高原上的优势物种之一,常年营地下洞道生活,其挖掘洞穴及推土造丘与土壤环境和植被特征等的变化息息相关^[9]。相关性分析结果表明,NG 和 CG 样地的莎草科植物、RG 样地的豆科植物及 TG 样地的禾本科和豆科植物的地上生物量显著影响了高原鼯鼠鼠丘形态特征,由此可说明不同放牧管理模式下降植物的演替、分布和组成结构对高原鼯鼠的洞道挖掘和推土造丘具有显著影响。采用冗余分析法分析高原鼯鼠鼠丘表面积和体积与土壤因子及地下生物量之间的关系发现,2 个排序轴几乎能够全部解释土壤因子、地下生物量与鼠丘形态特征之间的关系,说明不同放牧管理措施导致土壤紧实度、土壤水分、土壤容重和地下生物量的变化是影响高原鼯鼠推土造丘的关键因子。同时,本研究还发现放牧管理模式影响下各土壤因子及地下生物量对鼠丘特征的影响程度不同,NG 和 CG 样地土壤紧实度对鼠丘特征的影响最大,RG 和 TG 样地的地下生物量对鼠丘特征的影响最大,这可能是放牧制度是放牧在时间和空间上的调整^[17],土壤紧实度和地下生物量是影响高原鼯鼠鼠丘形态特征的两个主要因素。而 NG 样地植物生长茂盛,地下根系充足,高原鼯鼠能够获取足量的植物,因而地下生物量对高原鼯鼠挖掘及推土造丘活动的影响相对较小;CG 样地属于全年放牧,放牧时间较长,其由于家畜践踏,使得其土壤变得紧实,增加了高原鼯鼠在挖掘过程中的能量消耗,使得其挖掘难度增加^[18],而 RG 和 TG 样地的放牧时间分别集中在 10 月到次年 5 月和 7 月,此时高原鼯鼠正在进行食物储备和繁殖育幼时期,需要大量的食物储备,此时进行放牧,由于家畜的践踏和啃食,使得植被遭到一定的破坏,对高原鼯鼠的觅食活动造成影响。由此进一步可以说明高原鼯鼠的挖掘行为与其采食、储食及土壤性状的变化存在一定的关联性^[35]。另外,前人研究发现,高原鼯鼠的鼠丘特征的变化与除与其采食、储食等有关外,还与高原鼯鼠的繁殖特性、年龄结构和性别比例等有关联^[18,31],但本研究只考虑了放牧下鼠丘大小与土壤因子及植被地下生物量之间的关系,并未考虑其它环境和高原鼯鼠的繁殖特性、年龄结构和性别比例等其它因素的影响,在今后的研究过程中,我们会着重考虑这些因素对高原鼯鼠的影响。

4 结论

放牧管理模式对高原鼯鼠鼠丘有显著影响,且具有季节性差异。与禁牧相比,生长季休牧、传统放牧和连

续放牧样地的鼠丘半径、高度、表面积和体积有变小趋势,其中连续放牧较其它样地变化显著($P<0.05$);冗余分析结合蒙特卡罗置换检验结果发现,土壤水分、容重、紧实度和地下生物量几乎能够全部解释了鼠丘特征,放牧管理模式土壤紧实度和地下生物量对高原鼯鼠鼠丘的特征具有显著影响。

参考文献 (References):

- [1] Courtois D R, Perryman B L, Hussein H S. Vegetation change after 65 years of grazing and grazing exclusion. *Rangeland Ecology & Management*, 2004, 57(6): 574-582.
- [2] 彭祺, 王宁. 不同放牧制度对草地植被的影响. *农业科学研究*, 2005, 26(1): 27-30.
- [3] Wu R X, Wei X T, Liu K S, Zhong M Y, Liu Y H, Pan D, Shao X Q. Nutrient uptake and allocation by plants in recent mounds created by subterranean rodent, plateau zokor *Eospalax baileyi*. *Polish Journal of Ecology*, 2017, 65(1): 132-143.
- [4] 刘伟, 周立, 王溪. 不同放牧强度对植物及啮齿动物作用的研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 376-382.
- [5] 苏军虎, 南志标, 纪维红. 家畜放牧对草地啮齿动物影响的研究进展. *草业学报*, 2016, 25(11): 136-148.
- [6] 武晓东, 阿娟, 付和平, 金珩. 人为不同干扰条件下荒漠啮齿动物群落格局的动态特征——动物与植物群落的典型相关分析. *生态学报*, 2008, 28(12): 5999-6017.
- [7] 樊才睿, 李畅游, 孙标, 史小红, 赵胜男, 付尧, 王静洁. 不同放牧制度草场产流产沙过程模拟试验. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 47-53.
- [8] 李文, 曹文侠, 刘皓栋, 李小龙, 徐长林, 师尚礼, 冯今, 周传猛. 不同放牧管理模式对高寒草甸草原土壤呼吸特征的影响. *草业学报*, 2015, 24(10): 22-32.
- [9] 鲍根生, 王宏生, 曾辉, 卡着才让, 马志贵, 刘生财. 不同形成时间高原鼯鼠鼠丘土壤养分分配规律. *生态学报*, 2016, 36(7): 1824-1831.
- [10] Zhang Y M, Zhang Z B, Liu J J. Burrowing rodents as ecosystem engineers: the ecology and management of plateau zokors *Myospalax fontanierii* in alpine meadow ecosystems on the Tibetan Plateau. *Mammal Review*, 2003, 33(3/4): 284-294.
- [11] 王玉琴, 鲍根生, 王宏生, 曾辉, 李继鹏. 不同放牧制度对高原鼯鼠活动区高寒草地群落结构影响. *草地学报*, 2018, 26(1): 134-141.
- [12] 胡媛, 查轩, 黄少燕. 重要水源地东圳库区土地利用与水土流失特征空间关系分析. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 53-56.
- [13] 刘江, 徐先英, 张荣娟, 丁爱强, 付全贵, 赵鹏. 人工梭梭林大沙鼠(*Rhombomys opimus*)土丘斑块与鼠洞塌陷斑块破碎度及点格局. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 610-618.
- [14] 邓云飞. 苦竹+牛鞭草模式中草地斑块的土壤养分动态及牧草的生长特性[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- [15] Torre I, Díaz M, Martínez-Padilla J, Bonal R, Viñuela J, Fargallo J A. Cattle grazing, raptor abundance and small mammal communities in Mediterranean grasslands. *Basic and Applied Ecology*, 2007, 8(6): 565-575.
- [16] 何俊龄, 张金沙, 杨莹博, 邓汉刚, 魏进招, 张卫国. 高原鼯鼠土丘空间格局及主要特征研究. *草业学报*, 2006, 15(1): 107-112.
- [17] 张倩, 杨晶, 姚宝辉, 蔡志远, 孙小妹, 王缠, 郭怀亮, 谭宇尘, 苏军虎. 放牧管理模式对高寒草甸鼯鼠鼠丘群落演替的影响. *生态学报*, 2020, 40(8): 2802-2811.
- [18] 王大伟, 郭永旺, 刘祖华, 杨文超, 张德勇, 王福美, 李宁, 刘晓辉. 川西北草原高原鼯鼠种群季节性特征与分布特点. *植物保护*, 2013, 39(4): 124-128.
- [19] 杨晶, 张倩, 姚宝辉, 蔡志远, 王缠, 郭怀亮, 苏军虎. 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. *草地学报*, 2020, 28(2): 492-499.
- [20] 王权业, 樊乃昌. 高原鼯鼠(*Myospalax baileyi*)的挖掘活动及其种群数量统计方法的探讨. *兽类学报*, 1987, (4): 283-290.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999: 42-50.
- [22] Tilman D, Reich P B, Knops J M H. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 2006, 441(7093): 629-632.
- [23] 赖江山, 米湘成. 基于 Vegan 软件包的生态学数据排序分析//第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 厦门: 国际生物多样性计划中国委员会, 中国科学院生命科学与生物技术局, 2010: 332-343.
- [24] 许宏斌, 辛晓平, 宝音陶格涛, 闫瑞瑞, 王旭, 陈宝瑞, 金东艳, 姚静, 刘志英. 放牧对呼伦贝尔羊草草甸草原生物量分布的影响. *草地学报*, 2020, 28(3): 768-774.
- [25] 崔树娟, 布仁巴音, 朱小雪, 白玲, 汪诗平. 不同季节适度放牧对高寒草甸植物群落特征的影响. *西北植物学报*, 2014, 34(2): 349-357.
- [26] 樊博, 林丽, 曹广民, 柯浔, 李以康, 杜岩功, 郭小伟, 李茜, 钱大文, 兰玉婷, 周春丽. 不同演替状态下高寒草甸土壤理化性质与植物根系的相互关系. *生态学报*, 2020, 40(7): 2300-2309.
- [27] 靳茗茗, 徐增让, 成升魁. 藏北高寒草地植被和土壤对不同放牧强度的响应. *生态学报*, 2020, 40(23): 8753-8762.
- [28] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展. *草业学报*, 2010, 19(4): 204-211.
- [29] 张兴禄, 李广. 高原鼠兔和高原鼯鼠在高寒草甸生态系统的作用. *草业科学*, 2015, 32(5): 816-822.
- [30] 于海玲, 樊江文, 李愈哲, 史文娇. 高原鼯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*, 2018, 29(6): 1902-1910.
- [31] 王莹, 魏代红, 张卫国, 卫万荣. 高原鼯鼠地上土丘性状季节性差异. *草业科学*, 2018, 35(11): 2738-2743.
- [32] 田富, 程云湘, 周国利, 马青青, 申波, 曲久, 常生华. 高原鼠兔洞穴密度与高寒草甸植物群落结构以及土壤因子的关系. *草业科学*, 2019, 36(4): 1094-1104.
- [33] 姬程鹏. 祁连山东段高原鼯鼠暖季活动节律及巢域面积变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [34] 刘忆轩, 李多才, 侯扶江. 甘肃马鹿春季放牧对高寒草原土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2019, 36(2): 273-283.
- [35] 鲁庆彬, 张阳, 周材权. 秦岭鼯鼠的洞穴选择与危害防控. *生态学报*, 2011, 31(7): 1993-2001.