

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.024

引用格式:薛逸凡,王宁斌,李邵宇,等.不同放牧强度对短花针茅荒漠草原土壤酶活性的影响及其驱动因素[J].草地学报,2026,34(7):2615–2623

XUE Yi-fan, WANG Ning-bin, LI Shao-yu, et al. Effects of Different Grazing Intensities on Soil Enzyme Activities and Driving Factors in *Stipa breviflora* Desert Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2615–2623

不同放牧强度对短花针茅荒漠草原土壤酶活性的影响及其驱动因素

薛逸凡¹, 王宁斌², 李邵宇¹, 樊佳悦¹, 吕金岭¹, 茶俊香¹, 孙海淋¹, 张峰^{1*},
张彬¹, 赵萌莉¹

(1. 内蒙古农业大学草业学院/草地资源教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特010019;

2. 内蒙古农业大学生命科学学院, 内蒙古呼和浩特010019)

摘要:为探讨不同放牧强度对短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原土壤酶活性的影响及其因素,本研究基于短花针茅荒漠草原,设置不放牧(No grazing, CK)、轻度放牧(Light grazing, LG)、中度放牧(Moderate grazing, MG)和重度放牧(Heavy grazing, HG)4个梯度,分析了不同放牧强度对 β -D-纤维素酶、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶活性的影响,并结合物种丰富度、地上净初级生产力及土壤pH值、饱和含水量、容重、有机碳、速效氮、速效磷等因子。结果表明:随放牧强度增加,三种土壤酶活性、物种丰富度、地上净初级生产力、土壤有机碳、速效氮及速效磷均显著降低($P<0.05$),容重则显著上升($P<0.05$)。随机森林模型显示,速效氮与速效磷是调控土壤酶活性的主要驱动因子。放牧主要通过降低速效养分含量抑制土壤酶活性。本研究为荒漠草原保护与生态恢复提供了理论依据,草地管理利用中可采取控制载畜率、季节性休牧等措施。

关键词:放牧强度;荒漠草原;土壤酶活性;物种丰富度

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2615-09

Effects of Different Grazing Intensities on Soil Enzyme Activities and Driving Factors in *Stipa breviflora* Desert Steppe

XUE Yi-fan¹, WANG Ning-bin², LI Shao-yu¹, FAN Jia-yue¹, LÜ Jin-ling¹, CHA Jun-xiang¹,
SUN Hai-lin¹, ZHANG Feng^{1*}, ZHANG Bin¹, ZHAO Meng-li¹

(1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education of China, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. College of Life Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: To investigate the effects of different grazing intensities on soil enzyme activities in a *Stipa breviflora* desert steppe and the driving factors, this study was based on a *Stipa breviflora* desert steppe and established four grazing intensity levels: no grazing (CK), light grazing (LG), moderate grazing (MG), and heavy grazing (HG). The effects of different grazing intensities on the activities of β -D-cellobiohydrolase, β -1,4-N-acetylglucosaminidase, and alkaline phosphatase were analyzed, along with species richness, aboveground net primary productivity (ANPP), and soil pH, saturated water content, bulk density, organic carbon, available nitrogen, and available phosphorus. The results showed that with the increase of grazing intensity, the three

收稿日期:2025-11-07;修回日期:2026-02-26

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2024QN03049);草学一流学科科研专项(YLXKZX-NND-040);内蒙古农业大学高层次人才引进科研项目(NDYB2023-16);内蒙古自治区草种质创新与草地资源可持续利用重点实验室(2025KYPT0040);中国科协青年人才托举工程项目资助

作者简介:薛逸凡(2005-),男,蒙古族,内蒙古锡林郭勒人,本科生,主要从事草地生态学研究, E-mail:nmgxueyifan@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail:nmgzhangfeng@126.com

soil enzyme activities, species richness, aboveground net primary productivity, soil organic carbon, available nitrogen, and available phosphorus all significantly decreased ($P < 0.05$), whereas soil bulk density was significantly increased. The Random Forest model indicated that available nitrogen and available phosphorus were the primary drivers regulating soil enzyme activities. Grazing suppresses soil enzyme activities primarily by decreasing available nutrients. This study provides a theoretical basis for the conservation and ecological restoration of desert steppes. In grassland management and utilization, measures such as controlling stocking rates and implementing seasonal grazing exclusion can be adopted.

Key words: Grazing intensity; Desert steppe; Soil enzyme activities; Species richness

土壤酶由土壤微生物分泌,主导着土壤中有机的分解和养分转化,是维系土壤生态系统功能不可或缺的组成部分^[1-2],其活性是评估生态系统地下功能健康状况及土壤肥力的关键指标^[3-4]。相关研究表明,土壤酶活性对放牧管理措施的响应非常敏感,其变化趋势往往能提前预示土壤肥力和生态系统功能的变化方向^[5]。作为驱动土壤生物地球化学循环的核心催化剂,土壤酶在调控生态系统养分循环速率方面有关键作用^[6]。鉴于其在维持土壤肥力与健康中的核心地位,土壤酶活性已被广泛接受为评价土壤质量的一个高度敏感的生物指标^[7]。因此,研究土壤酶对于理解土壤碳氮磷循环机制、评估土壤质量和指导农业生产具有重要意义^[8-9]。

草原生态系统是地球生态系统的重要组成部分,它不仅通过提供畜牧业产品和水资源涵养等功能支撑着区域生计与经济发展,更在调节气候、保持水土和维护生物多样性方面发挥着不可替代的生态功能^[10]。放牧作为草地生态系统重要的干扰方式之一,通过改变植被群落结构和土壤理化性质,显著影响土壤酶活性及养分循环过程^[11-14],从而将地上管理措施与地下生态过程紧密联系起来。目前,关于放牧对短花针茅荒漠草原的影响研究,已在地上植被群落多样性、生态位、功能性状等方面积累了丰富成果。王琪等^[15]的研究表明放牧强度显著改变短花针茅荒漠草原中植物种群的生态位宽度和生态位重叠度,导致群落结构简化和种间竞争关系改变,进而引发生态系统功能退化。裴靖宏等^[16]的研究表明,随着载畜率增加,短花针茅等植物表现出比叶面积增加、植株高度降低等性状响应,这标志着其资源利用策略从“保守型”向“速生型”的转变。土壤酶活性不仅直接反映微生物群落的功能状态和对养分的需求,其不同种类酶活性的比值还能揭示土壤微生物的能量和养分限制状况,以及整个生态系统的养分循环平衡与限制格局^[17]。在放牧干扰下,土壤酶活性与植被变化、土壤理化性质及微生物群落结构之间的耦合关系,是决定生

态系统物质转化效率与稳定性的关键因素^[18-19]。然而,作为连接植物与地下养分循环的关键生物学纽带,土壤酶活性对放牧强度的响应机制尚不清晰,其驱动因子亦未被系统阐明。理解放牧如何影响土壤酶活性,对于揭示荒漠草原退化机理至关重要。因此,本研究以内蒙古短花针茅荒漠草原为对象,设置不同梯度放牧强度,旨在通过探究不同放牧强度对土壤碳、氮、磷分解酶活性的影响及其驱动因子,为短花针茅荒漠草原的科学保护与恢复提供更为深入的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验依托内蒙古四子王旗荒漠草原长期放牧试验平台(41°46′43.6″N, 111°53′41.7″E,海拔约1450 m)。该平台于2004年建立,所在区域属于温带大陆性气候,雨热同期,冬冷夏热,年均温约3.6℃,最高月均温为7月;降水量约为250 mm,主要集中在6—9月,且蒸发量远大于降水量。该地区属短花针茅荒漠草原,建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),优势种有无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等^[20],其他常见多年生植物还有银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、细叶葱(*Allium tenuissimum*)等,常见的一、二年生植物有栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)、刺穗藜(*Chenopodium aristatum*)等。植被稀疏低矮,总盖度平均18%~25%,群落平均高度5~7 cm,短花针茅的生殖枝相对较高,约25~40 cm^[21]。土壤类型属于栗钙土,土壤较贫瘠,有机质含量较低,处于少氮、缺磷和富钾状态^[22]。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,样地总面积约50 hm²,划分为3个区组,每个区组包含4个面积均为4.4 hm²

的放牧小区;在每个区组的4个小区内分别设置不放牧(No grazing, CK)、轻度放牧(Light grazing, LG)、中度放牧(Moderate grazing, MG)和重度放牧(Heavy grazing, HG)4个放牧强度水平处理,分别放牧0, 4, 8, 12只羊,载畜率分别为0, 0.91, 1.82, 2.71羊单位 $\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(0.5\text{a})^{-1}$ 。放牧家畜选择当地成年2岁羯羊,放牧期于每年6月初开始并于11月底结束,放牧时间为每日6:00—18:00。

1.3 实验取样与样品测定方法

本研究于2021年8月生物量高峰期开展野外植被调查和土壤样品采集,植物群落地上净初级生产力(above-ground net primary productivity, ANPP)采用移动围笼法进行估计。放牧开始之前,在每个小区内随机设置3个围笼($1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$),8月生物量高峰期时进行植被及土壤取样,在各移动围笼内设置1个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方,分别记录所有物种的高度、盖度和密度。统计样方内所有出现的物种数(作为物种丰富度),之后齐地面剪取各样方内所有植物的地上部分,于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒重,使用百分之一天平称重估计植物群落地上净初级生产力(Above-ground net primary productivity, ANPP)。此外,在各样方中随机设置1个环刀(容积 100 cm^3),收集土壤0~10 cm层样品,用于测定土壤容重。使用土钻(内径7 cm)对各小样方采用“五点法”收集0~10 cm深度的土壤样品并混合为一个样品,过2 mm筛,去除砾石与植物残体后分别用于以下测定:土壤饱和含水量、土壤酶活性(放置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存);剩余部分自然风干7天后测定土壤理化性质(pH值、有机碳、速效氮及速效磷含量)。

(1)土壤酶活性的测定:主要测定参与碳、氮、磷分解的3种土壤酶活性。分别为 β -D-纤维素酶(β -D-cellobiohydrolase, CBH)、 β -1, 4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β -1, 4-N-acetylglucosaminidase, NAG)和碱性磷酸酶(Alkaline phosphatase, ALP)。3种土壤酶活性测定需要新鲜土壤,在野外取样后放置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存;所有酶活性均采用微孔板荧光法测定,所用荧光底物为4-甲基-7-羟基香豆素和7-氨基-4-甲基香豆素^[23-24]。

(2)土壤理化性质测定:土壤饱和含水量(Soil saturated water content, SWC)使用定水头法测定^[25],土壤容重(Bulk density, BD)使用环刀法测

定,土壤pH值使用酸度计测定,土壤有机碳含量(Soil organic carbon content, SOC)使用重铬酸钾容量法-外加热法测定,土壤速效氮含量(Soil available nitrogen content, SAN)使用连续流动分析仪(碱解-蒸馏-靛酚蓝比色法)测定,土壤速效磷含量(Soil available phosphorus content, SAP)使用 NaHCO_3 浸提后采用钼锑钒比色法测定^[26]。

1.4 统计分析

用Excel 2021对各项数据进行初步整理;首先对实验数据进行正态分布检验和方差齐性检验,本试验的数据均符合正态分布且通过方差齐性检验,然后使用SPSS 21.0进行单因素方差分析,不同放牧处理之间采用Duncan检验,显著性水平为0.05;借助Origin 2021进行Pearson相关性热图分析及图表制作,此外,采用随机森林(Random forest)模型评估与土壤酶活性显著相关变量的重要性,试图找出影响土壤酶活性的关键驱动因子,该部分分析在R语言“randomForest”软件包中完成,并通过“rfPermute”包执行随机森林回归及获取变量的显著性。所有统计分析均在R4.2.2中进行并使用Origin2021b软件作图。

2 结果与分析

2.1 放牧强度对土壤酶活性的影响

由图1可知,不同放牧强度下土壤碳、氮、磷分解酶的活性存在显著差异。对于 β -D-纤维素酶、 β -1, 4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶,随着放牧强度增加,其活性呈现显著下降趋势,即 $\text{CK}>\text{LG}>\text{MG}>\text{HG}$ ($P<0.05$);对于碱性磷酸酶,CK处理的活性显著高于其他放牧强度($P<0.05$),LG与MG处理、MG与HG处理之间无显著差异,而LG处理显著高于HG处理($P<0.05$)。

2.2 放牧强度对植物群落物种丰富度及植物群落地上净初级生产力的影响

由图2可知,随着放牧强度的增加,物种丰富度呈下降趋势,HG处理显著低于CK处理($P<0.05$),但与LG, MG处理无显著差异;对于植物群落地上净初级生产力而言,CK和LG处理显著高于MG及HG处理($P<0.05$),而CK与LG处理、MG与HG处理之间无显著差异。

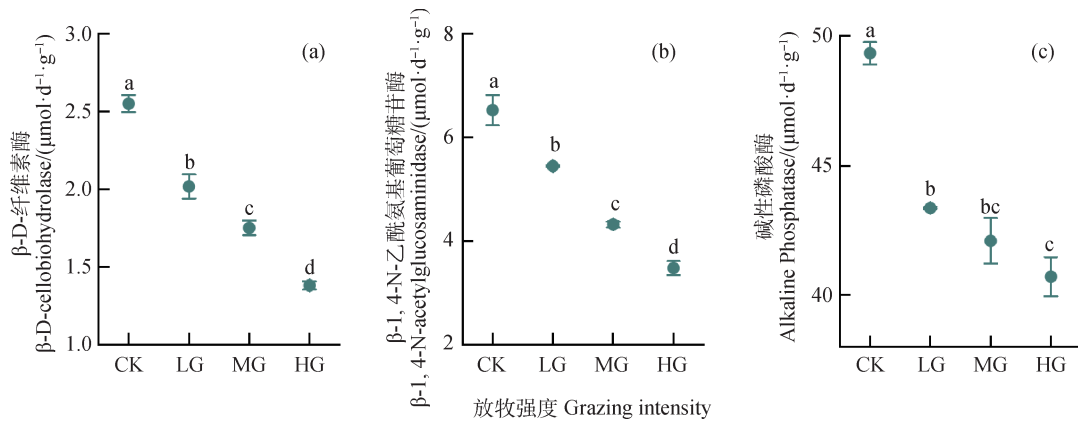


图 1 不同放牧强度对土壤碳、氮、磷分解酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different grazing intensities on the activities of soil carbon, nitrogen and phosphorus decomposition enzymes

注:不同小写字母之间表示不同放牧强度之间差异显著($P < 0.05$)。CK, 对照组; LG, 轻度放牧; MG, 中度放牧; HG, 重度放牧。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among grazing intensities at the 0.05 level. CK, No grazing; LG, Light grazing; MG, Moderate grazing; HG, Heavy grazing. The same as below

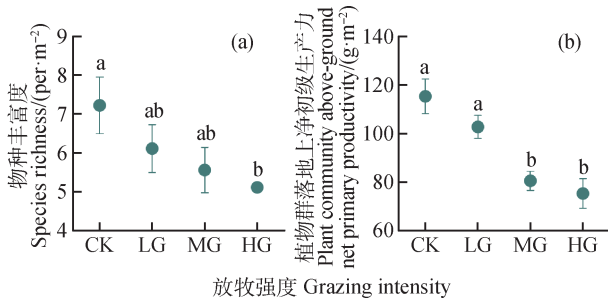


图 2 不同放牧强度对物种丰富度及植物群落地上净初级生产力的影响

Fig. 2 The effects of different grazing intensities on species richness and plant community above-ground net primary productivity

2.3 放牧强度对土壤理化性质的影响

由图 3 可知,在不同放牧强度下,除土壤 pH 值外,其余所测定的土壤理化性质均存在显著差异。

对于土壤饱和含水量, LG 处理显著高于 MG 和 HG 处理 ($P < 0.05$), 但与 CK 处理无显著差异; MG、HG、CK 处理之间均无显著差异。对于土壤容重, CK 与 LG 处理显著低于 MG 与 HG 处理 ($P < 0.05$), 且 CK 与 LG 处理间、MG 与 HG 处理间均无显著差异。对于土壤有机碳, CK 与 LG 处理显著高于 MG 与 HG 处理 ($P < 0.05$), 且 CK 与 LG 处理、MG 与 HG 处理间均无显著差异。对于土壤速效氮, CK 处理含量最高, HG 处理含量最低, CK 处理显著高于 MG 和 HG 处理 ($P < 0.05$); LG 处理显著高于 HG 处理 ($P < 0.05$); MG 与 HG 处理间无显著差异。对于土壤速效磷, CK 处理显著高于其他放牧强度处理 ($P < 0.05$); HG 处理显著低于 LG 和 MG 处理 ($P < 0.05$), 而 LG 与 MG 处理间无显著差异。

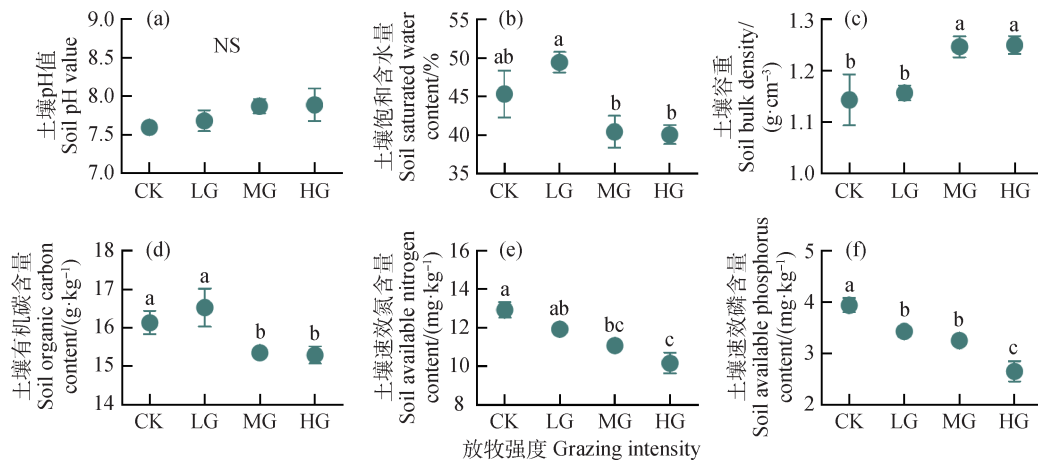


图 3 不同放牧强度对土壤理化性质的影响

Fig. 3 Effects of different grazing intensities on soil physical and chemical properties

2.4 土壤酶活性与环境因子之间的关系

如图4所示,在不同放牧强度下, β -D-纤维素酶、 β -1, 4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶、碱性磷酸酶三种酶活性均与生物因子及非生物因子存在显著相关性($P<0.05$)。具体如下: β -D-纤维素酶与物种丰富度、植物群落地上净初级生产力及土壤有机碳、速效氮、速效磷含量呈显著正相关($P<0.05$),与pH值、土壤容重呈显著负相关($P<0.05$); β -1, 4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与物种丰富度、植物群落地上净初级生产力及土壤饱和含水量、速效氮、速效磷含量呈显著正相关($P<0.05$),与土壤容重呈显著负相关($P<0.05$);碱性磷酸酶与植物群落地上净初级生产力及土壤饱和含水量、速效氮、速效磷含量呈显著正相关($P<0.05$),与土壤容重呈显著负相关($P<0.05$)。

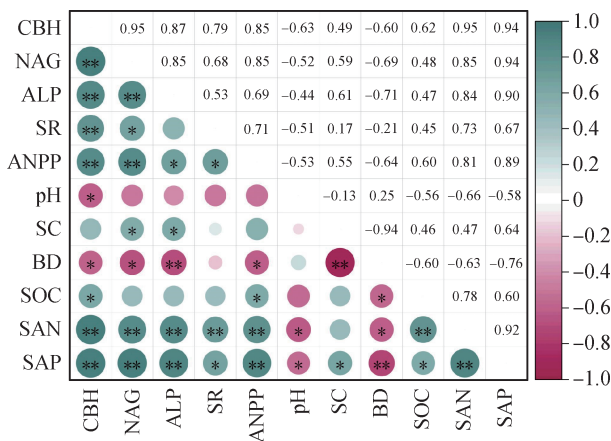


图4 土壤酶活性与物种丰富度、群落地上生产力及土壤理化性质之间的关系

Fig. 4 Relationship between soil enzyme activity and species richness, aboveground productivity of communities and soil physical and chemical properties

注:CBH, β -D-纤维素酶;NAG, β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶;ALP,碱性磷酸酶;SR,物种丰富度;ANPP,地上净初级生产力;pH,土壤pH值;SC,土壤饱和含水量;BD,土壤容重;SOC,土壤有机碳;SAN,土壤速效氮含量;SAP,土壤速效磷含量。*, $P<0.05$ **, $P<0.01$ 。下同
Note: CBH, β -D-cellobiohydrolase; NAG, β -1, 4-N-acetylglucosaminidase; ALP, alkaline phosphatase; SR, Species richness; ANPP, Aboveground net primary productivity; pH, Soil pH value; SC, Soil saturation moisture content; BD, Bulk density; SOC, Soil organic carbon; SAN, Soil available nitrogen content; SAP, Soil available phosphorus content. *, $P<0.05$, **, $P<0.01$. The same as below

2.5 土壤酶活性的主要驱动因子

如图5可知,在不同放牧强度下, β -D-纤维素酶活性的显著驱动因子为土壤速效氮含量、土壤速效磷含量及土壤pH值($P<0.05$); β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性的显著驱动因子为土壤速效氮含

量及地上净初级生产力($P<0.05$);碱性磷酸酶活性的显著驱动因子为土壤速效氮含量及土壤速效磷含量($P<0.05$)。总体而言,以上土壤碳、氮及磷分解酶的主要驱动因子为土壤速效氮含量。

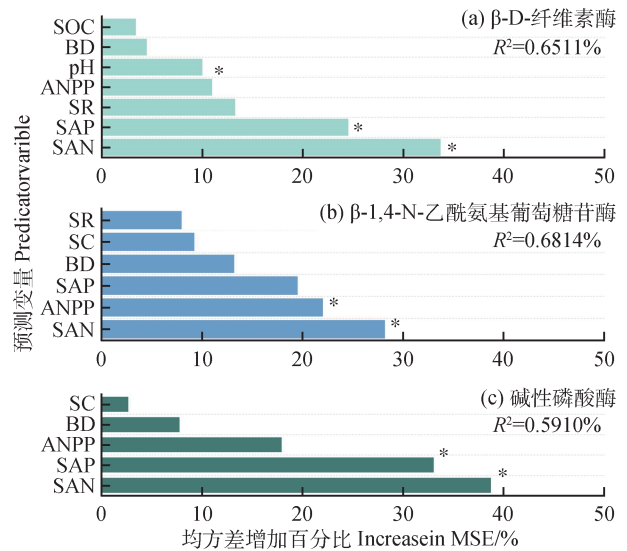


图5 各预测因子对土壤碳、氮、磷分解酶活性的相对重要性

Fig. 5 Relative importance of each predictor in determining the activities of soil decomposition enzymes involved in carbon, nitrogen, and phosphorus

3 讨论

土壤酶活性是表征土壤生态功能的关键指标,探究其在不同放牧强度下的变化规律,有助于揭示放牧影响下土壤酶活性的主要驱动因子及内在机制。本研究结果表明,随着放牧强度的增加,土壤碳、氮、磷分解酶的活性均显著降低,同时物种丰富度与植物地上净初级生产力也呈现下降趋势。赵敏等^[27]和王梓晗等^[28]的研究同样指出放牧对物种丰富度的负效应。全球范围内,高强度放牧普遍抑制土壤酶活性,本研究在重度放牧条件下观察到的酶活性下降趋势与之相符。正如 Mencil 等^[7]在其综述中所指出,高强度放牧通过减少土壤有机质输入、改变土壤理化性质(如增加容重)以及降低微生物生物量,从而普遍对土壤酶活性产生抑制效应。该结果与吴佳芯等^[29]在同一生态系统的研究高度一致,其进一步指出微生物熵的下降反映了微生物能效受损是潜在机制。本研究中,放牧导致土壤容重增加,可能导致孔隙度降低,进一步恶化微生物栖息环境;同时,重度放牧造成物种丰富度与地上净初级生产力显著下降,意味着通过凋落物与根系分泌物输入的土壤有机碳源大幅减少,而土壤有机

碳是驱动微生物活性的能量基础^[30]。此外,土壤速效氮、磷含量的降低也直接限制了微生物合成酶蛋白所需的营养元素供应^[31]。相关性与驱动因子分析显示,土壤速效氮是解释酶活性变化的最关键因子,这一结论与Ma等^[32]的观点一致。

上述地下生态过程的退化,与放牧所引发的地上群落的显著变化密切相关。王琪等^[15]和王梓晗等^[33]研究表明,放牧导致建群种短花针茅生态位萎缩,种间关系被重构,群落结构向耐牧植物主导的简化方向演替。同时,Zhu等^[34]发现放牧胁迫会降低植物氮同化酶活性,表明植物生理代谢受损。这些过程共同导致输入土壤的凋落物与根系分泌物在“质”与“量”上均下降,进而间接引起土壤微生物活性及其分泌酶活性的降低^[35]。除植物输入减少外,放牧亦直接破坏地下生境。王艺颖等^[36]在典型草原的研究表明,放牧会破坏土壤团聚体结构,在荒漠草原中该机制可能更为显著。土壤团聚体作为微生物的主要栖息场所,其结构破坏直接恶化了微生物的生存环境^[37]。因此,放牧通过减少植物碳输入与破坏土壤结构的双重途径,导致土壤微生物同时面临碳源匮乏与栖息环境恶化的双重胁迫,最终造成其活性及所分泌酶活性的全面下降。

本研究中,物种丰富度随着放牧强度增加而下降,该结果与中度干扰假说的预期不符,但却支持了Gao等^[38]提出的全球模式:在干旱低产的荒漠草原生态系统中,其恢复力和缓冲能力有限,即使较低强度的放牧干扰也可能超越其生态阈值,引发物种丰富度丧失而非促进。本研究发现,在短花针茅荒漠草原中,放牧导致植物物种丰富度显著下降,未出现“中度干扰假说”所预测的多样性峰值。这一结果与杨殿林等^[39]在水分条件较好的贝加尔针茅草甸草原中观察到的“中度干扰假说促进多样性”的结论形成对比。进一步地,本研究结果支持Bai等^[40]所强调的补偿效应机制及其对多样性的依赖,在短花针茅荒漠草原这一脆弱生态系统中,放牧引起的物种丧失可能导致物种间“补偿效应”机制失效,从而削弱生态系统对外界干扰的缓冲能力。在未放牧或轻度放牧群落中,不同物种可能通过异步生长动态与资源利用策略缓冲环境波动,为土壤微生物提供相对稳定的有机质与分泌物输入,而重度放牧导致群落结构简化与同质化^[27-28,33],丧失上述缓冲能力,使地下碳源与养分输入变得不稳定且匮乏,最终抑制依赖于此的土壤酶活性^[29]。

本研究进一步表明,放牧强度通过调控土壤速效氮与速效磷等关键因子影响土壤酶活性。土壤速效氮、速效磷含量与酶活性均呈极显著正相关,与李茜等^[41]在高寒嵩草草地的研究结论一致,其研究明确指出了土壤酶活性与碱解氮、速效磷等养分存在极显著正相关关系,这共同表明在不同类型的草地生态系统中,速效氮与速效磷均是调控土壤酶活性的主要驱动因子。当土壤中速效磷充足时,微生物的磷限制得以缓解,使其能将更多资源与能量分配至氮转化过程,凸显了维持土壤磷库对促进氮磷循环耦合的重要性^[42]。Wang等^[43]在温带森林的长期研究发现,外源氮输入在提高土壤氮有效性的同时,显著降低了土壤有效磷含量,并改变了土壤磷酸酶活性,这标志着微生物为应对氮诱导的磷限制而做出的适应性调节。本研究在放牧生态系统中同样观察到类似响应,进一步验证了外源氮输入可能通过改变土壤氮磷化学计量平衡,引发或加剧微生物磷限制。这与全球尺度上人为氮沉降推动生态系统向磷限制转变的规律相符^[44],因此,维持土壤速效磷的充足供应,是避免出现氮诱导的磷限制、从而保障多种土壤养分转化酶活性协同维持的关键。综上,速效磷不仅是磷活性的指标,更是土壤氮循环潜力的关键启动因子^[45]。酶的本质是蛋白质^[46],其生物合成高度依赖于氮源^[47]与磷源^[48]。当土壤中速效氮、磷匮乏时,微生物的总体外酶活性可能受到抑制,这一现象符合生态酶化学计量学的理论框架:在氮或磷限制条件下,微生物会调整其资源分配策略,将更多的代谢资源投入合成获取限制性营养元素的酶,相对减少了为获取非限制性资源的酶所投入的代谢资源。同时,氮和磷作为限制性资源,其可利用性直接制约着微生物的生物量合成及其元素组成,进而限制了其整体代谢与酶生产能力,这反映了微生物在资源环境受限条件下的代谢权衡与分配优化策略^[49]。本研究聚焦于0~10 cm深度的土壤,未量化植物死根的贡献,为进一步揭示放牧管理下短花针茅荒漠草原土壤酶活性的时空动态规律及其驱动机制,并阐明土壤-植物系统(特别是植物死根)关键组分对酶活性的调控路径,未来的研究应纳入更深层土壤取样,同时结合植物死根进行综合研究。

4 结论

随着放牧强度的增加,短花针茅荒漠草原土壤

碳、氮、磷分解酶活性呈下降趋势,重度放牧下土壤酶活性最低。放牧主要通过降低土壤速效氮、速效磷含量抑制土壤酶活性。为了维持短花针茅荒漠草原土壤生物化学过程的可持续性,可通过采取降低载畜率与合理轮牧相结合的管理措施,以缓解因放牧导致的土壤养分衰减与酶活性下降,从而促进退化草地的生态恢复。

参考文献

- [1] 时蓉喜,王全成,刘宁,等. 长期排水降低若尔盖高寒泥炭地土壤酶活性[J]. 草地学报,2025,33(5):1398-1407
SHI R X, WANG Q C, LIU N, et al. Long-term drainage reduces soil enzyme activities in Alpine peatlands on the zoige plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5):1398-1407
- [2] 张欢欢,李林昊,陈德伟,等. 藏北不同类型高寒草地土壤酶活性及酶化学计量比特征[J]. 草地学报,2025,33(8):2482-2493
ZHANG H H, LI L H, CHEN D W, et al. Characteristics of soil enzyme activity and enzyme stoichiometric ratio in different types of Alpine grasslands in northern Xizang[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(8):2482-2493
- [3] 王艳,夏志强,吴璇,等. 复合土壤改良剂对稀土尾矿土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 江西农业大学学报,2025,47(1):255-266
WANG Y, XIA Z Q, WU X, et al. Effect of composite soil amendments on soil physicochemical properties and enzyme activities of rare earth tailings[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2025, 47(1):255-266
- [4] 司艳娥,如克艳木·买提司地克,艾克拜尔·伊拉洪,等. 生物有机肥对枸杞品质及土壤酶活性的影响[J]. 新疆农业科学,2025,62(2):350-360
SI Y E, RUKEYANMU M, AIKEBAIER Y, et al. Effects of bio-organic fertilizer on quality of *Lycium barbarum* L. and soil enzyme activity[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2025, 62(2):350-360
- [5] 赵帅,张静妮,赖欣,等. 放牧与围封对呼伦贝尔针茅草原土壤酶活性及理化性质的影响[J]. 中国草地学报,2011,33(1):71-76
ZHAO S, ZHANG J N, LAI X, et al. Effects of grazing and fencing on soil enzyme activity and soil physicochemical properties in *Stipa* steppe in Hulunbeier, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(1):71-76
- [6] NANNIPIERI P, TRASAR-CEPEDA C, DICK R P. Soil enzyme activity: a brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis[J]. Biology and Fertility of Soils, 2018, 54(1):11-19
- [7] MENCEL J, MOCEK-PLÓCINIAK A, KRYSZAK A. Soil microbial community and enzymatic activity of grasslands under different use practices: a review[J]. Agronomy, 2022, 12(5):1136
- [8] 徐嘉翔,王巧红,马铨,等. 高寒地区不同人工牧草种类对土壤酶活性及酶化学计量比的影响[J]. 水土保持研究,2025,32(1):73-81
XU J Y, WANG Q H, MA C, et al. Impact of different artificial grass species on soil enzyme activity and enzyme stoichiometry in Alpine regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1):73-81
- [9] 黄旭迪,刘甜,牛浩泽,等. 煤基分子筛改良盐碱农田土壤理化性质提升土壤酶活研究[J]. 应用化工,2025,54(1):131-136,146
HUANG X D, LIU T, NIU H Z, et al. Effect of coal-based molecular sieve on improving physical and chemical properties of saline farmland and enhancing soil enzyme activity[J]. Applied Chemical Industry, 2025, 54(1):131-136,146
- [10] REYNOLDS J F, SMITH D M S, LAMBIN E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development[J]. Science, 2007, 316(5826):847-851
- [11] WANG X D, YAN Y, CAO Y Z. Impact of historic grazing on steppe soils on the northern Tibetan Plateau[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1):173-183
- [12] ZHENG S X, REN H Y, LI W H, et al. Scale-dependent effects of grazing on plant C: N: P stoichiometry and linkages to ecosystem functioning in the Inner Mongolia grassland[J]. PLoS One, 2012, 7(12):e51750
- [13] TRAVERS S K, ELDRIDGE D J, VAL J, et al. Rabbits and livestock grazing alter the structure and composition of mid-storey plants in a wooded dryland[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 277:53-60
- [14] 白永飞,李德新,许志信,等. 牧压梯度对克氏针茅生长和繁殖的影响[J]. 生态学报,1999,19(4):479-484
BAI Y F, LI D X, XU Z X, et al. Growth and reproduction of *Stipa Krylovii* population on a grazing gradient[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(4):479-484
- [15] 王琪,郑佳华,张峰,等. 放牧强度对短花针茅荒漠草原植物种群生态位的影响[J]. 中国草地学报,2022,44(10):1-9
WANG Q, ZHENG J H, ZHANG F, et al. Effects of grazing intensity on the ecological niche of plant population in *Stipa breviflora* desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(10):1-9
- [16] 裴婧宏,李江文,韩国栋,等. 短花针茅荒漠草原植物功能性状对载畜率的响应[J]. 中国草地学报,2025,47(1):27-36
PEI J H, LI J W, HAN G D, et al. Response of plant functional traits to stocking rates in the *Stipa breviflora* desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(1):27-36
- [17] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature, 2009, 462(7274):795-798
- [18] BARDGETT R D, VAN DER PUTTEN W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. Nature, 2014, 515(7528):505-511
- [19] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, et al. Soil

- enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216-234
- [20] ZHANG F, BENNETT J A, ZHANG B, et al. Cessation of grazing stabilizes productivity through effects on species asynchrony and stability of shrub/semi-shrub plants in arid grasslands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 348: 108411
- [21] 春风, 张峰, 吴永胜, 等. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原生物多样性的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(3): 848-858
- CHUN F, ZHANG F, WU Y S, et al. Effects of different grazing intensities on biodiversity in the *Stipa breviflora* desert steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(3): 848-858
- [22] 张峰, 高峰, 孙嘉伟, 等. 不同载畜率对荒漠草原建群种短花针茅种群时空变异性的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(6): 1369-1374
- ZHANG F, GAO F, SUN J W, et al. Effects of different stocking rates on spatio-temporal variability of constructive species *Stipa breviflora* populations in the desert steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(6): 1369-1374
- [23] CHEN H, LI D J, XIAO K C, et al. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non-karst forests[J]. *Functional Ecology*, 2018, 32(5): 1400-1409
- [24] JING X, CHEN X, FANG J Y, et al. Soil microbial carbon and nutrient constraints are driven more by climate and soil physico-chemical properties than by nutrient addition in forest ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 141: 107657
- [25] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 80-85
- SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. *Soil physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 80-85
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-97
- BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 14-97
- [27] 赵敏, 赵坤, 王赞博, 等. 长期放牧干扰降低了短花针茅荒漠草原植物多样性[J]. *草业学报*, 2023, 32(9): 39-49
- ZHAO M, ZHAO K, WANG Y B, et al. Long-term grazing disturbance reduced plant diversity in *Stipa breviflora* desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(9): 39-49
- [28] 王梓晗, 吕世杰, 王忠武, 等. 放牧强度对优势种群重要值和物种多样性及其二者典型关系的影响[J]. *生态环境学报*, 2024, 33(6): 869-876
- WANG Z H, LÜ S J, WANG Z W, et al. Effects of grazing intensity on dominant population and species diversity and their typical relationships[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, 33(6): 869-876
- [29] 吴佳芯, 李邵宇, 韩国栋. 内蒙古短花针茅荒漠草原土壤碳氮磷获取酶活性及微生物熵[J]. *草业科学*, 2024, 41(10): 2240-2249
- WU J X, LI S Y, HAN G D. Study on soil carbon, nitrogen, phosphorus acquisition enzyme activity, and microbial entropy in *Stipa breviflora* desert grassland of Inner Mongolia [J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(10): 2240-2249
- [30] FONTAINE S, BAROT S, BARRÉ P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 277-280
- [31] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(11): 1252-1264
- [32] MA W J, LI J, GAO Y, et al. Responses of soil extracellular enzyme activities and microbial community properties to interaction between nitrogen addition and increased precipitation in a semi-arid grassland ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134691
- [33] 王梓晗, 吕世杰, 杨溢文, 等. 放牧强度对短花针茅荒漠草原优势种群和物种多样性的影响[J]. *草业科学*, 2025, 42(3): 591-600
- WANG Z H, LÜ S J, YANG Y W, et al. Effects of grazing intensity on dominant populations and species diversity in a *Stipa breviflora* desert steppe[J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(3): 591-600
- [34] ZHU A M, LIU H L, WANG Y H, et al. Grazing intensity changed the activities of nitrogen assimilation related enzymes in desert Steppe Plants [J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 436
- [35] FAN L L, LIANG Y Y, LI X F, et al. Grazing decreases soil aggregation and has different effects on soil organic carbon storage across different grassland types in northern Xinjiang, China [J]. *Land*, 2023, 12(8): 1575
- [36] 王艺颖, 陈新闯, 董智, 等. 希拉穆仁草原不同放牧强度对植被群落特征和土壤团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 121-129, 139
- WANG Y Y, CHEN X C, DONG Z, et al. Effects of different grazing intensities on vegetation community characteristics and soil aggregates in Xilamuren grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 121-129, 139
- [37] HARTMANN M, SIX J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(1): 4-18
- [38] GAO J J, CARMEL Y. Can the intermediate disturbance hypothesis explain grazing-diversity relations at a global scale?[J]. *Oikos*, 2020, 129(4): 493-502
- [39] 杨殿林, 韩国栋, 胡跃高, 等. 放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1470-1475
- YANG D L, HAN G D, HU Y G, et al. Effects of grazing intensity on plant diversity and aboveground biomass of *Stipa baicalensis* grassland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1470-1475
- [40] BAI Y F, HAN X G, WU J G, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland [J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184
- [41] 李茜, 孙亚男, 林丽, 等. 放牧高寒嵩草草地不同演替阶段土壤酶活性及养分演变特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2267-2274

- LI Q, SUN Y N, LIN L, et al. Changes of soil enzyme activities and nutrients across different succession stages of grazing Alpine *Kobresia* grassland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2267-2274
- [42] MOOSHAMMER M, WANEK W, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, et al. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5: 22
- [43] WANG S Q, SONG M H, WANG C M, et al. Mechanisms underlying soil microbial regulation of available phosphorus in a temperate forest exposed to long-term nitrogen addition[J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166403
- [44] DU E Z, TERRER C, PELLEGRINI A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. Nature Geoscience, 2020, 13(3): 221-226
- [45] CUI Y X, ZHANG Y L, DUAN C J, et al. Ecoenzymatic stoichiometry reveals microbial phosphorus limitation decreases the nitrogen cycling potential of soils in semi-arid agricultural ecosystems[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104463
- [46] SUMNER J B. The isolation and crystallization of the enzyme urease preliminary paper[J]. Journal of Biological Chemistry, 1926, 69(2): 435-441
- [47] JARAI G, BUXTON F. Nitrogen, carbon, and pH regulation of extracellular acidic proteases of *Aspergillus niger* [J]. Current Genetics, 1994, 26(3): 238-244
- [48] 朱虹颖, 靳振江, 张晓文, 等. 岩溶区与非岩溶区稻田土壤磷含量与碱性磷酸酶活性比较[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(5): 1083-1090
- ZHU H Y, JIN Z J, ZHANG X W, et al. Comparison of soil phosphorus content and alkaline phosphatase activity in paddy fields in karst and non-karst areas[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(5): 1083-1090
- [49] CUI Y X, MOORHEAD D L, PENG S S, et al. New insights into the patterns of ecoenzymatic stoichiometry in soil and sediment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 177: 108910

(责任编辑 刘婷婷)