



窝圈距离影响高寒草甸植物群落结构和土壤养分空间分布

边金霞 牛小霞 陈娟 徐 才让吉 马继红 吴昌顺 王银花

Nest circle distance affects plant community structure and spatial distribution of soil nutrients in alpine meadows

BIAN Jinxia, NIU Xiaoxia, CHEN Juan, XU Yi, Cairangji, MA Jihong, WU Changshun, WANG Yinhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0306>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同放牧强度下祁连山南麓高寒草甸植物群落及土壤水分特征

Plant community and soil water characteristics under different grazing intensities of alpine meadow on southern slope of Qilian Mountains

草业科学. 2023, 40(8): 2000 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0450>

放牧对天山荒漠草地土壤细菌群落的影响

Differences in soil bacterial communities of desert grasslands in Tianshan under different grazing disturbances

草业科学. 2023, 40(5): 1243 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0682>

补播乡土禾豆牧草对宁夏荒漠草地土壤微生物群落结构的影响

Impacts of reseeding native grass and a legume on soil microbial community structure in the desert steppe of Ningxia

草业科学. 2024, 41(5): 1099 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0558>

氮磷施肥微生物菌肥对退化高寒草甸植被特征和土壤理化性质的影响

N-P combined with microbial fertilizer application on vegetation characteristics and soil properties of degraded alpine meadows

草业科学. 2024, 41(7): 1595 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0983>

不同放牧强度对高寒草甸土壤种子库的影响

Effects of different grazing intensities on the soil seed bank in an alpine meadow

草业科学. 2023, 40(6): 1461 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0550>

退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响

Effects of degradation degree on plant communities and soil water holding capacity of Maqin alpine meadow

草业科学. 2022, 39(2): 235 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0388>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0306

边金霞, 牛小霞, 陈娟, 徐祎, 才让吉, 马继红, 吴昌顺, 王银花. 窝圈距离影响高寒草甸植物群落结构和土壤养分空间分布. 草业科学, 2024, 41(9): 1-10.

BIAN J X, NIU X X, CHEN J, XU Y, Cairangji, MA J H, WU C S, WANG Y H. Nest circle distance affects plant community structure and spatial distribution of soil nutrients in alpine meadows. Pratacultural Science, 2024, 41(9): 1-10.

窝圈距离影响高寒草甸植物群落结构和 土壤养分空间分布

边金霞¹, 牛小霞¹, 陈娟¹, 徐祎², 才让吉³, 马继红³, 吴昌顺³, 王银花³

(1. 甘肃省农业科学院经济作物与啤酒原料研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州大学生态学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省合作市草原工作站, 甘肃 合作 747000)

摘要: 窝圈距离是对长期管理强度(牲畜移动)变化的综合描述, 反映了长期管理强度(牲畜移动)的变化和草地植物群落之间的功能连接性, 能反映牲畜的移动模式和放牧强度。本研究以甘南高寒草甸冬季牧场为研究对象, 以窝圈为中心、3 km 为半径区域定义为重度放牧(HG), 6 km 为半径区域定义为中度放牧(MG), 9 km 为半径区域定义为轻度放牧(LG), 研究窝圈距离(以下叙述为放牧强度, 远的窝圈距离即低的放牧强度, 反之亦然)对草地植物群落结构、土壤理化性质、土壤微生物及土壤酶活性的影响。结果表明: 1) 地上生物量群落物种丰富度以及可食牧草生物量随着放牧强度增加而降低($P < 0.05$); 2) 全钾和可溶性有机氮含量随着放牧强度增加而显著下降($P < 0.05$); 3) 土壤微生物量氮含量随着放牧强度显著增加($P < 0.05$); 4) 放牧强度对土壤酶活性影响较明显, N-乙酰-β-D-氨基葡萄糖苷酶(NAG)、过氧化物酶(POD)和多酚氧化酶(PPO)活性随着放牧强度增加而降低($P < 0.05$)。这些结果基本类似于直接放牧强度的试验结果, 随着窝圈距离的增大, 放牧强度降低, 增加了植物群落多样性和可食牧草生物量, 增加土壤养分的空间分布异质性。因此, 窝圈距离可以作为反映牲畜在当地景观中移动频次和强度, 可以表征放牧强度。

关键词: 窝圈距离; 放牧强度; 植物群落结构; 土壤理化性质; 土壤微生物; 土壤酶活性

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)09-0001-10

Nest circle distance affects plant community structure and spatial distribution of soil nutrients in alpine meadows

BIAN Jinxia¹, NIU Xiaoxia¹, CHEN Juan¹, XU Yi², Cairangji³, MA Jihong³, WU Changshun³, WANG Yinhu³

(1. Institute of Economic Crops and Malting Barley Material, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. School of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Hezuo City Grassland Workstation, Hezuo 747000, Gansu, China)

Abstract: The effects of grazing intensity on grassland vegetation community structure and soil physicochemical properties has been extensively studied. However, very few studies have focused on how grazing intensity affects grassland plant community structure, soil physicochemical properties, soil microorganisms, and soil enzyme activity. This study investigated the effects of circular distance on grassland plant community structure, soil physicochemical properties, soil microorganisms, and soil enzyme activity in the winter pasture of the Gannan Alpine Meadow with a circle as the center and a 3 km radius area defined as heavy grazing (HG), a 6 km radius area defined as moderate grazing (MG), and a 9 km radius defined as light

收稿日期: 2024-05-17 接受日期: 2024-06-19

基金项目: 甘肃省草原监测评价科技支撑项目(GSZYTC-ZCJC-21009)

第一作者: 边金霞(1981-), 女, 甘肃永登人, 助理研究员, 主要从事水土保持、荒漠化防治和节水农业研究。E-mail: 450243490@qq.com

通信作者: 牛小霞(1986-), 女, 甘肃会宁人, 副研究员, 硕士, 主要从事作物栽培和农业节水研究。E-mail: 519077253@qq.com

grazing (LG). The results showed that the plant community structures changed significantly and the community height, coverage, and species richness decreased with an increase in grazing intensity ($P < 0.05$). Moreover, the response of soil physical and chemical property indicators to the pit distance varied. The total potassium and soluble organic nitrogen content significantly decreased with an increase in nest distance ($P < 0.05$), while the carbon and nitrogen content in microbial biomass was significantly increased with an increase in litter distance ($P < 0.05$). 4) The nest distance significantly impacts soil enzyme activity. The N-acetyl-beta-D-glucosaminidase, peroxidase, and polyphenol oxidase levels decreased with increasing ring distance ($P < 0.05$). These findings indicate that the nest circle distance can affect grassland plant community structure and ecosystem functioning and partially reflects grazing intensity. These results also provide theoretical support for grazing management and sustainable grassland utilization.

Keywords: Nest circle distance; grazing intensity; plant community structure; soil physical and chemical properties; soil microorganisms; soil enzyme activity

Corresponding author: NIU Xiaoxia E-mail: 519077253@qq.com

草地生态系统是陆地最大生态系统, 占全球陆地面积的 24%。我国的草地总面积约为 40 万 km^2 , 占国土总面积的 41%^[1]。青藏高原高寒草甸作为我国草地生态系统的重要部分, 在维持草地生态平衡中发挥着关键作用^[2]。放牧作为草地生态系统中最重要利用方式, 不仅可以影响草地物种组成, 还可改变草地的土壤理化性质^[3]。近年来高寒草甸超载过牧, 牲畜践踏、嚼食草根等极大程度加剧了植被盖度减少^[4]、地上生物量骤降^[5], 以及影响土壤理化性质改变、微生物养分特征^[6]和土壤酶活性的不稳定^[7], 从而造成土壤生物系统的严重受损、衰退和破坏, 导致草地退化。

目前对草地植物群落的结构和土壤理化性质的研究主要集中在放牧强度上, 而不同放牧强度对草地生态系统的研究主要集中在生物量及植物群落结构方面。陈宇鹏等^[8]对青海海北典型高寒草甸的不同放牧强度研究表明, 从轻度放牧到重度放牧, 地上生物量减少。李娜等^[9]在内蒙古草原上的研究表明, 放牧显著降低了植物地上/地下生物量以及植物多样性指数等, 且负效应随放牧强度和放牧时间的增加而增强; 张正义等^[10]对青藏高原草甸研究发现, 植物群落生物量随放牧强度的增加呈下降, 而物种丰富度和植物多样性指数随放牧强度的增加呈单峰变化。

土壤理化性质可直接反映土壤肥力, 直接影响植物的生长状况^[11]。土壤微生物也是土壤生态系统中的重要组成部分, 在物质循环和能量流动中起着关键的作用^[12]。土壤酶活性发生变化标志着土壤生态系统受到外界扰动影响, 且土壤的生物功能多样

性与土壤酶功能的多样性往往是密不可分的^[13]。越来越多的研究开始关注不同放牧强度下的土壤结构和功能的变化。马源等^[14]研究表明, 随着放牧强度增加, 土壤微生物生物量碳氮磷含量均显著下降。李宏等^[15]研究结果表明, 土壤有机碳和全氮与放牧强度呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。

当前研究者衡量放牧强度的标准多使用单位面积的牲畜数量, 但有国外学者提出, 在景观尺度上, 放牧压力和草地斑块之间的连通性一定程度上依赖于家畜的移动模式。村庄或窝圈距离可以很好地反映牲畜的移动模式和放牧强度^[16]。离窝圈较远的草地家畜干扰强度较低, 放牧压力较小, 特别是在具有长期放牧连续性和生境连续性的区域, 窝圈距离能够更好表明牲畜活动对生态系统的影响。然而, 这种以窝圈距离代表放牧强度用来研究家畜干扰的影响研究较少, 也不确定利用窝圈距离代表放牧强度试验结果是否类似于直接的放牧强度试验。本研究以窝圈距离表征放牧强度, 在长期持续放牧的甘南高寒美仁草原地区, 研究青藏高原高寒草甸冬季牧场不同窝圈距离如何影响植物群落结构、土壤理化性质、土壤微生物和土壤酶活性等, 从而分析不同窝圈距离对植物群落结构和土壤理化性状的影响, 为放牧管理和草地保护提供数据支持和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处甘肃省甘南藏族自治州合作市美仁

草原 (地理位置为 35°01'48" N, 103°06'00" E), 为青藏高原的高寒草甸。气候为高寒湿润类型气候, 冷季长, 暖季短, 年降水量 633~782 mm, 平均气温 2.3 ℃, 年总日照时数 2357.8 h, 太阳总辐射量 51983.9 J·cm⁻², 海拔高度为 3516 m。草地面积较大, 达 30.4 万 hm², 占全县土地总面积的 75.6%。研究区植被大致为一年生和多年生草本, 典型植物有鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*)、早熟禾 (*Poa annua*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、小米草 (*Euphrasia pectinata*)、龙胆 (*Gentiana scabra*)、老鹳草 (*Geranium wilfordii*)、丝叶毛茛 (*Ranunculus nematolobus*)、露蕊乌头 (*Gymnaconitum gymnantrum*)、黄芪 (*Astragalus membranaceus*) 等。

1.2 试验设计

2023 年 8 月, 在研究区选择气温、降水、地势等条件基本相同的地方。距离 3 km 设置为重度放牧 (heavy grazing, HG)、距离 6 km 设置为中度放牧 (moderate grazing, MG), 距离 9 km 设置为轻度放牧 (light grazing, LG)。牧场为冬季牧场。轻牧、中牧、重牧草地中分别设 3 个重复 (图 1)。每重复随机选择 3 个 1 m × 1 m 样方, 记录群落物种名称、频度等, 齐地刈割并称重。在此样方上用“W”法取 0—10

cm 土壤样品。

1.3 测定方法

每个样方对植物进行分类和称取鲜重 (表 1), 之后在室内烘干至恒重后, 称取干重; 用霍尼韦尔国际公司 pH 计测定土壤 pH; 烘干法测定土壤含水量; 用重铬酸钾容量法 (外加热法) 测定土壤有机碳、溶解性有机碳含量; 用 FIAstar 5000 流动注射分析仪 (FOSS, Sweden) 测定土壤全氮、全磷、溶解性有机磷; 用钼锑抗比色法测定速效磷含量; 用改良靛蓝法测定铵态氮和硝态氮含量; 用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷含量; 6 种土壤胞外酶的活性 [μmol·(g·h)⁻¹] 采用对硝基苯酚底物比色法测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2010、R 4.2.3 软件进行分析。运用 Excel 2010 进行平均值、标准差分析; 运用 R 4.2.3 进行不同放牧强度间的 One-way ANOVA 分析和绘制条形图, 显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 物种多样性与群落组分

轻度放牧条件下, 共发现植物 18 种, 中度放牧条件下, 共发现植物 11 种, 重度放牧条件下, 共发现植物 8 种, 植物群落物种总数随放牧强度增加而减少 (表 1)。

调查发现, 样地植物物种共有 20 种, 其中牲畜可食的有鹅绒委陵菜、早熟禾、小米草、龙胆、蒲公英、地丁、刺儿菜、老鹳草、甘青蒿、问荆、二裂委陵菜、西伯利亚蓼、遏兰菜、黄芪和车前草, 总计 15 种, 占总物种数的 75%, 地上生物量总计 1 060.01 g, 占总生物量的 93.73%; 毒害草有露蕊乌头、大蓟、翠雀、高原毛茛和丝叶毛茛, 总计 5 种, 占总物种数的 15%, 地上生物量总计 70.96 g, 占总生物量的 6.27%。放牧强度影响了植物群落可食植物和不可食植物的干重、物种丰富度 (表 2)。其中植物群落物种丰富度都随着放牧强度下降先增多后减少 ($P < 0.05$); 可食植物生物量在中度和重度放牧条件下显著低于轻度放牧; 中度放牧强度下, 不可食植物生物量干重最大, 可食植物生物量干重最小。

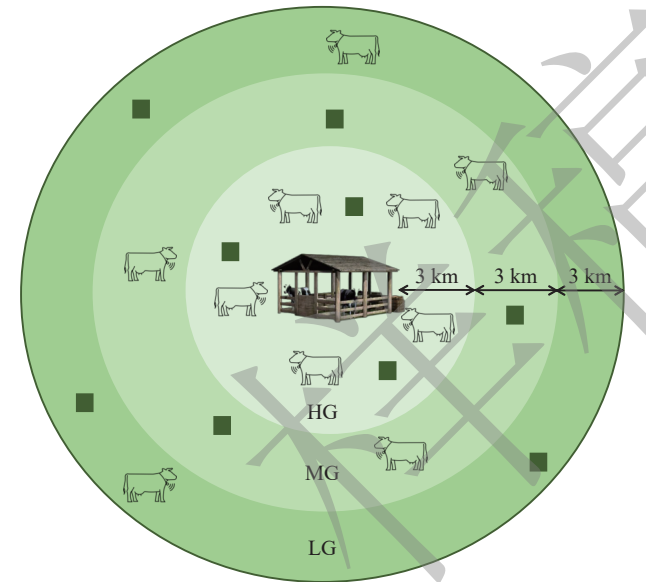


图 1 试验设计示意图

Figure 1 Experimental design diagram

HG, 重度放牧; MG, 中度放牧; LG, 轻度放牧; ■, 样方; 下同。
HG, heavy grazing; MG, moderate grazing; LG, light grazing; ■, Sampling point. This is applicable for the following figures and tables.

表 1 不同放牧强度下物种种类的地上生物量相对丰度
Table 1 Species composition and aboveground biomass relative abundance under different grazing intensities

物种 Species	放牧强度 Grazing intensity			物种 Species	放牧强度 Grazing intensity		
	LG	MG	HG		LG	MG	HG
早熟禾 <i>Poa annua</i>	44.44	53.03	42.87	地丁 <i>Corydalis bungeana</i>	0.46	0.15	/
鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	21.44	4.88	0.20	露蕊乌头 <i>Gymnaconitum gymnandrum</i>	0.28	/	/
西伯利亚蓼 <i>Knorringia sibirica</i>	7.88	/	/	黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i>	0.18	5.58	/
二列委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	6.13	3.28	/	龙胆 <i>Gentiana scabra</i>	0.12	0.46	/
刺儿菜 <i>Cirsium setosum</i>	5.90	/	/	小米草 <i>Euphrasia pectinata</i>	0.09	0.20	0.63
问荆 <i>Equisetum arvense</i>	5.65	/	/	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	0.08	0.24	0.54
甘青蒿 <i>Artemisia tangutica</i>	4.86	7.44	24.90	大蓟 <i>Cirsium spicatum</i>	0.05	/	29.27
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	1.14	19.64	/	车前草 <i>Plantago asiatica</i>	/	/	1.12
高原毛茛 <i>Ranunculus nematolobus</i>	0.77	2.10	/	丝叶毛茛 <i>Ranunculus tanguticus</i>	/	/	0.48
翠雀 <i>Delphinium grandiflorum</i>	0.50	/	/	遏兰菜 <i>Thlaspi arvense</i>	0.03	/	/

%

/ 表示样方中没有此物种出现。
/ indicates that this species did not appear in the quadrats.

表 2 不同放牧强度下植物群落结构和生物量
Table 2 Plant community structure and biomass under different grazing intensities

指标 Index	放牧强度 Grazing intensity		
	LG	MG	HG
可食植物生物量干重 Weight of edible plant biomass/g	85.89 ± 0.02a	33.20 ± 0.23b	33.56 ± 0.17b
不可食植物生物量干重 Dry weight of inedible plant biomass/g	0.72 ± 0.15b	1.43 ± 0.08a	0.32 ± 0.27c
物种丰富度 Species richness/%	18.00 ± 0.04b	12.00 ± 0.19a	8.00 ± 0.03a

同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Different lowercase letters within the same row indicate significant difference between the grazing intensities at the 0.05 level. This is applicable for the following tables.

2.2 土壤理化性质

土壤全钾 (TK) 和可溶性有机氮 (DON) 均表现为中度和重度生物量显著低于轻度放牧 ($P < 0.05$) (表 3)。土壤含水量 (SWC)、土壤 pH、全氮 (TN)、有机质和铵态氮含量并不随放牧强度改变而改变。全磷 (TP)、速效钾 (AK)、硝态氮和可溶性有机磷 (DOP) 在轻度和中度放牧强度间没有显著差异 ($P > 0.05$),

但在重度放牧强度下含量显著升高。可溶性有机碳 (DOC) 和速效磷 (AP) 含量在轻度和重度放牧强度下无显著变化, 但在中度放牧下显著减少。

2.3 土壤微生物养分特征

不同放牧强度下, 土壤微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)、微生物生物量磷 (MBP) 有差异 (表 4)。MBC 和 MBN 含量在轻度和中度放牧

表 3 放牧强度对土壤理化性质的影响
Table 3 Impact of Grazing Intensity on Soil Physical and Chemical Properties

指标 Index	放牧强度 Grazing intensity		
	LG	MG	HG
含水量 Water content/%	0.35 ± 0.31a	0.31 ± 0.76a	0.31 ± 0.35a
pH	7.04 ± 0.40a	7.26 ± 0.40a	7.06 ± 0.21a
全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	0.71 ± 0.05b	0.72 ± 0.05b	0.89 ± 0.11a
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	3.30 ± 0.23a	3.36 ± 0.55a	3.23 ± 0.11a
全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)	18.43 ± 2.67a	15.54 ± 0.17b	16.43 ± 2.24b
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	86.18 ± 6.50a	85.55 ± 9.48a	83.83 ± 2.75a
速效磷 Available phosphorus/(g·kg ⁻¹)	9.31 ± 0.17a	7.02 ± 1.34b	28.21 ± 11.18a
速效钾 Available potassium/(g·kg ⁻¹)	267.73 ± 37.45b	268.78 ± 46.65b	376.41 ± 55.32a
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(g·kg ⁻¹)	0.52 ± 0.13b	0.48 ± 0.06b	0.71 ± 0.16a
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(g·kg ⁻¹)	4.57 ± 0.80a	4.81 ± 0.57a	4.75 ± 0.21a
可溶性有机碳 Dissolved organic carbon/(g·kg ⁻¹)	93.27 ± 2.25a	87.24 ± 23.74b	141.10 ± 13.15a
可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen/(g·kg ⁻¹)	43.02 ± 8.07a	29.02 ± 2.80b	30.89 ± 0.33b
可溶性有机磷 Dissolved organic nitrogen/(g·kg ⁻¹)	109.52 ± 15.34b	91.53 ± 12.87b	224.09 ± 90.18a

表 4 放牧强度对微生物养分特征的影响
Table 4 Effects of grazing intensity on microbial nutrient characteristics

指标 Index	放牧强度 Grazing intensity		
	LG	MG	HG
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon/(mg·kg ⁻¹)	735.03 ± 45.72b	708.4 ± 12.25b	982.45 ± 23.01a
微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	142.32 ± 44.93b	139.42 ± 7.59b	201.89 ± 79.14a
微生物生物量磷 Microbial biomass phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	440.86 ± 31.08a	366.03 ± 4.56b	464.65 ± 15.12a

强度时差异不显著 ($P > 0.05$); 在重度放牧强度下 MBC 和 MBN 含量显著高于其他两个放牧强度 ($P < 0.05$), 这可能是土壤微生物中碳、氮变化对放牧响应更为敏感。MBP 与这两者并不相同, 在中度放牧强度下 MBP 含量显著下降, 而在轻度和重度放牧强度下 MBP 含量没有差异。由此可见, 放牧强度对微生物生物量碳和微生物生物量氮影响显著。

2.4 土壤酶活性特征

不同放牧强度下, 不同类型的土壤酶活性差异变化特征明显 (表 5)。N-乙酰-β-D-氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性含量因为放牧强度增加而减少, 轻度放牧强度条件显著高于中度和重度放牧强度 ($P < 0.05$)。β-葡萄糖苷酶 (BG) 和亮氨酸氨基肽酶 (LAP) 活性含量在重度放牧条件下显著增强; 酸性磷酸酶 (AP)

活性含量在 3 种放牧强度下无显著差异 ($P > 0.05$); 过氧化物酶 (POD) 和多酚氧化酶 (PPO) 活性含量变化趋势和 NAG 大致相同, 均表现为随着放牧强度增加导致酶活性降低。

3 讨论

3.1 放牧强度对植物群落结构的影响

中度干扰假说 (intermediate disturbance hypothesis, IDH) 预测植物多样性在适度放牧下达到峰值, 从而导致放牧多样性关系的驼峰形模式等^[17]。许多研究也认为中等放牧强度下, 草原生态系统中的物种多样性最高。Pulungan 等^[18]的相关研究也证实了这一点, 食草动物抑制了优势物种的竞争, 增加多植物物种共存从而促进了物种多样性的提高。但是在本

表 5 放牧强度对土壤酶活性的影响
Table 5 The effect of grazing intensity on soil enzyme activity

酶 Enzymatic	放牧强度 Grazing intensity		
	LG	MG	HG
N-乙酰-β-D-氨基葡萄糖苷酶 N-acetyl-beta-D-glucosaminidase	0.42 ± 0.02a	0.29 ± 0.003b	0.28 ± 0.01b
β-葡萄糖苷酶 N-acetyl-beta-D-glucosaminidase	1.67 ± 0.06b	1.32 ± 0.01c	1.86 ± 0.06a
亮氨酸氨基肽酶 Leucine aminopeptidase	0.47 ± 0.12b	0.43 ± 0.47b	3.22 ± 0.10a
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	10.21 ± 0.39a	10.60 ± 0.44a	11.03 ± 0.36a
过氧化物酶 Peroxidase	0.57 ± 0.02a	0.53 ± 0.01ab	0.50 ± 0.02b
多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	2.45 ± 0.08a	1.87 ± 0.03b	1.94 ± 0.07b

研究中,物种多样性和丰富度随着放牧强度增加呈现明显下降趋势。这可能是因为该地区为牧场,经过长期演替,可食用植物物种数量较其他地区丰富,草地可利用率高、适口性好。所以一旦有放牧活动,牲畜啃食造成植物叶片面积减少,光合速率和营养物质合成途径被阻碍,进一步会影响可食植物的生长繁殖;同时,家畜活动会优先啃食较高植物,为下层植物提供更多的光照辐射,改变群落垂直结构。

3.2 放牧强度对土壤理化性质的影响

Jiang 等^[19]、Zhou 等^[20] 研究认为,家畜排泄物会引起土壤各类化学反应,导致土壤 pH 增加。包秀霞等^[21] 研究认为高密度的家畜采食会导致表土裸露面积增大,水分蒸发,土壤盐度增加;冯小轩等^[22]、Abdalla 等^[23]、Basto 等^[24] 研究认为,植被群落和土壤 pH 显著正相关,但在本研究中,放牧处理对土壤 pH 的影响均不显著 ($P > 0.05$),这可能是由于土壤 pH 也与动物类型、植被类型等因素有关。一般认为,家畜践踏能够影响土壤含水量,张伟华等^[25] 对内蒙古退化草地的研究认为,随着放牧强度的增加 0—20 cm 土壤的含水量明显下降;石永红等^[26] 对华北农牧交错带的研究认为,随着放牧强度的增加土壤含水量下降。本研究中不同放牧强度对土壤含水量均无显著影响,这可能是土壤对践踏的响应有赖于水分条件。由于美仁草原属于高寒草甸,土壤含水量较少,家畜践踏的影响并不显著。潘森等^[27]、李岚等^[28] 研究认为,植被覆盖度对全磷的累积具有重要影响,放牧活动会导致地表生物量和群落

覆盖率下降,进一步导致放牧草地中土壤 TP 含量减少,表明 TP 含量对放牧干扰的响应强烈,可能是家畜体内的养分富集导致了土壤磷平衡失调。本研究结果表明,重度放牧条件下土壤中 TP 含量显著上升,这可能是因为重度放牧条件下家畜踩踏和啃食导致土壤中的养分供应不足,导致植物需要吸收更多的养分来维持生长和发育,这与史印涛等^[29] 研究结果一致。

3.3 放牧强度对土壤微生物的影响

在放牧过程中,因为家畜啃食造成凋落物的减少,导致土壤养分降低,家畜排便又可能会增加养分。Guodong 等^[30]、谈嫣蓉等^[31] 认为放牧降低土壤养分。但闫瑞瑞等^[32] 研究认为,随着放牧强度增加,养分增加。本研究结果表明,在重度放牧条件下,不同土层土壤中的微生物生物量碳和氮含量都显著高于轻度和中度放牧强度。这一变化趋势可能是因为家畜踩踏凋落物,加快凋落物分解进程,加速土壤中碳、氮含量增加,同时家畜排泄也会增加土壤养分含量,为微生物的生长提供了良好环境,继而增加了土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮的含量。

不同放牧条件下,土壤中的微生物生物量碳、微生物生物量氮、微生物生物量磷含量存在明显差异,这可能是因为放牧动物的排泄物中含有较高的磷元素,这些磷元素被土壤中的微生物吸收并转化为有机磷,从而增加了微生物生物量磷的含量;在中度放牧条件下,土壤微生物量碳、微生物量氮、微生物量磷含量无显著差异,这可能是因为在中度放

牧条件下, 土壤中的养分供应相对平衡, 能够满足生物生长和繁殖的需求; 在重度放牧条件下, 土壤微生物量碳、微生物量氮、微生物量磷含量差异显著, 这可能是因为重度放牧条件下, 土壤中的养分供应可能不足, 导致土壤结构破坏严重, 通气性和渗透性进一步下降, 从而增加了微生物量磷的含量。

3.4 放牧强度对土壤酶活性的影响

土壤酶的活性在一定程度上反映了生态系统功能, 其活性强弱与土壤中碳、氮、磷的循环息息相关^[33]。放牧通过采食、践踏和排泄物改变了土壤理化性质和植被特征, 从而对土壤微生物群落产生直接或间接影响, 进而土壤酶活性有可能会发生变化^[34]。潘森等^[27]研究认为放牧对草地土壤酶活性的作用强烈依赖于放牧强度。本研究结果表明在轻度放牧条件下, NAG 酶活性含量显著增加, 可能的原因是不同类型的土壤中, AP 酶的来源和功能可能有所差别, 此外, AP 酶的活性受到各种原因的影响, 如温度、湿度、pH 等, 这些因素在不同放牧强度下可能发生变化, 从而影响了 AP 酶的活性。吴雪峰等^[35]研究发现, 放牧处理会显著影响 BG、LAP 的活性。本研究结果表明, 在重度放牧条件下, BG 和 LAP 酶活性含量显著增加。这可能是因为重度放牧条件下土壤中的养分供应不足, 导致微生物需要分解更多的有机物质来获取能量。因此, 微生物对碳水化合物和有机酸的代谢活动增强, 从而促进了 BG 和 LAP 酶的活性。孙大帅等^[36]研究发现, 放牧对土壤整体酶活性无显著影响。本研究发现, 在

3 种放牧强度下, AP 酶活性含量无显著差异。这可能是因为不同类型的土壤中, AP 酶的来源和功能可能有所不同。此外, AP 酶的活性受到多种因素的影响, 如温度、湿度、pH 等, 这些因素在不同放牧强度下可能发生变化, 从而影响了 AP 酶的活性。POD 和 PPO 是两种重要的氧化还原酶, 主要参与有机物的氧化和还原反应。秦燕等^[37]研究发现, 在轻度放牧条件下, POD 和 PPO 活性显著增加。此外, 轻度放牧条件下土壤中的微生物数量也可能增加, 从而促进了 POD 和 PPO 的活性。

4 结论

本研究发现, 植物群落结构对放牧强度响应明显, 植物群落的物种丰富度均随着放牧强度增强明显降低。土壤含水量、土壤 pH、全氮、有机质和土壤铵态氮含量都没有影响; 全磷、速效钾、土壤硝态氮和可溶性有机磷含量在重度放牧强度下含量明显升高; 全钾和可溶性有机氮含量随着放牧强度增加含量显著下降; 可溶性有机碳和速效磷含量对放牧强度响应不明显。不同放牧强度对土壤微生物量碳氮影响显著, 均随着放牧强度增加而增加; 不同放牧强度对酶活性影响, 在中度和重度放牧强度下明显小于轻度放牧强度, 这也是因为家畜活动过于频繁导致植被啃食严重, 植被覆盖率下降, 土壤中氧气供应不足; 同时过度放牧也会带来土壤中有机质含量下降, 从而导致微生物数量降低, 降低了 N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶、过氧化物酶和多酚氧化酶活性含量。

参考文献 References:

- [1] 檀梦浩. 中国北方半干旱草地水分利用效率对轻度放牧、风蚀和沙尘沉降的响应. 河北: 河北大学硕士学位论文, 2023.
TAN M H. Responses of water use efficiency to light-intensity grazing, wind erosion and dust deposition in semiarid grassland of northern China. Master Thesis. Hebei: Hebei University, 2023.
- [2] 吴渊, 吴廷美, 林慧龙. 黄河源区草原生态保护补助奖励政策的减畜效果评价. 中国草地学报, 2020, 42(2): 137-144.
WU Y, WU T M, LIN H L. Evaluation on the effect of the grassland ecological compensation policy on livestock reduction in the Yellow River source area. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(2): 137-144.
- [3] YAO Z Y, SHI L N, HE Y C, PNG C J, LIN Z R, HU M A, YIN N, XU H K, ZHANG D G, SHAO X Q. Grazing intensity, duration, and grassland type determine the relationship between soil microbial diversity and ecosystem multifunctionality in Chinese grasslands: A Meta-analysis. Ecological Indicators, 2023, 154: 110801.
- [4] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展: 兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 2018, 26(1): 1-21.

- SHANG Z H, DONG Q M, SHI J J, ZHOU H K, DONG S K, SHAO X Q, LI S X, WANG Y L, MA Y S, DING L M, CAO G M, LONG R J. Research progress in recent ten years of ecological restoration for “Black Soil Land” degraded grassland on Tibetan plateau-concurrently discuss of ecological restoration in sangjiangyuan region. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 1-21.
- [5] WANG Y, WESCHE K. Vegetation and soil responses to livestock grazing in central asian grasslands: A review of chinese literature. *Biodiversity and Conservation*, 2016, 25(12): 2401-2420.
- [6] CUCHILLO-HILARIO M, WRAGE-MöNNIG N, ISSELSTEIN J. Forage selectivity by cattle and sheep co-grazing swards differing in plant species diversity. *Grass and Forage Science*, 2018, 73(2): 320-329.
- [7] 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. *地球科学进展*, 2006(5): 459-464.
- YAO T D, ZHU L P. The Response of environmental changes on Tibetan plateau to global changes and adaptation strategy. *Advances in Earth Science*, 2006(5): 459-464.
- [8] 陈宇鹏, 何琦, 杨永胜, 王军邦, 张秀娟. 不同放牧强度下祁连山南麓高寒草甸植物群落及土壤水分特征. *草业科学*, 2023, 40(8): 2000-2013.
- CHEN Y P, HE Q, YANG Y S, WANG J B, ZHANG X J. Plant community and soil water characteristics under different grazing intensities of alpine meadow on southern slope of Qilian Mountains. *Pratacultural Science*, 2023, 40(8): 2000-2013.
- [9] 李娜, 唐士明, 郭建英, 田茹, 王姗, 胡冰, 罗永红, 徐柱文. 放牧对内蒙古草地植物群落特征影响的 Meta 分析. *植物生态学报*, 2023, 47(9): 1256-1269.
- LI N, TANG S M, GUO J Y, TIAN R, WANG S, HU B, LUO Y H, XU Z W. Meta-analysis of effects of grazing on plant community properties in Inner Mongolia grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(9): 1256-1269.
- [10] 张正义, 胡逸, 张振豪, 苗百岭, 侯扶江, 程云湘. 高寒草甸功能群组成及营养品质对不同放牧强度的响应. *草业科学*, 2024, 41(1): 151-162.
- ZHANG Z Y, HU Y, ZHANG Z H, MIAO B L, HOU F J, CHENG Y X. Responses of alpine meadow functional group composition and nutrient quality to grazing intensity. *Pratacultural Science*, 2024, 41(1): 151-162.
- [11] GÜSEWELL S, GESSNER M O. N : P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Functional Ecology*, 2009, 23(1): 211-219.
- [12] 李海云. 祁连山高寒草地退化过程中“植被—土壤—微生物”互作关系. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文, 2019.
- LI H Y. The interaction of vegetation—soil—microbes in the degradation process of alpine grassland in Qilian Mountains of China. PhD Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [13] MAHAMING A R, MILLS A A S, ADL S M. Soil community changes during secondary succession to naturalized grasslands. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(2): 137-147.
- [14] 马源, 李林芝, 张德罡, 肖海龙, 陈建纲. 高寒草甸根际土壤化学计量特征对草地退化的响应. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3039-3048.
- MA Y, LI L Z, ZHANG D G, XIAO H L, CHEN J G. Responses of stoichiometric characteristics of rhizosphere soil to the degradation of alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3039-3048.
- [15] 李宏, 江康威, 杨永强, 孙瀚博, 王亚菲, 张青青. 天山北坡山地草甸植被特征和土壤养分对放牧的响应. *草业科学*, 2023, 40(4): 874-884.
- LI H, JIANG K W, YANG Y Q, SUN H B, WANG Y F, ZHANG Q Q. Response of vegetation characteristics and soil nutrients to grazing in mountain meadows on the north slope of the Tianshan Mountains. *Pratacultural Science*, 2023, 40(4): 874-884.
- [16] TODD S W. Gradients in vegetation cover, structure and species richness of Nama-Karoo shrublands in relation to distance from livestock watering points. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43: 293-304.
- [17] REITALU T, JOHANSSON L J. History matters: Village distances, grazing and grassland species diversity. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(6): 1216-1224.
- [18] PULUNGAN M A, SUZUKI S, GAVINA M K A, TUBAY J M, ITO H, MORITA S, NII M, ICHINOSE G, OKABE T, ISHIDA A, SHIYOMI M, TOGASHI T, YOSHIMURA J, MORITA S. Grazing enhances species diversity in grassland communities. *Scientific Reports*, 2019, 9: 11201.
- [19] JIANG Z Y, HU Z M, LAI D Y F, HAN D R, WANG M, LIU M, ZHANG M, GUO M Y. Light grazing facilitates carbon

- accumulation in subsoil in chinese grasslands: A Meta-analysis. *Global Change Biology*, 2020, 26(12): 7186-7197.
- [20] ZHOU G Y, ZHOU X H, HE Y H, SHAO J, HU Z, LIU R. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: A Meta-analysis. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1167-1179.
- [21] 包秀霞, 廉勇, 易津, 包秀平. 不同放牧方式下克氏针茅草原退化等级的评价. *中国草地学报*, 2015, 37(6): 62-66.
BAO X X, LIAN Y, YIJ, BAO X P. Evaluation of grassland degradation degree in *Stipa krylovii* steppe under different grazing system. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(6): 62-66.
- [22] 冯小轩. 模拟放牧对黄土高原典型草原土壤微生物群落组成和多样性的影响机制. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2023.
FENG X X. Influences of simulated grazing on soil microbial community composition and diversity in typical grasslands on the Loess Plateau. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [23] ABDALLA M, HASTING A, CHADWICK D R, JONES D L, EVANS C D, REES R M, SMITH P. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 253: 62-81.
- [24] BASTO S, THOMPSON K, REES M. The effect of soil ph on persistence of seeds of grassland species in soil. *Plant Ecology*, 2015, 216(8): 1163-1175.
- [25] 张伟华, 关世英, 李跃进. 不同牧压强度对草原土壤水分、养分及其地上生物量的影响. *干旱区资源与环境*, 2000, 14(4): 61-64.
ZHANG W H, GUANG S Y, LIY J. Effect of graxing capacity on water content, nutrient and biomass of steppe soil. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, 14(4): 61-64.
- [26] 石永红, 韩建国, 邵新庆, 刘贵河. 奶牛放牧对人工草地土壤理化特性的影响. *中国草地学报*, 2007, 29(1): 24-30.
SHIY H, HAN J G, SHAO X Q, LIU G H. Effects of dairy cows grazing on soil physical and chemical properties of alfalfa-grass pasture in agro-pastoral transitional zone of north China. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(1): 24-30.
- [27] 潘森, 卜嘉玮, 甘安琪, 尚振艳, 郭丁, 杨晓霞, 董全民, 牛得草. 放牧强度对高寒草地土壤微生物胞外酶化学计量的影响. *草地学报*, 2023, 31(6): 1780-1787.
PAN S, BU J W, GAN A Q, SHANG Z Y, GUO D, YANG X X, DONG Q M, NIU D C. Effect of grazing intensities on extracellular enzyme stoichiometry of soil microorganisms in alpine grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(6): 1780-1787.
- [28] 李岚. 滩羊放牧对典型草原生态化学计量特征和多功能性的影响. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2021.
LI L. Effects of Tan-sheep grazing on C: N: P stoichiometry and multifunctionality of typical steppe. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [29] 史印涛, 关宇, 张丞宇, 王明君, 崔国文. 放牧强度对小叶章草甸土壤理化性状的影响. *中国草地学报*, 2013, 35(02): 83-88.
SHI Y T, GUAN Y, ZHANG C Y, WANG M J, CUI G W. Effect of grazing intensity on physicochemical properties of different soil layer of *deyeuxia angustifoliameadow*. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(2): 83-88.
- [30] HAN G D, HAO X Y, ZHAO M L, WANG M J, ELLERT B H, WILLMS W, WANG M J. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 125(1/4): 21-32.
- [31] 谈嫣蓉, 杜国祯, 陈懂懂, 孙大帅, 张世虎, 王向涛. 放牧对青藏高原东缘高寒草甸土壤酶活性及土壤养分的影响. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2012, 48(1): 86-91.
TAN Y R, DU G Z, CHEN D D, SUN D S, ZHANG S H, WANG X T. Impact of grazing on the activities of soil enzymes and soil nutrient factors in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48(1): 86-91.
- [32] 闫瑞瑞, 卫智军, 辛晓平, 乌仁其其格. 放牧制度对荒漠草原生态系统土壤养分状况的影响. *生态学报*, 2010, 30(1): 43-51.
YAN R R, WEI Z J, XIN X P, WIRENGIQIGE, The effect of different grazing systems on soil nutrient contents in dessert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 43-51.
- [33] 李雅男, 李邵宇, 史世斌, 王占海, 张彬, 陈恒, 赵萌莉. 荒漠草原不同放牧强度下土壤酶化学计量特征的研究. *草地学报*, 2022, 30(9): 2239-2248.
LI Y N, LI S Y, SHI S B, WANG Z H, ZHAN G B, CHEN H, ZHAO M L. Study on soil enzyme stoichiometric characteristics of different grazing intensities in desert steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(9): 2239-2248.

- [34] 徐志超, 宋彦涛, 乌云娜, 霍光伟, 王晓滕, 道日娜. 放牧影响下克氏针茅草原不同物候期土壤酶活性与微生物生物量的变化. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2022-2028.
XU Z C, SONG Y T, Wuyunna, HUO G W, WANG X M, Daorina. Effect of grazing intensities on soil enzyme activities and soil microbial biomass of *Stipa krylovii* steppe in different phenological periods. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2022-2028.
- [35] 吴雪峰. 松嫩退化草地土壤微生物及其养分限制对家畜放牧的响应. 长春: 东北师范大学博士学位论文, 2022.
WU X F. Response of soil microbial community and its nutrient limitation to livestock grazing in Songnen degraded grassland. PhD Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2022.
- [36] 孙大帅. 不同放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植被和土壤影响的研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2012.
SUN D S. Studies on the effects of grazing intensity on vegetation and soil in alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. PhD Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [37] 秦燕, 牛得草, 康健, 曹格图, 张斯莲, 傅华. 贺兰山西坡不同类型草地土壤酶活性特征. 干旱区研究, 2012, 29(5): 870-877.
QIN Y, NIU D C, KANG J, CAO G T, ZHANG S L, FU H. Characteristics of Soil enzyme activities in different grasslands in the western slope of the Helan Mountain, China. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 870-877.

(责任编辑 苟燕妮)

