



高寒草甸鼯鼠丘土壤理化特性对放牧管理模式的响应

张倩 姚宝辉 杨晶 蔡志远 孙小妹 苏军虎

Response of soil physical and chemical properties of zokor mounds to grazing management modes in an alpine meadow

ZHANG Qian, YAO Baohui, YANG Jing, CAI Zhiyuan, SUN Xiaomei, SU Junhu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

牦牛放牧强度对青藏高原东缘高寒草甸群落结构与土壤理化性质的影响

Effects of grazing intensity on community structure and the soil's physical and chemical properties in an alpine meadow on the Eastern Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2019, 36(4): 1022 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0046>

甘肃马鹿春秋放牧对高寒草原土壤理化性质的影响

Effect of grazing in spring and autumn on the physical and chemical properties of soil in Qilian Mountain

草业科学. 2019, 36(2): 273 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0404>

青藏高原放牧和地形对高寒草甸群落 α 多样性和土壤物理性质的影响

Effects of grazing and topography on α diversity and physical properties of the soil of alpine meadow communities in the Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2019, 36(12): 3041 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0392>

不同放牧模式下高原鼠兔密度与高寒植被和土壤的关系

Linking density of plateau pika to vegetation characteristics and soil attributes in response to different grazing regimes

草业科学. 2019, 36(11): 2915 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0136>

不同放牧模式下青藏高原高寒草甸植被群落和土壤差异

Differences in plant community and soil of alpine meadow under different grazing patterns on the Qinghai-Tibet Plateau

草业科学. 2021, 38(7): 1209 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0678>

放牧家畜对东祁连山高寒灌丛草地枯落物层及水文功能的影响

Effects of grazing domestic animals on litter layer and hydrological function of alpine shrubland in Eastern Qilian Mountains

草业科学. 2021, 38(9): 1683 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0543>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0042

张倩, 姚宝辉, 杨晶, 蔡志远, 孙小妹, 苏军虎. 高寒草甸鼯鼠鼠丘土壤理化特性对放牧管理模式的响应. 草业科学, 2022, 39(2): 222-234.

ZHANG Q, YAO B H, YANG J, CAI Z Y, SUN X M, SU J H. Response of soil physical and chemical properties of zokor mounds to grazing management modes in an alpine meadow. Pratacultural Science, 2022, 39(2): 222-234.

高寒草甸鼯鼠鼠丘土壤理化特性对放牧管理模式的响应

张倩^{1,2}, 姚宝辉^{1,2}, 杨晶^{1,2}, 蔡志远^{1,2}, 孙小妹^{2,3}, 苏军虎^{1,2}

(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 / 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, 甘肃兰州 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, 甘肃兰州 730070; 3. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 研究东祁连山高寒草甸划区轮牧(RG)、生长季休牧(GSG)、连续放牧(CG)和禁牧(PG)4种放牧管理模式下高原鼯鼠(*Eospalax baileyi*)不同年限的鼠丘[1年(ZM1)、2年(ZM2)、3年(ZM3)和4年以上(ZMM)]与对照(CM)草甸土壤理化特性,旨在评价放牧对鼠丘演替过程中土壤理化特性的影响,为高寒草甸的放牧管理提供参考。结果发现:与PG比较,GSG可以显著增加ZM2和ZM3在0-10 cm层土壤的含水量($P < 0.05$),并且可增加ZM3在0-10、10-20和20-30 cm层的全氮含量;与CG比较,GSG能显著增加ZM1和ZM2在0-10 cm层土壤全磷含量($P < 0.05$),同时, RG也可以显著增加ZM2在0-10和10-20 cm土层土壤碳氮比($P < 0.05$)。结构方程模型分析发现,不同管理模式对ZM3的土壤含水量、全氮和有机碳具有正影响,对ZMM的土壤有机碳和碳氮比具有正影响。综合分析发现生长季休牧能够较好地恢复鼠丘土壤养分含量。

关键词: 东祁连山高寒草甸; 放牧模式; 高原鼯鼠; 鼠丘演替; 土壤物理特性; 土壤化学特性

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)02-0222-13

Response of soil physical and chemical properties of zokor mounds to grazing management modes in an alpine meadow

ZHANG Qian^{1,2}, YAO Baohui^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, CAI Zhiyuan^{1,2}, SUN Xiaomei^{2,3}, SU Junhu^{1,2}

(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, Gansu, China;

2. Gansu Agricultural University-Massey University Research Centre for Grassland Biodiversity,

Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

3. College of Resource and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The aim of this study was to analyze zokor (*Eospalax baileyi*) of different mound ages [one-year (ZM1), two-year (ZM2), three-year (ZM3), and Multi-year (ZMM)] and control meadow (CM) under four grazing management modes (rotational grazing (RG), growing season grazing (GSG), continuous grazing (CG), and prohibition grazing (PG)). The study was performed to evaluate the effects of grazing on soil physicochemical properties during the succession of zokor mounds

收稿日期: 2021-01-21 接受日期: 2021-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460566、31760706); 陇原青年创新创业人才(团队)项目(LYRC2019-2); 甘肃农业大学“伏羲杰出人才”培育项目(Gaufx-02J03)

第一作者: 张倩(1995-), 女, 甘肃崇信人, 在读硕士生, 主要从事草地生态与草地保护研究。E-mail: 1634532748@qq.com

通信作者: 苏军虎(1981-), 男, 甘肃西和人, 教授, 博士, 主要从事草地生态和保护教学研究工作。E-mail: jhsu_627@126.com

and provides references for grazing management in alpine meadow. The results showed that GSG significantly increased the soil water content of ZM2 and ZM3 in 0 – 10 cm layers compared with PG. In addition, total nitrogen content of ZM3 in 0 – 10, 10 – 20, and 20 – 30 cm layers significantly increased ($P < 0.05$), respectively. Compared with CG, GSG significantly increased the total phosphorus content of ZM1 and ZM2 in 0 – 10 cm layers ($P < 0.05$), and RG significantly increased the soil C/N ratio of ZM2 in 0 – 10 cm and 10 – 20 cm layers ($P < 0.05$), respectively. Structural equation model analysis revealed that different management regimes had a positive effect on the soil water content, total nitrogen, and organic carbon of ZM3 and had positive effects on soil organic carbon and C/N ratio of ZMM. Therefore, GSG can better restore the soil nutrient content of zokor mounds compared with other grazing management modes.

Keywords: Qilian mountain alpine meadow; grazing regimes; plateau zokor (*Eospalax baileyi*); zokor mounds succession; soil physical properties; soil chemical properties

Corresponding author: SU Junhu E-mail: jhsu_627@126.com

放牧是草地最主要的利用方式之一, 放牧家畜通过采食、践踏和排泄粪便对草地土壤产生直接或间接作用^[1]。因为放牧家畜的密度通常大于自然条件下的动物密度, 践踏和采食活动均会导致草地退化, 也会改变植物-土壤互馈关系, 进而对土壤性质产生一定的影响^[2]。土壤特性的改变会使草地生态系统结构和功能发生变化, 草地生态系统的状态也会影响牲畜的采食行为。家畜践踏的直接作用(压碎、剪切和擦伤)和间接作用(压实、拱堆土壤及其导致植物根系的变化)会造成草地裸露斑块增加, 导致土壤暴露后逐渐被侵蚀^[3]。常规的放牧管理模式有传统放牧、季节性放牧、划区轮牧和禁牧等, 传统放牧是牧民根据当地草地的实际情况以及长期生产活动和经验积累所形成的, 适合当地草地的一种放牧制度, 例如内蒙古草原传统放牧以群为单位进行散养, 根据家畜数量和牧民人口划分草地面积, 为降低对草地的破坏, 一般分为夏季牧场和冬季牧场^[4]。放牧管理模式通过时间和空间效应对草地产生一定的影响, 能够很大程度地影响土壤养分的循环和转换潜力, 当放牧家畜的密度大于草地所能承载家畜的最高数量时, 草地出现斑块化, 导致土壤含水量和养分等含量降低^[1]。有研究表明, 较高强度的放牧会导致土壤养分的流失^[5]。王仁忠和李建东^[6]发现家畜严重采食会导致土壤容重增加。放牧导致草地环境变化, 也会引起系统中各组分的变化, 例如, 土壤物理特性(紧实度和容重等)改变会影响啮齿动物对栖息地的选择, 导致草地植被的生长和分布情况发生变化, 最终影响草地的退化程度^[3]。

啮齿动物是草地生态中耦合的一种成分, 对系

统的多功能性和稳定性具有重要意义。放牧也会对啮齿动物的行为、种群密度、食物资源、洞道挖掘和微生境等产生一定的影响^[7]。在青藏高原高寒草甸区域中, 高原鼯鼠 (*Eospalax baileyi*) 等的挖掘活动将深层新鲜土带到地表, 增加了土壤吸收降水的能力, 提高了土壤表层温度, 促进了土壤养分循环, 改变了土壤养分的垂直分布和利用效率^[8]。挖掘活动会在地表形成大小不一的鼠丘, 鼠丘土壤较为疏松, 具有较大的土壤孔隙, 有利于根际氧化物的代谢以及为某些种子的萌发创造适宜的条件, 有利于幼苗在鼠丘上定植^[9], 并且这些高出地表的鼠丘增加了生境异质性, 有利于物种多样性的增加; 之前的研究发现, 一年鼠丘上的植被大多以一年生的杂草为主, 具有较高的扩散能力和繁殖能力, 使其在鼠丘上快速拓殖并定居, 符合竞争-拓殖权衡理论^[10]。在资源丰富的环境中, 演替晚期物种的快速生长会使它们短时间内取代演替早期的物种, 被称为演替生态位理论^[11], 但演替同时也受到土壤中食物网、动植物凋落物, 以及植食性哺乳动物等因素的影响^[12]。家畜放牧会影响土壤养分的分配, 而随着凋落物的输入和分解者的加强, 土壤中可利用的养分含量会增加, 演替初期土壤贫瘠, 土壤表面的透射光随演替程度的增加逐渐减少。资源比率假说认为, 随环境变化物种的竞争能力也会发生变化, 例如, 光照、土壤养分含量(氮)均会影响到植物的竞争能力, 最终影响演替的方向^[13]。可见, 家畜放牧介导的环境变化, 会对草地产生不同的影响, 而不同放牧管理模式下鼯鼠鼠丘演替影响的研究, 是天然草地有效管理的科学基础。

放牧通过改变草地土壤理化性质,对啮齿动物的微生境产生一定的影响,从而影响啮齿动物对洞道地址的选择,不同程度的家畜践踏也会对地下啮齿动物洞道选择产生一定的影响;同时,放牧也会影响啮齿动物和其他物种之间的关系,最终导致啮齿动物对环境的影响发生变化^[7]。不同程度的家畜践踏会直接影响土壤表面雨水的径流速度和种子的传播方式,而这些都会影响鼠丘的演替情况,演替过程中出现的不同植被又会对土壤产生一定的反馈作用,最终导致土壤和植被均发生改变。Jones和Longland^[14]发现放牧导致环境的变化,使梅氏更格卢鼠(*Dipodomys merriami*)和纤小囊鼠(*Perognathus longimembris*)的微生境也发生了变化。也有研究发现家畜放牧会对草地啮齿动物的密度产生影响,如有效的轮牧制度可抑制啮齿动物的数量^[15]。但除了啮齿动物密度外,啮齿动物的造丘活动也会对放牧产生不同的响应,如不同放牧强度对东北鼯鼠(*Myospalax psilurus*)的土丘数量影响显著^[16]。岳闯等^[17]发现季节轮牧区能够较好地控制东北鼯鼠土丘密度,以及维持较高的草地生产力。而随鼠丘演替年限的增加,土壤逐渐紧实,鼠丘深层土壤养分含量增加^[18]。在草地管理实践中,除了放牧制度进行管理外,一般例行性的控鼠灭鼠也在进行,本研究从实际出发,在排除了放牧制度对鼯鼠密度的影响外,重点关注不同放牧管理模式对鼠丘演替的情况,分析鼠丘演替过程中土壤理化特征的变化,旨在评价放牧对鼠丘演替过程中土壤理化特性的影响,为祁连山高寒草甸管理与利用提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

研究地位于东祁连山高寒草甸区域(甘肃农业大学天祝高山草原生态系统试验站)。地处37°10′~37°13′N, 102°45′~102°48′E,海拔2 700~3 100 m(研究地海拔2 900 m)。该地区昼夜温差大,四季变化不明显,最冷月为1月(平均温度为-11.3℃),最热月为7月(平均温度为11.8℃),年平均气温为0.1℃,年均日照时数2 500~2 700 h,降水主要集中在6月~8月,年均降水量416 mm,年均蒸发量1 600 mm,土壤类型属于高寒草甸土,土壤pH 7.0~8.0^[19]。主要优势草种为矮嵩草(*Kobresia humilis*),伴生种为黄花

棘豆(*Medicago falcata*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)和鹅绒委陵菜(*P. anserina*)等。

1.2 样地设置

2018年8月初在试验站附近选择4种草地利用模式:划区轮牧(rotational grazing, RG),面积1.4 hm²,放牧时间为2012~2018年,轮牧时间为180 d,轮牧次数为3次,轮牧强度为5.38羊单位·(hm²·a)⁻¹,轮牧起始时间为5月15日,结束时间为11月15日;连续放牧(continuous grazing, CG),面积2.0 hm²,放牧时间为2011~2018年,全年连续放牧,放牧率为8.37羊单位·(hm²·a)⁻¹;生长季休牧(growing season grazing, GSG),面积4.4 hm²,放牧时间为2015~2018年,生长季放牧率为0,非生长季放牧率为4.53羊单位·(hm²·a)⁻¹,每年在4月15日到9月15日间休牧,其余时间自由放牧;禁牧(prohibition grazing, PG),面积5.4 hm²,放牧时间为2011~2018年,全年禁牧。每种草地利用模式设置1个样地。本研究结合土壤物理特性、植被盖度和物种组成将高原鼯鼠鼠丘划分为1年鼠丘(ZM1)、2年鼠丘(ZM2)、3年鼠丘(ZM3)和4年以上鼠丘(ZMM),具体的划分方法详见文献[11]。

1.3 取样及测定方法

1.3.1 土壤样品采集

每个样地中选择12个鼠丘(每个演替阶段选择3个,新鼠丘高度在11~16 cm,一般例行性的控鼠灭鼠使每个样地新鼠丘的密度基本相同,均为(20±3)个,各年限鼠丘的长轴×短轴均在(45~65) cm×(45~68) cm内,选择未干扰的草地(无鼯鼠洞道,且距离鼠丘与洞道至少50 cm以外)作为对照样地(CM)。剪掉鼠丘表面和对照样地上的植被,然后使用直径为5 cm的土钻采用五点法取样(图1),将5个点混合为一个重复,分3层,每10 cm一个分层,采集土壤样品,带回实验室自然风干过筛后测定土壤理化性质^[20]。

1.3.2 土壤理化特性测定方法

土壤理化特性的测定方法参考《土壤农化分析(第三版)》^[21]。土壤pH用酸度计法测定;土壤含水量用烘干法测定;土壤容重用环刀法测定;土壤全氮用凯氏定氮测定;土壤全磷用硫酸-高氯酸消化-钼锑抗显色法测定;土壤全钾用硫酸-高氯酸消化-火焰光度法测定;土壤有机碳用硫酸-重铬酸钾外加

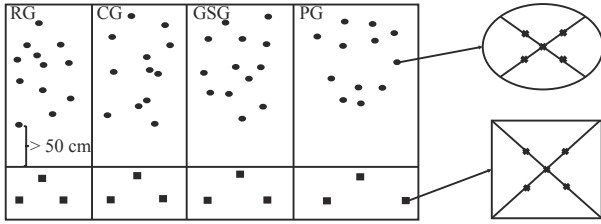


图 1 样地和采样点示意图

Figure 1 Schematic diagram of plots and sampling point

RG, 划区轮牧; CG, 连续放牧; GSG, 生长季休牧; PG, 禁牧; 下同。椭圆表示鼠丘, 正方形表示原生草甸采样点, *表示五点取样法。

RG: Rotational grazing; PG: Prohibition grazing; CG: Continuous grazing; GSG: Growing season grazing; this is applicable for the following tables and figures as well. Ovals are zokor mounds, squares are control meadow sampling point, and * is the 5-point sampling method.

热法测定。

1.4 数据分析

所有数据均使用 Excel 2019 进行处理并制作图表; 采用 SPSS 19.0 软件对不同放牧模式下土壤理化特性进行单因素方差分析; 用 R 3.6.3 软件的 Car 包进行三因素方差分析, Vegan 包进行方差分解, FactoMineR 和 Factoextra 包进行主成分分析, lavaan 包构建结构方程模型^[22]。

2 结果与分析

2.1 放牧管理模式、鼠丘年限和土层深度互作下土壤理化特性的变化

放牧管理模式、鼠丘年限和土层深度单独起作用时, 对土壤理化特性的影响较大; 而在放牧管理模式和鼠丘年限的互作下, 土壤含水量、pH、容重、孔隙度和有机碳含量的变化显著 ($P < 0.05$); 在放牧管理模式和土层深度的互作下, 各土壤因子变化均不显著 ($P > 0.05$); 在鼠丘年限和土层深度的互作下, 土壤 pH 和有机碳含量的变化显著 ($P < 0.05$); 在放牧管理模式、鼠丘年限和土层深度的三因素互作下, 各土壤因子变化均不显著 ($P > 0.05$) (表 1)。

2.2 放牧管理模式和鼠丘年限对不同土层土壤因子的方差分解

0–10 cm 土层, 放牧管理模式对土壤因子的解释比率为 30.4%, 贡献率为 70.9%, 鼠丘年限对土壤因子的解释比率为 9.9%, 贡献率为 23.1%, 放牧管理模式和鼠丘年限共同解释比率为 2.6%, 贡献率为

6.0%; 10–20 cm 土层, 放牧管理模式对土壤因子的解释比率为 40.7%, 贡献率为 81.9%, 鼠丘年限对土壤因子的解释比率为 5.1%, 贡献率为 10.3%, 放牧管理模式和鼠丘年限共同解释比率为 3.9%, 贡献率为 7.8%; 20–30 cm 土层, 放牧管理模式对土壤因子的解释比率为 27.1%, 贡献率为 92.5%, 鼠丘年限对土壤因子的解释比率为 0.4%, 贡献率为 1.4%, 放牧管理模式和鼠丘年限共同解释比率为 1.8%, 贡献率为 6.1% (表 2)。

2.3 放牧管理模式下鼯鼠鼠丘土壤物理性质的变化

不同放牧管理模式下, 原生草地各土壤物理性质表现为 RG 的 0–10、10–20 和 20–30 cm 土层土壤容重显著高于 CG 和 GSG ($P < 0.05$), CG 下 10–20 和 20–30 cm 土层土壤含水量显著高于 RG 和 PG ($P < 0.05$), 各放牧管理模式下土壤孔隙度的变化较小。

RG 下 ZM3 和 ZMM 的 0–10、10–20 和 20–30 cm 土层的土壤含水量均高于 CM, PG 下 ZM1 的 0–10、10–20 和 20–30 cm 层土壤含水量高于 CM, CG 和 GSG 下 ZM2 和 ZM3 的 0–10 cm 层土壤含水量显著高于 PG ($P < 0.05$); RG 和 CG 下 ZM1、ZM2、ZM3 和 ZMM 的 0–30 cm 土层土壤容重均低于 CM, PG 下 ZM2 的 0–10 cm 土层土壤容重显著高于 CG ($P < 0.05$); 不同放牧管理模式下各年限鼠丘土壤孔隙度变化不大, 土壤孔隙度均在 0.5~1.0 (表 3)。

2.4 放牧管理模式下鼯鼠鼠丘土壤化学性质的变化

不同放牧管理模式下, 原生草甸各土壤化学性质的变化: GSG 下 10–20 cm 土层土壤全氮和有机碳含量显著高于 PG ($P < 0.05$), 20–30 cm 全氮含量显著高于 RG ($P < 0.05$), GSG 下 20–30 cm 全钾和全磷含量显著高于 RG 和 PG ($P < 0.05$)。

GSG 下 ZM3 的 0–10、10–20 和 20–30 cm 土层的全氮含量均显著高于 RG 和 PG 样地 ($P < 0.05$), GSG 下 ZM1 和 ZM2 的 0–10 cm 土层土壤全磷含量显著高于 PG 和 CG ($P < 0.05$), GSG 下 ZM1 和 ZM3 的 10–20 cm 土层土壤全磷显著高于 RG 和 PG ($P < 0.05$), GSG 下 ZM2、ZM3 和 CM 的 20–30 cm 土层土壤全磷显著高于 RG 和 PG ($P < 0.05$), GSG 下 ZM1 的 10–20 和 20–30 cm 土层的全钾含

表 1 放牧管理模式、鼠丘年限和土层深度互作下土壤理化特性的变化
Table 1 Changes in soil physical and chemical properties and the interaction between grazing management regimes, zokor mounds ages, and soil layers

指标 Index	含水量 Soil water content		容重 Bulk density		pH		孔隙度 Porosity		全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus		全钾 Total potassium		有机碳 Organic carbon		碳氮比 Carbon to nitrogen ratio	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
放牧管理模式 Grazing management regimes	73.159	<0.001	24.458	<0.001	23.586	<0.001	12.008	<0.001	34.162	<0.001	3.313	<0.001	9.533	<0.001	7.800	0.000	11.164	0.000
鼠丘年限 Zokor mound ages	5.972	<0.001	8.600	<0.001	1.186	0.320	4.005	0.004	2.485	0.047	1.581	0.047	0.894	0.470	6.463	0.000	0.594	0.668
土层深度 Soil layers	59.655	<0.001	17.088	<0.001	2.809	0.064	7.202	<0.001	3.891	0.023	0.728	0.023	1.463	0.236	3.569	0.031	0.871	0.421
放牧管理模式 × 鼠丘年限 Grazing management regimes × zokor mound ages	3.376	<0.001	3.383	<0.001	3.578	<0.001	2.005	0.029	1.568	0.110	1.332	0.110	0.693	0.756	3.493	0.000	1.324	0.214
放牧管理模式 × 土层深度 Grazing management regimes × soil layers	1.823	0.100	0.590	0.738	0.597	0.732	0.414	0.869	0.859	0.527	0.892	0.527	0.509	0.800	1.430	0.209	0.949	0.463
鼠丘年限 × 土层深度 Zokor mound ages × soil layers	1.140	0.342	1.929	0.062	2.437	0.018	0.636	0.747	0.480	0.868	0.444	0.868	1.314	0.243	4.397	0.000	1.816	0.080
放牧管理模式 × 鼠丘年限 × 土层深度 Grazing management regimes × zokor mound ages × soil layers	0.523	0.966	0.796	0.736	1.158	0.295	0.689	0.854	0.485	0.979	0.942	0.979	1.079	0.378	0.619	0.913	0.338	0.998

表 2 放牧管理模式和鼠丘年限对不同土层因子的方差分解
Table 2 Variance decomposition of soil factors in different soil layers based on grazing management regimes and zokor mound ages

指标 Index	0 - 10 cm		10 - 20 cm		20 - 30 cm	
	解释比率 Explained Proportion	贡献率 Contribution rate	解释比率 Explained proportion	贡献率 Contribution rate	解释比率 Explained proportion	贡献率 Contribution rate
放牧管理模式 Grazing management regimes	30.4	70.9	40.7	81.9	27.1	92.5
鼠丘年限 Zokor mound ages	9.9	23.1	5.1	10.3	0.4	1.4
放牧管理模式 × 鼠丘年限 Grazing management regimes × zokor mounds	-2.6	6.0	-3.9	7.8	-1.8	6.1

表 3 放牧管理模式下黹鼠丘土壤物理性质的变化
Table 3 Changes in soil physical properties in zokor mounds under different grazing management regimes

放牧管理模式 Grazing management regimes	鼠丘年限 Zokor mounds ages	土壤含水量/Soil water content/%				土壤容重/Soil bulk density/(g·cm ⁻³)				土壤孔隙度/Soil porosity			
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
RG	ZM1	35.22 ± 5.01Ab	30.93 ± 3.92Ab	22.1 ± 2.96Ab	0.67 ± 0.09Aa	0.69 ± 0.05Ba	0.71 ± 0.03Ca	0.75 ± 0.03Aa	0.74 ± 0.02Aa	0.73 ± 0.01Aa			
	ZM2	30.91 ± 3.61Abc	28.03 ± 3.34Ab	22.3 ± 2.42Ab	0.75 ± 0.04Aab	0.79 ± 0.03ABa	0.94 ± 0.03Aa	0.72 ± 0.02Aa	0.7 ± 0.01ABa	0.64 ± 0.01Ba			
	ZM3	37.44 ± 2.35Ab	35.35 ± 4.31Aa	26.26 ± 8.81Aab	0.68 ± 0.04Ab	0.75 ± 0.05ABab	0.77 ± 0.03BCa	0.74 ± 0.02Aa	0.72 ± 0.02ABa	0.71 ± 0.01Aa			
	ZMM	37.36 ± 2.73Aab	30.27 ± 2.52Ab	30.54 ± 1.22Aa	0.70 ± 0.06Ab	0.79 ± 0.05ABa	0.81 ± 0.03Ba	0.74 ± 0.02Aa	0.70 ± 0.02ABa	0.70 ± 0.01Aa			
PG	CM	34.47 ± 9.03Aa	21.74 ± 7.01Ab	15.8 ± 0.66Ac	0.79 ± 0.04Aa	0.9 ± 0.05Aa	0.94 ± 0.00Aa	0.74 ± 0.04Aa	0.66 ± 0.02Ba	0.60 ± 0.03Ba			
	ZM1	37.12 ± 3.01Aab	33.38 ± 1.66Ab	24.37 ± 1.94Ab	0.54 ± 0.01Ba	0.56 ± 0.02Bb	0.65 ± 0.02Bab	0.85 ± 0.06Aa	0.83 ± 0.04Aa	0.75 ± 0.01Aa			
	ZM2	26.02 ± 0.46Bc	19.05 ± 1.68Bb	13.98 ± 1.72Bb	0.81 ± 0.01Aa	0.81 ± 0.04Aa	0.85 ± 0.03Aa	0.78 ± 0.07ABa	0.73 ± 0.02Aa	0.69 ± 0.01Ba			
	ZM3	26.23 ± 0.22Bd	18.37 ± 3.5Bb	11.61 ± 0.84Bb	0.82 ± 0.05Aa	0.81 ± 0.02Aa	0.8 ± 0.04Aa	0.79 ± 0.02Ba	0.74 ± 0.01Aa	0.68 ± 0.02Ba			
GSG	ZMM	30.34 ± 4.06ABb	22.25 ± 3.43Bb	14.08 ± 3.02Bb	0.76 ± 0.07Aab	0.8 ± 0.09Aa	0.82 ± 0.06Aa	0.81 ± 0.03ABa	0.77 ± 0.03Aa	0.71 ± 0.02Ba			
	CM	31.4 ± 2.26ABa	20.61 ± 2.2Bb	13.19 ± 0.46Bc	0.71 ± 0.04Aab	0.86 ± 0.02Aab	0.85 ± 0.04Aa	0.79 ± 0.02ABa	0.75 ± 0.07Aa	0.69 ± 0.02Ba			
	ZM1	47.13 ± 3.04Aa	42.6 ± 1.27Aa	42.02 ± 4.26Aa	0.51 ± 0.02Ca	0.60 ± 0.00Bab	0.59 ± 0.05Bb	0.80 ± 0.01Aa	0.75 ± 0.00Ba	0.69 ± 0.02Aa			
	ZM2	38.89 ± 0.33Ba	44.92 ± 0.9Aa	35.36 ± 4.54Aa	0.55 ± 0.01BCc	0.57 ± 0.01BCb	0.59 ± 0.03Bb	0.80 ± 0.05Aa	0.75 ± 0.00ABa	0.7 ± 0.01Aa			
ZMM	ZM3	42.5 ± 1.08ABa	45.38 ± 1.04Aa	32.81 ± 7.54Aa	0.52 ± 0.02Cc	0.55 ± 0.01Cc	0.67 ± 0.05ABa	0.80 ± 0.01Aa	0.75 ± 0.00Aa	0.69 ± 0.02ABa			
	ZMM	43.27 ± 0.81ABa	45.32 ± 5.25Aa	37.33 ± 3.53Aa	0.60 ± 0.03ABb	0.53 ± 0.02Cb	0.58 ± 0.03Bb	0.80 ± 0.01Aa	0.75 ± 0.01Aa	0.69 ± 0.01Aa			
	CM	43.53 ± 4.19ABa	37.00 ± 2.13Aa	33.65 ± 0.03Aa	0.62 ± 0.03Ab	0.7 ± 0.02Ab	0.76 ± 0.00Ab	0.80 ± 0.03Aa	0.75 ± 0.01Ca	0.69 ± 0.00Ba			
	ZM1	36.03 ± 0.53Aab	34.55 ± 0.19Ab	24.8 ± 1.06Ab	0.58 ± 0.04Ba	0.68 ± 0.00Aa	0.72 ± 0.03Aa	0.8 ± 0.02Aa	0.75 ± 0.01Aa	0.69 ± 0.02Aa			
ZMM	ZM2	34.25 ± 1.78Ac	23.56 ± 5.67ABb	16.96 ± 2.89Aab	0.69 ± 0.01ABb	0.69 ± 0.05Aa	0.68 ± 0.03Aa	0.8 ± 0.01Aa	0.75 ± 0.02Aa	0.69 ± 0.01Aa			
	ZM3	32.88 ± 0.88ABc	22.57 ± 4.47Bb	18.86 ± 3.58Aab	0.65 ± 0.05Bbc	0.66 ± 0.05Abc	0.7 ± 0.06Aa	0.8 ± 0.02Aa	0.75 ± 0.02Aa	0.69 ± 0.04Aa			
	ZMM	25.53 ± 5.02Bb	25.52 ± 1.49ABb	16.72 ± 4.34Ab	0.77 ± 0.01Aa	0.72 ± 0.03Aa	0.75 ± 0.08Aab	0.8 ± 0.04Aa	0.75 ± 0.01Aa	0.69 ± 0.01Aa			
	CM	40.36 ± 1.59Aa	29.74 ± 0.49ABab	22.14 ± 1.91Ab	0.59 ± 0.03Bb	0.71 ± 0.04Ab	0.82 ± 0.04Ab	0.8 ± 0.01Aa	0.75 ± 0.01Aa	0.69 ± 0.01Aa			

ZM1: 1年鼠丘; ZM2: 2年鼠丘; ZM3: 3年鼠丘; ZMM: 4年以上鼠丘; CM: 对照; 同列不同小写字母表示放牧模式之间差异显著, 不同大写字母表示鼠丘年限间差异显著($P < 0.05$); 下表同。
ZM1: One year zokor mound; ZM2: Two years zokor mound; ZM3: Three years zokor mound; ZMM: Multi-year zokor mound; CM: control meadow. Lowercase letters in the same column indicated significant difference between grazing patterns, and uppercase letters indicated significant difference between zokor mound ages ($P < 0.05$); this is applicable for the following tables as well.

量均显著高于 RG 和 PG ($P < 0.05$); RG 下 ZM2 的 0–10 和 10–20 cm 土层土壤碳氮比显著高于 CG 和 GSG ($P < 0.05$)。

GSG 下 ZM1 和 ZM2 的 10–20 cm 土层土壤全氮含量高于 CM; RG 下 ZM3 的 0–10 cm 土层土壤全氮高于 CM; CG 下 ZM1、ZM3 和 ZMM 的 0–10 cm 土层土壤全氮含量均高于 CM。GSG 下 ZM1、ZM2 和 ZM3 的 20–30 cm 土层土壤有机碳含量也高于 CM; RG 下 ZM2 和 ZM3 的 0–30 cm 土层土壤有机碳含量低于 CM; PG 下 ZM1、ZM2 和 ZMM 的 0–30 cm 土层土壤有机碳均高于 CM; CG 下 ZM3 和 ZMM 的 0–10 cm 土层土壤有机碳低于 CM。所有样地鼠丘土壤均呈弱碱性, pH 为 7.0~8.0 (表 4)。

2.5 不同年限鼠丘对土壤因子的影响

为构建结构方程模型, 对各土壤因子先进行主成分分析, 结果表明, ZM1 下 3 个主成分上具有高载荷因子(载荷值 > 0.70)的指标分别为土壤含水量、容重、全氮、全钾和碳氮比; ZM2 下 3 个主成分上具有高载荷因子的指标分别为土壤容重、有机碳和碳氮比; ZM3 下 3 个主成分上具有高载荷因子的指标分别为土壤含水量、容重、孔隙度、pH、有机碳和全氮; ZMM 下 3 个主成分上具有高载荷因子的指标分别为土壤容重、孔隙度、全磷、有机碳和碳氮比; CM 下 3 个主成分上具有高载荷因子的指标分别为土壤含水量、容重、孔隙度、全氮、全磷、有机碳和碳氮比 (表 5)。

基于主成分分析, 选择对不同管理模式响应较大的土壤因子(载荷值 > 0.7)构建结构方程模型, 分析不同年限鼠丘对各土壤因子的影响程度, ZM1 和 ZM2 未达到结构方程的拟合要求, 但 ZM3、ZMM 和 CM 的结构方程拟合都较好 ($GFI_{ZM3} = 0.794$, $GFI_{ZMM} = 0.864$, $GFI_{CM} = 0.740$), 表明此结构方程模型能够较好地解释鼠丘在不同管理模式样地下土壤因子的变化。可以看出, 不同管理模式对各年限鼠丘土壤因子的影响不同, 对 ZM3 和 CM 的土壤容重具有显著负影响, 对 ZM3 和 CM 的土壤含水量具有正影响, 对 ZM3、ZMM 和 CM 的土壤孔隙度均有显著影响, 对 ZM3 和 CM 的土壤全氮具有显著正影响, 对 CM 的土壤有机碳具有显著正影响, 对 ZM3 和 ZMM 的土壤有机碳具有正影响, 对 ZMM 和 CM 的土壤全磷具有负影响, 对 ZMM 和 CM 的土壤碳氮比具有正影响 (图 2)。

3 讨论

3.1 放牧对土壤理化特性的影响

本研究结果发现, 生长季休牧草地 10–20 cm 土层土壤全氮和有机碳含量显著高于禁牧样地, 符合“中度干扰假说”, 这可能是由于高寒草甸家畜中等程度的践踏能够增加根系在土壤中的分解速率, 同时加速土壤中掉落物质的矿化过程和腐殖化过程, 使更多的植物组织回归到土壤, 从而增加土壤的全氮和有机碳含量; 家畜排泄物也能增加土壤的养分含量, 加之本研究中禁牧草地的时间较长, 会使土壤的呼吸速率降低, 土壤的养分循环过程减缓, 导致该样地中土壤的养分含量较低。也有研究表明, 长期禁牧不利于土壤呼吸和分解, 不利于土壤养分积累, 而家畜采食可以加速养分的循环, 促进土壤养分积累^[23]。Hui 和 Jackson^[24]研究表明, 放牧家畜能够提高土壤有机碳含量, 与本研究结果相似。但家畜的过度践踏会导致土壤表面分裂, 造成草地出现斑块化, 增加草地土壤流失, 减少土壤养分含量。本研究结果中, 连续放牧草地 0–10 cm 土层土壤全磷含量较其余放牧模式低。也有研究指出, 高强度的放牧会降低土壤养分含量^[5], 而土壤有机碳的含量与草地类型也有一定的关系, 即土壤有机碳和全氮在轻度放牧下含量较高, 与本研究结果相似。因此, 对草地进行合理有效的放牧管理模式能够增加土壤养分含量, 使土壤更加健康, 有利于草地生态系统的平衡和稳定。

3.2 啮齿动物对土壤理化特征的影响

Huntly 和 Inouye^[25]认为, 地下食草动物会显著影响土壤理化特性的垂直和水平分布, 且高原鼯鼠的密度和草地前期所受干扰程度均会造成土壤养分的差异。高原鼯鼠在高寒草甸土壤表层的堆土量至少为 $1\ 024\ \text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[26]。鼠丘是地下啮齿动物干扰草地最明显、最直观的指标, 其土壤经过鼯鼠的不断上下翻转, 与原生草地比较, 土壤的理化特性发生较大变化, 这种土壤条件的改变会给某些新物种的生长提供机会^[26]。鲍根生等^[27]研究指出, 鼯鼠未干扰区域的土壤全氮、全磷和有机质等与不同时间形成鼠丘的土壤养分相比, 没有增加。但也有研究指出, 高原鼯鼠扰动恢复 4 年后, 土壤含水量从 20% 增加至 25%, 0–20 cm 土层土壤有机碳含量从 $108\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

表 4 放牧管理模式对黹鼠丘土壤化学性质的变化
Table 4 Changes in chemical characteristics of zokor mounds under different grazing management regimes

放牧管理模式 grazing management regimes	鼠丘年限 Zokor mounds ages	土壤全氮 Soil total nitrogen/(g·kg ⁻¹)				土壤全磷 Soil total phosphorus/(g·kg ⁻¹)				土壤全钾 Soil total potassium/(g·kg ⁻¹)			
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
RG	ZM1	4.91 ± 0.36Aa	4.44 ± 0.00Aa	4.65 ± 0.38Ab	0.46 ± 0.15ABc	0.45 ± 0.07Ab	0.44 ± 0.05Aa	16.85 ± 0.04Aab	15.67 ± 0.11Ac	16.26 ± 0.13Ac			
	ZM2	4.26 ± 0.10Abc	4.08 ± 0.23Ab	3.92 ± 0.17Aa	0.18 ± 0.09Ac	0.37 ± 0.15Aa	0.29 ± 0.04Ab	15.98 ± 0.37Aa	16.03 ± 0.34Aa	15.82 ± 0.46Aa			
	ZM3	4.15 ± 0.18Ab	4.25 ± 0.31Ab	4.38 ± 0.13Ab	0.42 ± 0.12Aa	0.26 ± 0.15Ab	0.51 ± 0.19Ab	16.27 ± 0.65Aa	15.16 ± 0.60Ab	15.88 ± 0.52Aa			
	ZMM	5.36 ± 0.83Aa	5.32 ± 0.74Aa	5.32 ± 0.37Aab	0.33 ± 0.2Aa	0.28 ± 0.05Aa	0.34 ± 0.13Aa	16.19 ± 0.45Ab	16.05 ± 0.35Ab	15.55 ± 0.33Ab			
	CM	5.68 ± 0.33Aa	4.53 ± 0.22Ab	5.90 ± 1.02Aa	0.8 ± 0.29Aa	0.52 ± 0.03Aa	0.42 ± 0.05Ab	16.22 ± 0.29Ab	16.43 ± 0.14Aa	15.36 ± 0.39Bb			
PG	ZM1	5.34 ± 1.12Aa	5.12 ± 1.10Aa	4.25 ± 0.48Ab	0.28 ± 0.14Bc	0.52 ± 0.16Ab	0.34 ± 0.12Aa	17.50 ± 0.13Aa	16.74 ± 0.29Ab	17.15 ± 0.33Ab			
	ZM2	3.93 ± 0.36Bc	4.05 ± 0.41Ab	3.64 ± 0.06Ba	0.31 ± 0Bbc	0.23 ± 0.04Aa	0.28 ± 0.14Ab	17.15 ± 0.71Aa	16.58 ± 0.64Aa	16.45 ± 0.10Aa			
	ZM3	4.10 ± 0.19Bb	3.94 ± 0.26Ab	3.08 ± 0.21Bc	0.44 ± 0.03ABa	0.5 ± 0.12Ab	0.36 ± 0.19Ab	17.37 ± 0.28Aa	16.98 ± 0.09Aa	16.49 ± 0.12Aa			
	ZMM	4.96 ± 0.98ABa	3.32 ± 0.80Aa	3.88 ± 0.09ABb	0.8 ± 0.42Aa	0.38 ± 0.09Aa	0.61 ± 0.18Aa	17.10 ± 0.27Aab	16.86 ± 0.44Aab	17.19 ± 0.60Aa			
	CM	5.03 ± 0.69Aa	3.63 ± 0.06Ac	3.50 ± 1.07Ba	0.5 ± 0.1AB7a	0.54 ± 0.03Aa	0.41 ± 0.1Ab	17.21 ± 0.22Aa	16.59 ± 0.70Aa	14.96 ± 0.29Ab			
CG	ZM1	6.38 ± 0.37Aa	5.28 ± 0.19Aa	6.17 ± 0.57Aa	0.77 ± 0.07Ab	0.77 ± 0.17Aab	0.42 ± 0.1Aa	17.10 ± 0.27ABab	17.59 ± 0.12Aa	17.73 ± 0.09Ab			
	ZM2	5.68 ± 0.82Aab	5.52 ± 0.40Aa	4.59 ± 1.41Aa	0.47 ± 0.09Bb	0.54 ± 0.24Aa	0.49 ± 0.13Aab	17.41 ± 0.11ABa	17.43 ± 0.29Aa	17.35 ± 0.23Aa			
	ZM3	5.96 ± 0.36Aa	6.21 ± 0.45Aa	5.63 ± 0.39Aa	0.38 ± 0.08Ba	0.44 ± 0.17Ab	0.55 ± 0.03Ab	17.42 ± 0.44ABa	17.23 ± 0.37Aa	17.40 ± 0.36Aa			
	ZMM	5.98 ± 0.28Aa	5.80 ± 0.40Aa	5.94 ± 0.17Aa	0.52 ± 0.08ABa	0.58 ± 0.24Aa	0.53 ± 0.19Aa	17.50 ± 0.13Aa	17.12 ± 0.31Aab	17.06 ± 0.32Aa			
	CM	5.78 ± 0.75Aa	6.15 ± 0.18Aa	5.50 ± 0.62Aa	0.28 ± 0.12Ba	0.52 ± 0.17Aa	0.43 ± 0.17Ab	16.66 ± 0.11Bab	17.18 ± 0.14Aa	17.06 ± 0.07Aa			
GSG	ZM1	6.11 ± 0.05ABa	6.11 ± 0.09Aa	5.32 ± 0.04Aab	1.48 ± 0.16Aa	1.07 ± 0.14Aa	0.64 ± 0.23ABa	16.19 ± 0.45Ab	17.73 ± 0.28Aa	18.45 ± 0.03Aa			
	ZM2	6.00 ± 0.40ABa	6.13 ± 0.08Aa	5.84 ± 0.38Aa	1.03 ± 0.1ABa	0.71 ± 0.12ABa	0.92 ± 0.3ABa	17.22 ± 0.36Aa	17.24 ± 0.29ABa	17.40 ± 0.95Aa			
	ZM3	5.75 ± 0.44ABa	5.91 ± 0.27Aa	5.79 ± 0.45Aa	1.12 ± 0.43ABa	1.05 ± 0.11Aa	1.34 ± 0.25Aa	17.76 ± 0.47Aa	17.84 ± 0.27Aa	12.55 ± 5.30Aa			
	ZMM	5.44 ± 0.29Ba	5.59 ± 1.26Aa	5.25 ± 0.84Aab	0.77 ± 0.07ABa	0.49 ± 0.16Ba	0.41 ± 0.2Ba	16.85 ± 0.04Aab	17.46 ± 0.03ABa	16.98 ± 0.01Aa			
	CM	7.16 ± 0.81Aa	6.09 ± 0.46Aa	5.69 ± 0.52Aa	0.61 ± 0.3Ba	0.72 ± 0.09ABa	1.11 ± 0.33ABa	16.76 ± 0.21Aab	16.89 ± 0.12Ba	17.08 ± 0.36Aa			

续表 4(1)
Table 4(Continued)

放牧管理模式 grazing management regimes	鼠丘年限 Zokor mounds ages	土壤有机碳 Soil organic carbon($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			碳氮比 carbon nitrogen ratio			pH		
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
RG	ZM1	59.40 ± 3.50Aa	59.80 ± 2.91Aa	55.19 ± 4.97Aa	12.30 ± 1.47Aa	13.47 ± 0.65Aa	12.05 ± 1.63Aa	7.85 ± 0.11Aa	7.76 ± 0.11Aa	7.67 ± 0.15Aa
	ZM2	44.70 ± 1.13Aa	45.63 ± 1.29Aa	43.35 ± 2.16Ba	10.49 ± 0.20Aa	11.23 ± 0.31Aa	11.06 ± 0.33Aa	7.79 ± 0.05Aa	7.67 ± 0.07Aa	7.78 ± 0.07Aa
	ZM3	47.88 ± 1.24Aa	48.05 ± 0.99Aa	46.80 ± 0.27Bab	11.62 ± 0.77Aa	11.43 ± 0.85Aa	10.69 ± 0.33Aa	7.8 ± 0.07Aa	7.79 ± 0.09Aa	7.62 ± 0.12Aa
	ZMM	53.87 ± 6.01Aa	60.81 ± 3.16Aa	57.15 ± 4.70Aa	10.37 ± 1.31Aa	11.91 ± 1.71Aab	10.74 ± 0.23Aa	7.61 ± 0.04Aa	7.67 ± 0.05Aa	7.67 ± 0.1Aa
	CM	65.13 ± 1.19Aab	55.24 ± 3.19Aa	47.28 ± 3.60Ba	11.57 ± 0.91Aa	12.19 ± 0.33Aa	8.37 ± 1.08Aa	7.71 ± 0.08Aa	7.76 ± 0.03Aa	7.76 ± 0.06Aa
PG	ZM1	46.07 ± 4.57BCa	51.23 ± 8.65Aa	49.87 ± 5.85Aa	9.26 ± 1.55Aab	10.23 ± 0.51Ab	11.72 ± 0.14Aa	7.70 ± 0.04Aa	7.74 ± 0.1Aa	7.68 ± 0.03Aa
	ZM2	43.54 ± 2.70Ca	43.07 ± 2.23ABa	41.39 ± 1.27Ba	11.26 ± 1.20Aa	10.79 ± 0.87Aa	11.37 ± 0.40ABa	7.67 ± 0.03Aa	7.72 ± 0.04Aa	7.71 ± 0.05Aa
	ZM3	42.42 ± 0.85Ca	43.16 ± 0.41ABa	33.66 ± 9.63Bb	10.39 ± 0.50Aab	11.06 ± 0.71Aa	10.57 ± 2.58ABa	7.70 ± 0.07Aa	7.74 ± 0.02Aa	7.72 ± 0.08Aa
	ZMM	52.21 ± 7.17ABa	42.10 ± 2.31ABab	43.22 ± 0.03ABa	10.75 ± 0.58Aa	14.07 ± 3.01Aa	11.16 ± 0.25ABa	7.69 ± 0.05AaAa	7.73 ± 0.02Aa	7.7 ± 0.04Aa
	CM	55.19 ± 5.96Ab	41.14 ± 4.15ABb	26.10 ± 3.65Bb	11.09 ± 0.44Aa	11.35 ± 1.23Aa	9.23 ± 2.93Ba	7.69 ± 0.04Aa	7.73 ± 0.06Aa	7.71 ± 0.05Aa
CG	ZM1	44.15 ± 9.00Aa	48.23 ± 4.69ABa	59.89 ± 6.26Aa	6.97 ± 1.42ABab	9.18 ± 1.04ABb	9.69 ± 0.22Ab	7.69 ± 0.02Aa	7.73 ± 0.07Aa	7.71 ± 0.08Aa
	ZM2	45.91 ± 5.85Aa	47.47 ± 2.40ABa	50.09 ± 7.48Aa	8.13 ± 0.19ABb	8.64 ± 0.40ABb	15.06 ± 7.39Aa	7.69 ± 0.01Aa	7.73 ± 0.02Aa	7.71 ± 0.05Aa
	ZM3	48.04 ± 0.27Aa	58.12 ± 6.47ABa	55.69 ± 4.51Aa	8.13 ± 0.50ABb	9.31 ± 0.34ABa	10.08 ± 1.46Aa	7.69 ± 0.04Aa	7.73 ± 0.03Aa	7.71 ± 0.11Aa
	ZMM	37.91 ± 10.51Aa	45.98 ± 8.57Bab	41.49 ± 14.43Aa	6.21 ± 1.55Bb	7.82 ± 0.99Bab	7.01 ± 2.43Aa	7.69 ± 0.01Aa	7.73 ± 0.09Aa	7.71 ± 0.02Aa
	CM	60.74 ± 6.26Ab	66.39 ± 4.45Aa	47.12 ± 3.70Aa	10.96 ± 1.95Aa	10.79 ± 0.68Aa	8.84 ± 1.32Aa	7.69 ± 0.01Aa	7.73 ± 0.04ABa	7.71 ± 0.03Aa
GSG	ZM1	52.77 ± 2.21Ba	52.97 ± 0.81ABa	46.66 ± 2.17Aa	8.64 ± 0.29ABb	8.67 ± 0.01Ab	8.78 ± 0.47Ab	7.69 ± 0.06Aa	7.73 ± 0.05Aa	7.71 ± 0.07Aa
	ZM2	43.42 ± 2.96Ba	47.81 ± 1.83ABa	50.25 ± 2.96Aa	7.24 ± 0.10Bb	7.79 ± 0.20Ab	8.66 ± 0.56Aa	7.69 ± 0.05Aa	7.73 ± 0.03Aa	7.71 ± 0.01Aa
	ZM3	46.91 ± 4.65Ba	44.13 ± 9.89Ba	52.47 ± 6.49Aab	8.36 ± 1.37ABb	7.59 ± 1.97Aa	9.35 ± 1.92Aa	7.69 ± 0.02Aa	7.73 ± 0.01Aa	7.71 ± 0.11Aa
	ZMM	41.11 ± 5.61Ba	37.80 ± 8.52Bb	37.53 ± 12.09Aa	7.61 ± 1.14Bab	7.20 ± 1.40Ab	8.22 ± 3.36Aa	7.69 ± 0.12Aa	7.73 ± 0.09Aa	7.71 ± 0.06Aa
	CM	77.77 ± 0.33Aa	65.46 ± 2.38Aa	43.33 ± 0.51Aa	11.16 ± 1.31Aa	10.85 ± 0.75Aa	7.74 ± 0.67Aa	7.69 ± 0.01Aa	7.73 ± 0.02Aa	7.71 ± 0.1Aa

表 5 各土壤因子载荷
Table 5 Loads of various soil factors

指标 Index	ZM1			ZM2			ZM3			ZMM			CM		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
土壤含水量 Soil water content	0.82	0.12	-0.22	0.67	0.45	-0.35	0.73	-0.22	0.36	0.67	0.51	0.38	0.82	0.20	-0.20
容重 Bulk density	-0.77	-0.52	0.26	-0.89	-0.29	-0.02	-0.86	-0.19	-0.19	-0.82	-0.43	-0.09	-0.93	0.00	0.12
pH	-0.47	0.10	-0.68	-0.68	-0.12	0.02	0.03	-0.71	0.22	-0.18	0.66	0.10	-0.46	0.47	-0.47
孔隙度 Porosity	0.51	0.56	-0.37	0.65	0.35	-0.22	0.92	0.04	0.19	0.78	0.38	-0.02	0.82	0.14	-0.15
全氮 Total nitrogen	0.82	-0.40	0.02	0.69	-0.54	0.37	0.71	0.45	-0.27	0.61	0.03	-0.66	0.70	-0.57	-0.26
全磷 Total phosphorus	0.27	-0.19	0.49	0.48	-0.61	-0.04	0.07	0.59	-0.40	0.07	-0.12	0.72	0.01	-0.44	0.78
全钾 Total potassium	0.28	-0.84	0.15	0.68	-0.13	-0.19	0.52	-0.51	0.06	0.59	-0.46	0.31	0.58	0.16	0.23
有机碳 Organic carbon	0.39	0.57	0.60	0.35	0.32	0.86	0.05	0.81	0.49	-0.33	0.71	-0.27	0.83	0.20	0.21
碳氮比 C/N ratio	-0.43	0.79	0.40	-0.28	0.82	0.13	-0.65	0.27	0.68	-0.72	0.52	0.30	0.10	0.83	0.47
特征值 Eigenvalues	2.88	2.46	1.48	3.50	1.87	1.11	3.33	2.13	1.20	3.11	2.02	1.37	3.95	1.56	1.29
VCR/%	32.0	27.3	16.5	38.8	20.8	12.4	37.0	23.6	13.3	34.5	22.5	15.2	43.9	17.3	14.3
CCR/%	32.0	59.3	75.8	38.8	59.6	72.0	37.0	60.6	74.0	34.5	57.0	72.2	43.9	61.2	75.5

VCR: 方差贡献率; CCR: 累计贡献率。

VCR: Variance contribution rate; CCR: Cumulative contribution rate.

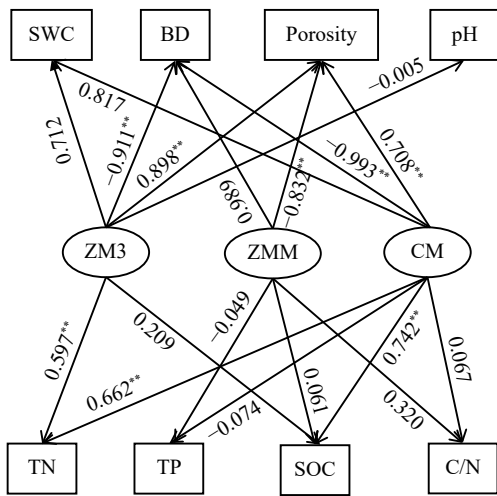


图 2 鼠丘对土壤因子的影响

Figure 2 Effects of zokor mounds on soil factors

SWC: 土壤含水量; BD: 容重; Porosity: 孔隙度; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; SOC: 土壤有机碳; C/N: 碳氮比。椭圆内表示隐变量; 矩形方框内表示测量变量; 数值表示路径系数; **表示在 $P=0.01$ 水平上影响显著。

SWC: soil water content; BD: bulk density; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; TK: total potassium; SOC: Soil organic carbon; C/N: carbon to nitrogen ratio. Ellipses represent hidden variables; rectangular boxes represent measured variables; numerical values represent path coefficients; ** indicates significant difference at the 0.01 level.

增加至 $114 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [28], 出现这种差异可能是因为研究区域的不同, 以及在鼯鼠干扰前期草地土壤的养分

条件、鼯鼠干扰强度和鼯鼠上翻土壤深度的不同所导致。本研究结果表明, 鼯鼠扰动降低土壤容重, 增加 1 年鼠丘 0-30 cm 土层全氮和全钾, 以及 2 年鼠丘和 3 年鼠丘 10-20 cm 土层有机碳和全氮, 且增加 2 年鼠丘和 4 年以上鼠丘 20-30 cm 土层土壤全氮、有机碳和碳氮比, 这可能是由于高寒草甸土壤养分均随土层深度增加而下降, 而高原鼯鼠堆土与采食地下植被等方式会改变土壤养分的垂直分布, 即将将养分含量较少的地下土壤堆积到表面 [8], 但新鲜土壤堆积到表面时会增加土壤温度, 从而促进土壤养分的矿化作用增强, 最终会增加土壤循环过程, 从而增加土壤养分含量 [29]。

3.3 放牧与啮齿动物扰动对土壤理化特征的影响

本研究结果表明, 与原生草甸比较, 禁牧增加了鼠丘土壤 10-20 cm 土层土壤全氮和 20-30 cm 土层有机碳含量, 连续放牧降低了鼠丘土壤 0-10 和 10-20 cm 土层土壤有机碳含量, 生长季休牧增加了 3 年鼠丘各土层的全磷含量, 这可能是由于家畜放牧引起草地土壤理化特性、群落结构和植被高度的变化, 会影响啮齿动物对洞道的选择区域和对微生境的利用情况。本研究也表明, 鼠丘土壤养分含量随土层深度增加变化不明显, 这可能是由于

高原鼯鼠在形成鼠丘时不断土壤向地表进行挖掘,并进行多次回填等过程,使土壤在垂直方向上充分混合,土壤养分含量的垂直变化规律也发生变化。家畜对草地长期践踏会破坏啮齿动物的洞道,改变啮齿动物栖息地的环境,并且不同程度的放牧也会影响地下啮齿动物对洞道深浅的选择和洞道构筑特征^[7]。有蹄类动物的增加能够显著降低啮齿类动物的丰富度和多样性,但在不同的草地生态系统中会由于土壤的特性和物种组成的差异,致使啮齿类动物的食物资源等不同,从而也会出现一定的差异,啮齿动物扰动也会造成植物的死亡、土壤质量下降和草地退化等,只有将草-畜-鼠合理分配和管理才能使草地生态系统稳定可持续发展^[30]。

不同的放牧管理模式对高原鼯鼠鼠丘演替的影响不同,一般而言,家畜数量的差异导致排泄物、采食和践踏等不同,最终导致鼠丘土壤养分不同。有研究指出,高原鼯鼠密度与放牧强度显著正相关,当草地放牧强度较大时,高原鼯鼠密度增加,会加速草地的退化;放牧强度适中或较低时,高原鼯鼠密度较低,此时,高原鼯鼠鼠丘土壤养分含量高于原生草甸区域^[31]。Laycock 和 Richardson^[32]研究发现,与禁牧比较,放牧样地鼠丘土壤养分含量(全磷、全氮和有机质)较低。说明不同放牧管理模式对鼠丘土壤养分的分配不同,从而导致不同放牧管理模式鼠丘土壤养分的恢复能力出现差异。本研究结果表明,禁牧草地2年鼠丘和3年鼠丘的0-10和10-20 cm 土层土壤全氮含量显著低于生长季休牧,同时禁牧草地1年鼠丘、2年鼠丘和3年鼠丘的0-10 cm 土层土壤全磷含量显著低于生长季休牧,以及连续放牧和禁牧草地1年鼠丘20-30 cm 层土土壤全钾含量显著低于生长季休牧,与上述研究结果有些不同。原因可能是:1)研究区域不同,本研究区域为高寒草甸土壤类型,上述研究区域为亚高山草地土壤类型。2)本研究对象为高原鼯鼠鼠丘,上述研究对象为囊地鼠(*Thomomys talpoide*)鼠丘。3)本研究将鼠丘划分为不同的演替阶段,而上述研究没有将鼠丘划分为不同的年限。可见,鼠丘土壤养分在不同的生境可能存在较大的差异,同时放牧管理模式对鼠丘土壤养分的影响与鼠丘的演替时间有关系。

放牧对演替的影响表现为:大型蹄类动物(牛和羊等)大量的体液和分解产物进入土壤,产生充足的养分,提供无竞争压力的受干扰区域,其区域资源丰富,拓殖的物种一般不是来自土壤种子库,因此该区域的许多先锋物种在草地上非常稀少。动物残体所在之处将会长久影响土壤养分含量,对演替的进程产生一定的影响^[13]。演替初期土壤贫瘠,土壤表面的透射光随演替程度的增加逐渐减少。本研究发现不同放牧管理模式对3年鼠丘和4年以上鼠丘的土壤有机碳具有正影响,可能是由于3年和4年以上鼠丘较1年鼠丘比较地上生物量增加,从而增加了有机物质向土壤中的输入,最终导致土壤有机碳含量的增加^[9]。除此之外,鼯鼠扰动后形成的高出地表的鼠丘增加了生境异质性,有利于幼苗萌发、新种定殖和物种多样性的增加,植被的演替又进一步影响了土壤,改变了植被-土壤互馈关系。有研究发现,划区轮牧和生长季休牧草地的1年鼠丘和2年鼠丘上物种 Shannon-Wiener 多样性指数均高于原生草甸区域,而连续放牧样地原生草甸的物种 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于各年限鼠丘上物种 Shannon-Wiener 多样性指数^[11],这说明不同放牧管理模式会使鼠丘群落演替中物种多样性产生较大差异,鼠丘上物种多样性的差异会反馈到土壤中,例如土壤中根系生物量的不同,也会导致土壤中碳输入的不同,最终会导致土壤养分分配的差异^[1]。

4 结论

与连续放牧比较,生长季休牧显著增加了1年鼠丘和2年鼠丘0-10 cm 土层土壤全磷含量,划区轮牧显著增加了2年鼠丘0-10和10-20 cm 土层土壤碳氮比;与禁牧比较,生长季休牧显著增加了2年鼠丘和3年鼠丘0-10 cm 土层土壤含水量,同时,划区轮牧也显著增加了3年鼠丘0-10、10-20和20-30 cm 土层的全氮含量;不同管理模式对3年鼠丘的土壤含水量、全氮和有机碳具有正影响,对4年以上鼠丘的土壤有机碳和碳氮比具有正影响,对原生草甸的土壤含水量、全氮、有机碳和碳氮比具有正影响。综合分析发现生长季休牧能够较好地恢复鼠丘土壤养分含量。

参考文献 References:

- [1] 何贵永, 孙浩智, 史小明, 齐威, 杜国祯. 青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应. *草业学报*, 2015, 24(4): 12-20.
HE G Y, SUN H Z, SHI X M, QI W, DU G Z. Soil properties of Tibetan Plateau alpine wetland affected by grazing and season. *Acta Prataculture Sinica*, 2015, 24(4): 12-20.
- [2] 董世魁, 江源, 黄晓霞. 草地放牧适宜度理论及牧场管理策略. *资源科学*, 2002, 24(6): 35-41.
DONG S K, JIANG Y, HUANG X X. Suitability-degree of grassland grazing and strategies for pasture management. *Resources Science*, 2002, 24(6): 35-41.
- [3] YANG Z N, ZHU Q A, ZHAN W, XU Y Y, ZHU E X, GAO Y H, LI S Q, ZHENG Q Y, ZHU D, HE Y X, PENG C H, CHEN H. The linkage between vegetation and soil nutrients and their variation under different grazing intensities in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2018, 110: 128-136.
- [4] KOTZE E, SANDHAGE-HOTGANN A, MEINEL J A, PREEZ C C, AMELUNG W. Rangeland management impacts on the properties of clayey soils along grazing gradients in the semi-arid grassland biome of South Africa. *Journal of Arid Environments*, 2013, 97(1): 220-229.
- [5] NIU K C, HE J S, LECHOWICZ M J. Grazing-induced shifts in community functional composition and soil nutrient availability in Tibetan alpine meadows. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(5): 1554-1564.
- [6] 王仁忠, 李建东. 放牧对松嫩平原羊草草地影响的研究. *草业科学*, 1992, 9(2): 11-14.
WANG R Z, LI J D. The influence of grazing on the *Aneurolepidium chinense* grassland in Songnen Plain. *Pratacultural Science*, 1992, 9(2): 11-14.
- [7] 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.
SU J H, NAN Z B, JI W H. Effects of livestock grazing on rodents in grassland ecosystems. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(11): 136-148.
- [8] ZHANG Y M, LIU J K. Effects of plateau zokors (*Myospalax fontanierii*) on plant community and soil in an alpine meadow. *Journal of Mammalogy*, 2003, 84(2): 644-651.
- [9] NYSTUEN K O, EVJU M, RUSCH G M, GRAAE B J, EIDE N E. Rodent population dynamics affect seedling recruitment in alpine habitats. *Journal of Vegetation Science*, 2014, 25(4): 1004-1014.
- [10] 辛小娟, 杨莹博, 王刚, 任正炜, 储诚进, 张仁懿. 鼯鼠土丘植物群落演替生态位动态及草地质量指数. *生态学杂志*, 2011, 30(4): 700-706.
XIN X J, YANG Y B, WANG G, REN Z W, CHU C J, ZHANG R Y. Niche dynamics of plant community succession and grassland quality index on zokor mounds. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 700-706.
- [11] 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.
ZHANG Q, YANG J, YAO B H, CAI Z Y, SUN X M, WANG C, GUO H L, TAN Y C, SU J H. Effects of different grazing strategies on zokor mounds plant community succession in alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2802-2811.
- [12] 李晓强, 殷秀琴, 孙立娜. 松嫩草原不同演替阶段大型土壤动物功能类群特征. *生态学报*, 2014, 34(2): 442-450.
LI X Q, YIN X Q, SUN L N. Soil macro-faunal guild characteristics at different successional stages in the Songnen grassland of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 442-450.
- [13] TILMAN D. Resource Competition and Community Structure. Princeton: Princeton University Press, 1982.
- [14] JONES A L, LONGLAND W S. Effects of cattle grazing on salt desert rodent communities. *The American midland Naturalist*, 1999, 141(1): 1-11.
- [15] 特喜铁, 夏远春. 不同放牧制度下大针茅草原啮齿动物种群数量分析. *呼伦贝尔学院学报*, 2017, 25(1): 146-148.
TE X T, XIA Y C. Quantitative analysis of rodent population of *Stipa grandis* under different grazing systems. *Journal of Hulunbeier University*, 2017, 25(1): 146-148.
- [16] 满都呼, 乌仁其其格, 张福顺, 袁帅, 武晓东, 付和平. 不同放牧强度下东北鼯鼠对栖息地植被地下生物量的影响. *中国草地学报*, 2015, 37(4): 92-97.

- Manduhu, Wurenqiqige, ZHANG F S, WU X D, FU H P. Influence of transbaikal zokor (*Myospalax psilurus*) on the underground biomass of habitat vegetation under different grazing intensity. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(4): 92-97.
- [17] 岳闯, 纪羽, 袁帅, 付和平, 杨素文, 郭乾伟, 武晓东. 放牧方式对东北鼯鼠秋季种群数量的影响. *草业科学*, 2018, 35(10): 2512-2519.
- YUE C, JI Y, YUAN S, FU H P, YANG S W, GUO Q W, WU X D. Effect of different grazing patterns on the population density of Transbaikal zokor in autumn. *Pratacultural Science*, 2018, 35(10): 2512-2519.
- [18] ZHANG Y M, ZHANG Z B, LIU J K. 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.
- [19] 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2016, 33(5): 886-890.
- JI W Z, WANG Q H. Effects of over-seeding on plant community and soil physical and chemical properties of degraded grassland in Tianzhu County. *Pratacultural Science*, 2016, 33(5): 886-890.
- [20] 胡雷, 阿的鲁骥, 字洪标, 王长廷. 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*, 2015, 26(9): 2794-2802.
- HU L, Adeluji, ZI H B, WANG C T. Effects of plateau zokor disturbance and restoration years on soil nutrients and microbial functional diversity in alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9): 2794-2802.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] 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: 厦门大学, 2012: 332-343.
- LAI J S, MI X C. Analysis of ecological data sorting based on vegan software package. //Proceedings of the Ninth National Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization Symposium. Xiamen: Xiamen University, 2012: 332-343.
- [23] WU G L, DU G Z, LIU Z H, SIMON T. Effect of fencing and grazing on a Kobresia-dominated meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2009, 319(1/2): 115-126.
- [24] HUI D, JACKSON R B. Geographic and interannual variability in biomass partitioning in grassland ecosystems: A synthesis of field data. *New Phytologist*, 2005, 169(1): 85-93.
- [25] HUNTLY N, INOUE R. Pocket gophers in ecosystems: patterns and mechanisms. *Bioscience*, 1988, 38(11): 786-793.
- [26] WANG Q Y, BIAN J H, SHI Y Z. Influence of plateau zokor mounds on the vegetation nutrients in a alpine meadow. *Acta Theriologica Sinica*, 1993, 13(1): 31-37.
- [27] 鲍根生, 王宏生, 王玉琴, 曾辉, 马戈亮, 洛藏昂毛. 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*, 2016, 25(7): 95-103.
- BAO G S, WANG H S, WANG Y Q, ZENG H, MA G L, LuoZangangmao. Effects of plateau zokor burrowing activity on soil nutrient spatial heterogeneity in alpine grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(7): 95-103.
- [28] WANG T C, XIONG Y C, GE J P, WANG S M, LI Y, YUE D X, WANG T M, WANG G. Four-year dynamic of vegetation on mounds created by zokors (*Myospalax baileyi*) in a subalpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(2): 84-96.
- [29] ZHANG W G, HANG X L, YAN L, YING H. 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*, 2009, 52(3): 299-305.
- [30] ELDRIDGE D J, WHITFORD W G. Disturbances by desert rodents are more strongly associated with spatial changes in soil texture than woody encroachment. *Plant and Soil*, 2014, 381(1): 395-404.
- [31] ZHANG Y M, ZHOU W, FAN N, ZHANG D. Population dynamics and prediction of the plateau zokors. //LIU J, WANG Z. Alpine Meadow Ecosystem Fascicle 3. Beijing: Science Press, 1991: 175-179.
- [32] LAYCOCK W, RICHARDSON B. Long-term effects of pocket gopher control on vegetation and soils of a subalpine grassland. *Journal of Range Management*, 1975, 28(6): 458-462.

(责任编辑 魏晓燕)