

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.026

引用格式:尹子鸣,强成斌,安可,等.马鹿放牧对宁夏长期封育草地多功能性的影响[J].草地学报,2026,34(4):1443–1457
YIN Zi-ming, QIANG Cheng-bin, AN Ke, et al. Effects of *Cervus elaphus kansuensis* Grazing on the Multifunctionality of Long-Term Enclosed Grassland Ecosystems in Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1443–1457

马鹿放牧对宁夏长期封育草地多功能性的影响

尹子鸣¹, 强成斌², 安可³, 张梦婕⁴, 田慧慧⁵, 王亦波⁵, 拓行行¹, 叶发明^{6,7},
马晓瑞¹, 杨庆^{6,7}, 韩新宁^{8*}, 李伟^{1*}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 汉中市南郑区水土保持工作站, 陕西 南郑 723100; 3. 定边县气象局, 陕西 定边 718600; 4. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 5. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 6. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 7. 中国科学院大学, 北京 100049; 8. 宁夏师范大学资源环境与生命科学学院, 宁夏 固原 756000)

摘要:探究放牧对长期封育草地生态系统多功能性(Ecosystem multifunctionality, EMF)的影响,对于草地可持续管理具有重要意义。本研究在宁夏云雾山长期封育草地开展为期4年的甘肃马鹿(*Cervus elaphus kansuensis*)不同放牧强度(对照、轻度、中度、重度)试验,通过测定植物性状、物种多样性、功能多样性以及11个草地功能指标,利用相关性分析、线性回归、随机森林模型等方法,探究不同放牧强度对长期封育草地生态系统多功能性的影响。结果表明:与重度放牧相比,适度放牧(即轻度和中度放牧)显著提高禾草与豆科植物的覆盖度和密度;适度放牧显著提升叶片氮含量、Shannon-Wiener指数、物种丰富度、Pielou均匀度、功能离散度、土壤全磷含量及EMF;群落盖度、密度、叶片碳氮含量及多项多样性指数与EMF呈显著正相关;放牧强度、群落结构特征、叶片功能性状及物种多样性指数是EMF的重要预测因子。综上,适度放牧通过改善群落结构、优化叶片功能性状以及促进群落物种多样性,从而显著增强了长期封育草地的生态系统多功能性。

关键词:放牧;长期封育草地;草地植物群落结构;草地植物群落多样性;生态系统多功能性

中图分类号:S812;Q948

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1443-15

Effects of *Cervus elaphus Kansuensis* Grazing on the Multifunctionality of Long-Term Enclosed Grassland Ecosystems in Ningxia

YIN Zi-ming¹, QIANG Cheng-bin², AN Ke³, ZHANG Meng-jie⁴, TIAN Hui-hui⁵, WANG Yi-bo⁵,
TUO Hang-hang¹, YE Fa-ming^{6,7}, MA Xiao-rui¹, YANG Qing^{6,7}, HAN Xin-ning^{8*}, LI Wei^{1*}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 2. Hanzhong City Nanzheng District Soil and Water Conservation Station, Nanzheng, Shaanxi Province 723100, China; 3. Dingbian Meteorological Bureau, Dingbian, Shaanxi Province 718600, China; 4. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia Province 750021, China; 5. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 6. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 7. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 8. College of Resources, Environment and Life Sciences, Ningxia Normal University, Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: Exploring the effects of grazing on ecosystem multifunctionality (EMF) in long-term enclosed grasslands is of great significance for sustainable grassland management. A 4-year grazing experiment with four intensities (control, light, moderate, and heavy) using *Cervus elaphus kansuensis* was conducted in the long-term enclosed grasslands of Yunwushan, Ningxia. Plant traits, species diversity, functional diversity and 11 grass-

收稿日期:2025-08-11;修回日期:2025-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(42277464);国家重点研发计划项目(2022YFF1302800);榆林市科技计划项目(2025-CSY-045);宁夏自然科学基金(2025AAC030610)资助

作者简介:尹子鸣(2001-),男,汉族,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事草地生态学研究,E-mail:18009123018@nwfau.edu.cn;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: hanxinning@163.com; liwei2013@nwsuaf.edu.cn

land functional indicators were measured, and correlation analysis, linear regression and random forest models were employed to investigate the impacts of grazing intensity on grassland EMF. Results showed that compared with heavy grazing, moderate grazing (light and moderate intensities) significantly increased the coverage and density of gramineous and leguminous plants, as well as leaf nitrogen content, Shannon-Wiener index, species richness, Pielou evenness index, functional divergence index, soil total phosphorus content and EMF. Correlation analysis indicated significant positive correlations between EMF and community coverage, density, leaf carbon and nitrogen contents, and multiple diversity indices. Grazing intensity, community structural characteristics, leaf functional traits and species diversity indices were confirmed as important predictors of EMF. In conclusion, EMF in long-term enclosed grasslands is significantly enhanced by moderate grazing through the improvement of community structure, optimization of leaf functional traits and promotion of community species diversity.

Key words: Grazing; Long-term enclosed grassland; Grassland plant community structure; Grassland plant community diversity; Ecosystem multifunctionality

草地作为我国干旱半干旱区重要的绿色生态屏障和畜牧业生产基地,对维护生态平衡和推动草地畜牧业发展意义重大^[1-2]。围栏封育作为保护草地生态、促进植被恢复的关键措施,在黄土高原得到了广泛应用,使退化植被和土壤得到了显著改善^[3-4]。但也有研究表明,长期封育后(超过15年),草地植物的物种多样性减少,群落结构趋于单一^[5-6],生态系统多功能性显著降低^[6]。同时,长期封育也造成牧草资源的大量浪费,并对牧草品质产生消极影响,长期围栏封育对草地的负面效应逐渐显现^[7-8]。放牧是草地传统的利用方式之一^[9],合理的放牧强度对草地植物群落结构、生物多样性、土壤养分循环、植被生产力以及生态系统平衡等方面均具有促进作用^[10-11]。因此,探究合理的放牧强度对长期封育草地地上、地下生态功能及生态系统多功能性的影响及机制,对充分发挥草地生态服务功能与保障草地畜牧业可持续发展具有重要作用。

已有研究表明,适度放牧主要通过家畜选择性采食改变植物种间竞争关系,进而促进草地群落结构和多样性的维持^[12]。但随着放牧强度的增加,植物群落中的优势种群逐渐减少,同时被一些杂类草或有毒植物取代^[13-14],且放牧对物种多样性的影响主要表现为增加^[15]、降低^[16]和无显著变化^[17]的趋势。土壤是草地生态系统的基础,其不仅为草地提供生长必要的条件,而且还是草地生态系统中生物、非生物之间养分循环和相互作用的重要场所,在一定程度上影响着整个草地生态系统的演替过程。放牧也会改变土壤理化特性^[18-19],主要体现在土壤容重增加、孔隙度减小等方面,进而改变土壤的通气性和透水性^[20]。重度放牧能显著增加土壤容重和渗透阻力,降低土壤有机碳、总氮、硝态氮和微生物生物量碳等养分的积累^[21]。同时,土壤理化

特性与群落结构和多样性之间存在一定的耦合关系^[22-23]。因此,土壤的退化会进一步加剧了草地生物多样性的降低和群落结构的恶化。

以往生物多样性-生态系统功能(Biodiversity-ecosystem functioning, BEF)研究存在显著局限:相关研究多聚焦生物多样性对单一生态过程的作用,即便测定多项生态系统功能,也常对各功能进行独立分析,却忽视了多功能权衡与冗余对环境的极强依赖性;而这一疏漏会致使研究存在认知偏差,即使生态系统的生物多样性未发生变化,其在不同环境条件或发育阶段呈现的功能差异,仍会影响人们对生物多样性与生态系统功能间关系的准确认知^[24-25]。有学者发现,维持生态系统多功能性比维持单个生态系统功能需要更多的物种^[26]。目前关于生态系统多功能性的研究仍相对缺乏,尤其对于放牧如何影响长期封育草地组成、结构和生态系统多功能性的研究更是稀少^[27]。为此,本研究旨在探究放牧如何影响长期封育草地地下、地上多种生态功能、多功能性及其潜在机制。具体拟解决以下问题:(1)放牧(对照、轻度放牧、中度放牧和重度放牧)对群落组成、多样性(物种多样性、功能多样性)、土壤特性以及生态系统多功能性的影响;(2)放牧条件下群落结构和多样性与生态系统多功能性的关系;(3)放牧条件下生态系统多功能性指数的预测因子。本研究可为黄土高原长期封育草地的生态保护、恢复和可持续管理策略的制定提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于西北农林科技大学宁夏云雾山草原

生态系统国家长期科研基地 (106°21′~106°27′E, 36°10′~36°17′N)。研究区域海拔 1800~2100 m, 属温带半干旱气候, 年均气温 7℃, 最热月为 7 月, 气温 22~25℃, 最冷月为 1 月, 平均最低气温 -14℃ 左右。年均无霜期 137 d, 年均降水量 445 mm。土壤类型以山地灰褐土为主, pH 值为 7.9~8.2。植被属暖温带典型草原, 植物建群种和优势种主要有长芒草 (*Stipa capillata*)、百里香 (*Thymus mongolicus*)、星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*)、白莲蒿 (*Artemisia dracunculus*)、甘青针茅 (*Stipa przewalskyi*) 等^[28]。

1.2 试验设计

马鹿是一种特殊的家畜, 具有耐粗牧、食性广、适应性和抗病性强等多种优点, 与传统的牛羊放牧相比, 马鹿被认为对草原生态系统的破坏较小, 更适合在干旱和半干旱生态系统中放牧^[29]。本研究选取甘肃马鹿作为放牧物种, 在围栏封育超过 38 年的天然草原上开展了为期四年的放牧试验。

通过实地调查放牧区(表 1), 基于当地牧场的生产力评估以及历史放牧实践^[30], 最终以马鹿采食地与圈舍之间的远近来划分不同放牧强度区域: 距离圈舍 1500 m 以外为封育未放牧的对照区(NG, 0 只羊·hm⁻¹), 距离圈舍 1000~1500 m 为轻度放牧区(LG, 2 只羊·hm⁻¹), 距离圈舍 500~1000 m 为中度放牧区(MG, 4 只羊·hm⁻¹), 距离圈舍 500 m 以内为重度放牧区(HG, 8 只羊·hm⁻¹)。在 4 种放牧区内, 随机选取 3 块 20 m×20 m 的样地, 用作植被调查及土壤取样, 且每块样地相距 50 m 以上。

每年的 5 月 1 日至 9 月 30 日被设定为放牧期, 在此期间内马鹿可以进入指定的样地进行放牧活动; 而每年的 10 月 1 日至次年的 4 月 30 日则被设定为围封休养期, 在此期间样地禁止马鹿进入放牧, 以确保草原植被得到充分的休养生息。在放牧期间, 马鹿在每天上午 8:00 至下午 6:00 在实验地块内自由活动与采食。

1.3 试验方法

本试验执行期为 2020 年 8 月—2023 年 8 月。于 2023 年 8 月植被生长旺盛时, 在每个样地中随机设置 5 个 1 m×1 m 的样方, 共 60 个样方进行植被调查, 测量和记录每个物种的盖度、高度和多度, 样方内的全部物种数量为群落密度。将样方内的植物按种分类, 齐地面剪下地上部分, 装入信封袋并标

表 1 放牧强度分区

Table 1 Zoning of grazing intensity

放牧强度 Grazing intensity	实地考察; 马鹿粪便分布; 采食路径	
封育对照 No grazing		
轻度放牧 Light grazing		
中度放牧 Moderate grazing		
重度放牧 Heavy grazing		

记, 带回实验室在 65℃ 烘干 48 h 至恒重。所有植物干重之和为群落地上生物量, 且根据物种的生长型和生活型特征, 分为禾草、杂草和豆科 3 个功能群。收集地上植物样本后, 使用直径为 7 cm 的根钻从 0~20 cm 的深度提取根样本。将这些根样品带到实验室, 用流水洗去根表面的碎屑, 然后将样品放入 65℃ 的烘箱中干燥, 直到达到恒定重量, 即为地下生物量。

本研究测定 6 个植物叶片功能性状, 即叶片碳含量(Leaf carbon content, LCC)、叶片氮含量(Leaf nitrogen content, LNC)、叶片磷含量(Leaf phosphorus content, LPC)、叶面积(Leaf area, LA)、比叶面积(Specific leaf area, SLA)和叶干物质含量(Leaf dry matter content, LDMC)。通过计算植物物种重要值(表 2), 选取 9 个物种测量植物功能性状, 包括赖草 (*Leymus secalinus*)、长芒草 (*Stipa capillata*)、甘青针茅 (*Stipa przewalskyi*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*)、白莲蒿 (*Artemisia sacrorum*)、白花草木樨 (*Melilotus albus*)、甘菊 (*Dendranthema lavandulifolium*)、飞廉 (*Carduus nutans*)、甘肃蒿 (*Artemisia gansuensis*), 且这些物种代表了植物群落 90% 以上的生物量。在每个重复小区, 每个物种选择 3~5 株健康植株, 每个植株采集 1~2 片成熟完整的叶片。

将相同处理的样本混合后立即转移到实验室测量叶面积。使用扫描仪和 Image J 软件测量叶面积。将收集的叶片置于装有去离子水的试管中浸泡,在 4℃ 黑暗中放置 24 h,称重后得到叶片鲜重,为测定叶片干重,将叶片装入信封,65℃ 烘干 48 h,然后称重。分别使用重铬酸盐氧化法、凯氏定氮法和钼酸铵比色法测定植物叶片的碳、氮和磷含量^[31]。

在每个重复小区用容积为 100 cm³ 的环刀按照土层深度 0~20 cm 采集 1 份原状土,装入已知质量的铝盒中,用于土壤容重测定。再用直径 5 cm 土钻取 3 份 0~20 cm 土层的土壤样品,混合为 1 份土壤样品,过 2 mm 土样筛,每份土壤样品分为两部

分:一份用于测定土壤含水量;另一份用于测定土壤化学性质。全氮(Total nitrogen, TN):全自动凯氏定氮仪(美国, Foss Kheltec 8400);铵态氮(Ammonium nitrogen, AN):氯化钾浸提酚蓝比色法;硝态氮(Nitrate nitrogen, NN):紫外分光光度法;全磷(Total phosphorus, TP):氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;速效磷(Available phosphorus, AP):碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;有机碳(Organic carbon, OC):重铬酸钾容量法-加热法;土壤 pH 值:电位法(水土质量比 5:1);含水量(Water content, WC):烘干称质量法;容重(Bulk density, BD):环刀法。

表 2 优势物种及其重要值

Table 2 Dominant species and their important values

放牧强度 Grazing intensity	优势物种 Dominant species	重要值 Important values
无放牧 No grazing	白莲蒿(<i>Artemisia sacrorum</i>)	0.208
	甘青针茅(<i>Stipa przewalskyi</i>)	0.120
	甘菊(<i>Dendranthema lavandulifolium</i>)	0.100
轻度放牧 Light grazing	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	0.136
	长芒草(<i>Stipa capillata</i>)	0.099
	白莲蒿(<i>Artemisia sacrorum</i>)	0.096
中度放牧 Moderate grazing	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	0.105
	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	0.086
	白花草木樨(<i>Melilotus albus</i>)	0.075
	飞廉(<i>Carduus nutans</i>)	0.183
重度放牧 Heavy grazing	甘肃蒿(<i>Artemisia gansuensis</i>)	0.175
	白莲蒿(<i>Artemisia sacrorum</i>)	0.087

1.4 数据处理与分析

1.4.1 物种功能性状和物种多样性指数的计算 使用公式(1)和(2)分别计算比叶面积和叶干物质含量。用公式(3)计算群落水平功能性状即群落加权平均性状值(Community-weighted mean trait values, CWM)^[32]。物种丰富度指数(R)、Shannon-Wiener(H)指数和 Pielou 均匀度指数(P)采用公式(4)~(6)计算^[33]。

比叶面积=(叶片面积/叶片干重)×100% (1)

叶干物质含量=(叶片干重/叶片鲜重)×100% (2)

$$C = \sum_{i=1}^S p_i \times T_i \quad (3)$$

$$R = S \quad (4)$$

$$H = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (5)$$

$$P = \frac{H}{\ln R} \quad (6)$$

式中: C 是群落加权平均性状值; T_i 是物种 i 的性状值; p_i 是物种 i 的相对丰度; S 是物种的数量。

1.4.2 功能多样性指数的计算 使用对数函数对

测量的性状进行归一化,并用于计算表征功能多样性的三个常用指标:功能丰富度指数(R_{ic})、功能离散度指数(D)和功能均匀度指数(E),使用公式(7)~(12)计算^[34-35]:

$$R_{ic} = \frac{S_{ci}}{R_c} \quad (7)$$

$$g = \frac{\sum p_i x_{ik}}{\sum p_i} \quad (8)$$

$$D = \sum_{i=1}^S p_i z_i \quad (9)$$

$$E_{bl} = \frac{d_{ij}}{p_i + p_j} \quad (10)$$

$$P_i = \frac{E_{bl}}{\sum_{i=1}^{S-1} E_{bl}} \quad (11)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} \min \left(P_i \times \frac{1}{S-1} \right) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}} \quad (12)$$

式中: S_{ci} 为群落 i 内物种所占据的生态位空间; R_c 为性状 c 的绝对值范围; g 为加权重心; p_i 是物种 i

的相对丰度; x_{ik} 为物种*i*性状*k*的值; S 是物种的数量; z_i 为物种*i*到*g*的加权距离; bl 为分支; E_{bl} 为加权平均的均匀度; p_j 为物种*j*的相对多度; d_{ij} 为物种*i*与物种*j*间的欧式距离; P_i 为局部加权平均的均匀度。

1.4.3 草地生态系统多功能性量化指标与计算
当前生态系统多功能性的指标量化尚未形成统一标准,不同学者选取的指标不尽相同,且多聚焦于土壤与植被相关指标,根本原因在于土壤-植被系统存在相互依赖与反馈关系(表3)。因此,基于生物、非生物多指标量化生态系统多功能性更具优势。此外,既往研究多集中于地上或地下单一维度指标,当前研究应整合地上-地下多种生态功能去量化生态系统功能,在草地生态系统多功能性评估中,需通过地上、地下多功能综合表征实现科学评估。

因此,在本研究中我们选择11个生态系统功能,即地上生物量、地下生物量、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷、土壤硝态氮、土壤铵态氮、土壤有效磷、土壤容重、土壤含水量和土壤pH值,使用公式(13)~(14)计算生态系统多功能性(Ecosystem multifunctionality, EMF)(F)^[36-37]。

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (13)$$

$$F = \frac{\sum Z_{ij}}{n} \quad (14)$$

式中: Z_{ij} 为*i*个样方内*j*功能的生态系统功能指标的*Z*得分; x_{ij} 为第*i*个样方内*j*功能指标的实际测定值; μ_j 为第*j*功能指标在所有样方内的平均值; σ_j 为第*j*功能指标在全部样方内的标准差; n 是所选生态系统函数的数量。

表 3 量化生态系统多功能的选取

Table 3 The quantitative indicators about the researches of multifunctionality

多功能性评价选用的功能指标 Functional indicators for functional evaluation	作者(年)—期刊 Author(year)—Journal
植物群落功能(地上和地下生物量、物种丰富度、功能群均匀度、盖度和群落生物量稳定性)和土壤养分资源(含水率、总碳、总氮和碳氮比) ^[38]	Lan et al. (2022)—Plant and Soil
地上生产力、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷、速效磷、速效氮、碳氮比、氮磷比 ^[39]	Yan et al. (2020)—Science of the Total Environment
植物物种丰富度、地下物种丰富度、土壤pH、土壤湿度 ^[40]	Jing et al. (2015)—Nature Communications
地上生物量、地下生物量、纤维素分解、木质素分解、光透性、土壤氮和植物氮 ^[41]	Byrnes et al. (2014)—Methods in Ecology and Evolution
碳(有机碳、B-葡萄糖苷酶、戊糖、己糖、芳香族化合物和酚)、氮(总氮、NO ₃ ⁻ -N、NH ₄ ⁺ -N、氨基酸、蛋白质和潜在氮转化率)和磷(有效无机磷和磷酸酶) ^[37]	Maestre et al. (2012)—Science
土壤总碳、植物总氮、地下生物量、地上净初级生产力、土壤氮含量、土壤昆虫的丰富度和多度 ^[42]	Zavaleta et al. (2010)—PNAS
地上生物量、地下生物量、土壤有效氮、植物氮、光合速率、木质素的分解、纤维素的分解 ^[26]	Hector and Bagchi—(2007) Nature

1.4.4 数据分析 使用Origin 2025和SPSS 27将已整理好的数据分别进行正态性检验和方差齐性检验。分析评估群落结构、群落多样性、土壤理化特性、草原生物量以及生态系统多功能性在不同放牧强度下的显著差异,并利用LSD检验来分析其差异显著性($P<0.05$)。利用线性回归模型研究了群落结构和群落多样性与生态系统多功能性之间的关系。使用“Random Forest”包进行随机森林模型的分析来确定生态系统多功能性的主要显著性预测因子。本文数据分析和绘图在SPSS 27, Origin 2025和R 4.3.1中进行。

2 结果与分析

2.1 放牧对长期封育草地群落结构的影响

2.1.1 放牧对长期封育草地植物群落和功能群覆盖度、高度和密度的影响 随着放牧强度的增加,

植物群落的总体覆盖度呈现显著下降的趋势,但LG和MG条件下的总体覆盖度之间并无显著变化;禾草覆盖度在NG、LG和MG条件下无显著差异,但在HG条件下显著降低;豆科覆盖度对比NG条件,在LG和MG条件下显著增加,但HG条件下显著降低;杂草覆盖度随着放牧强度的增加显著下降,在MG条件达到最低值,但在HG条件下显著增大(图1A)。植物群落总体高度和禾草高度随着放牧强度的增加呈显著下降趋势,豆科高度在LG和MG条件下显著增加,在MG条件下达到最高值,HG条件显著降低;杂草高度随着放牧强度的增加呈现U型曲线,在MG条件下处于最低值(图1B)。植物群落总密度、禾草密度和豆科密度随放牧强度的变化呈单峰曲线,均在MG条件下达到最高值,且均在HG条件下显著降低,而杂草密度只有在MG条件下显著降低(图1C)。

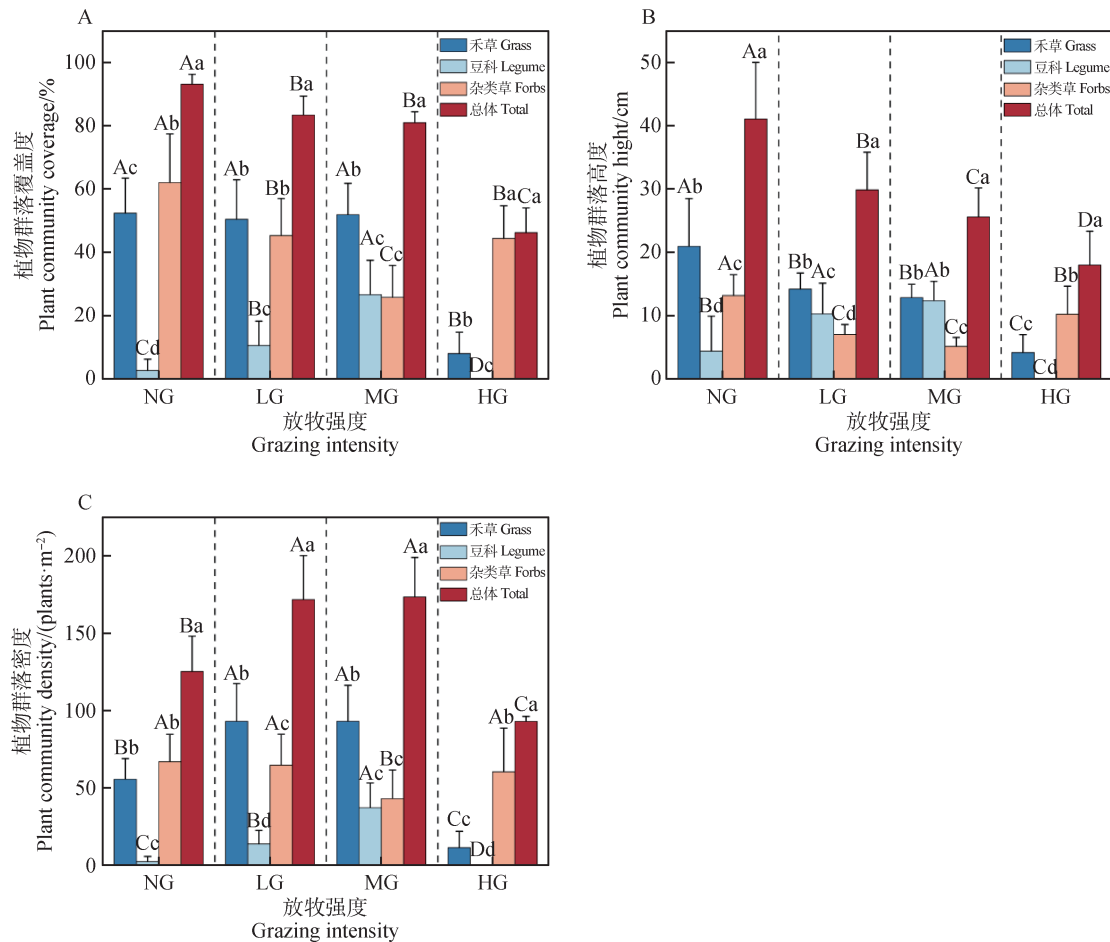


图1 不同放牧强度下植物群落和功能群盖度(A)、高度(B)和密度(C)的变化

Fig. 1 Changes of plant community coverage (A), height (B) and density (C) under different grazing intensities

注:大写字母表示同种植物类型不同放牧强度之间的显著性差异,小写字母表示不同植物类型同种放牧强度之间的显著性差异

Note: Uppercase letters indicate significant differences in grazing intensities between different plant types, and lowercase letters indicate significant differences in grazing intensities between different plant types and species

2.1.2 放牧对长期封育草地植物群落水平叶片功能性状的影响 叶片碳含量随着放牧强度的增加而显著下降(图2A)。在LG和MG下,叶片氮含量显著增加(图2B),随着放牧强度的增加,叶片磷含量显著上升(图2C)。叶片面积随着放牧强度的增加而显著下降,而在MG和HG条件下并无显著差异(图2D)。比叶面积和叶片干物质含量在LG条件下均显著降低(图2E-F)。

2.2 放牧对长期封育草地群落多样性的影响

与NG相比,LG和MG显著提高了Shannon-Wiener指数、物种丰富度指数和Pielou均匀度指数,而HG显著降低了Shannon-Wiener指数和物种丰富度指数,呈现出单峰趋势(图3A-C)。与NG和HG相比,MG显著提高了功能丰富度指数和功能离散度指数(图3D,F)。功能均匀度指数在不同

放牧强度下均变化不显著(图3E)。

2.3 放牧对长期封育草地生态系统不同功能以及多功能性的影响

土壤有机碳含量随放牧强度的增加而降低(图4A)。LG条件下,土壤全氮显著增加,在LG和MG条件下,全磷含量显著增加(图4B-C)。相比与NG,放牧会使土壤铵态氮和硝态氮显著增加(图4D-E)。在MG放牧条件下土壤速效磷含量显著提高(图4F)。随着放牧强度的增加,土壤含水量显著降低,土壤容重显著增加,但在LG和MG条件下土壤含水量无显著差异(图4G-H)。LG条件下,土壤pH值显著增加(图4I)。

草地生产力(地上生物量和地下生物量)随着放牧强度的增加而显著下降(图5A-B)。EMF在LG和MG条件下显著增加(图5C)。

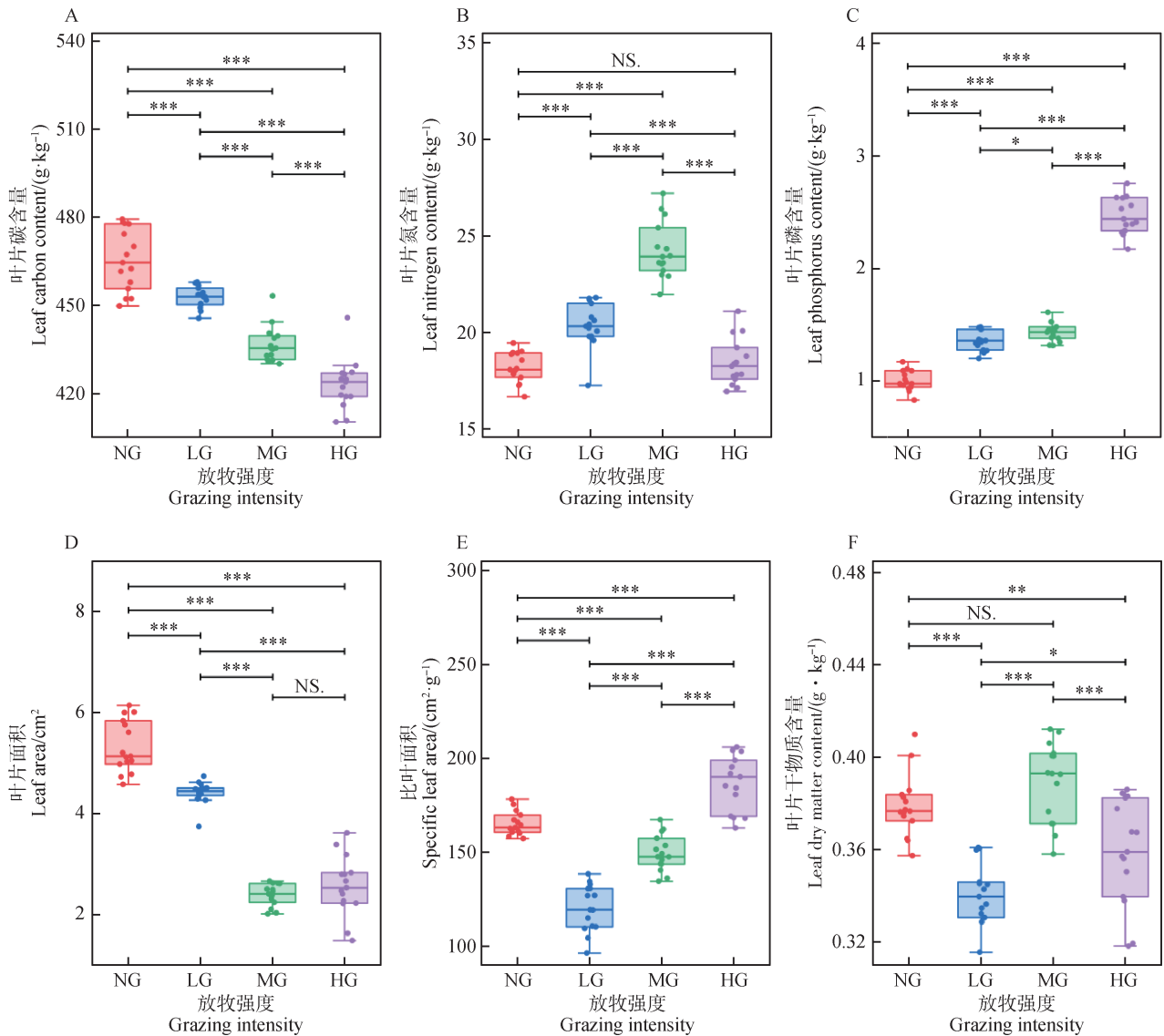


图2 不同放牧强度下叶片功能性状的变化

Fig. 2 Changes in leaf functional traits under different grazing intensities

注:*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$; NS., 不显著。下同

Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$; NS., Not significant. The same as below

2.4 放牧条件下植物群落特性与生态系统多功能性的关系

结果表明,植物群落覆盖度以及密度与EMF之间呈现出显著正相关($P < 0.001$,图6B-C)。叶片碳含量和氮含量也与EMF存在显著的正相关($P < 0.05$,图7A; $P < 0.001$,图7B),而叶片磷含量以及比叶面积则与EMF存在显著的负相关($P < 0.001$,图7C; $P < 0.001$,图7E)。群落多样性指标与EMF之间同样存在紧密的关联,具体表现为与Shannon-Wiener指数、物种丰富度指数、Pielou均匀度指数、功能丰富度指数以及功能离散度指数均呈现出显著的正相关关系($P < 0.001$,图8A-B、D; $P < 0.05$,

图8C; $P < 0.01$,图8F)。

2.5 放牧条件下生态系统多功能性的预测因子

利用随机森林模型深入探究生态系统多功能性的预测因子,该模型综合纳入了放牧强度、群落数量特征、群落植物叶片功能性状以及多样性指数等关键变量。结果显示:叶片氮含量、密度、比叶面积、放牧强度、盖度、叶片磷含量、Shannon-Wiener多样性指数、物种丰富度指数、叶片面积和叶片碳含量均为生态系统多功能指数的显著性预测因子。

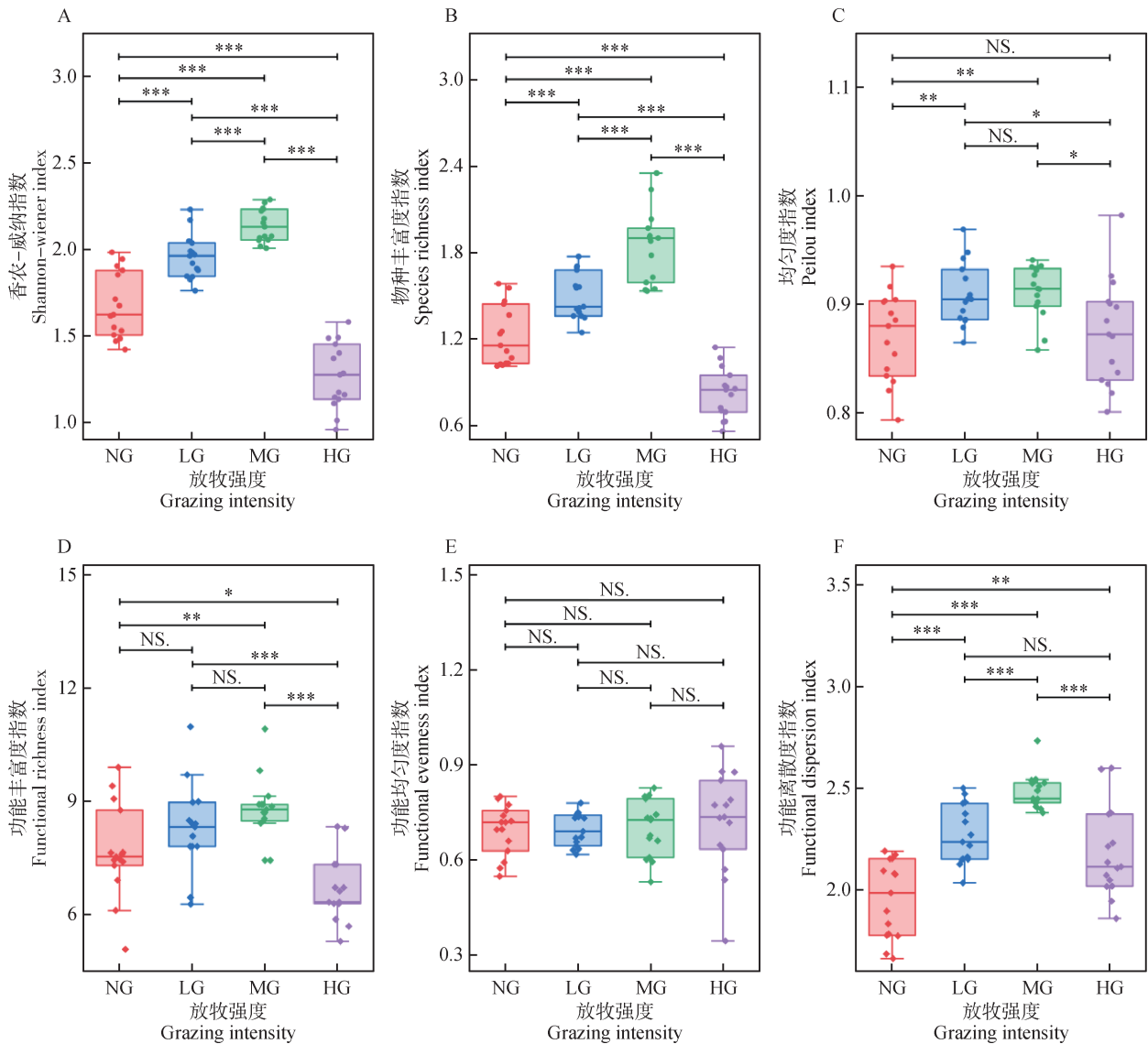


图 3 不同放牧强度下群落多样性的变化

Fig. 3 Changes in community diversity under different grazing intensities

3 讨论

3.1 放牧对长期封育草地的群落结构和群落多样性的影响

封育措施是恢复退化草地最简单、最经济的方式,但不同的封育时间能显著改变草地群落组成、结构和功能。短期封育(小于15年)对于退化草地而言,能带来显著的生态效益。例如,在中度退化的草原上,经过7年的封育,其植被恢复效果要优于放牧状态^[43],11~13年的封育则有利于植被和土壤养分的恢复^[44]。然而,长期封育(超过15年)却会因竞争加剧以及地表凋落物的积累,致使群落物种多样性降低,甚至可能出现植被和土壤养分的再次退化^[45]。放牧管理对放牧区群落的多样性和结构具有重要影

响^[46]。本研究也发现,在长期封育草地适度放牧(即轻度和中度放牧)显著优化了群落结构(群落组成以及叶片功能性状),符合放牧优化假说^[47]。同时,本研究还发现在长期封育草地适度放牧,能显著提升物种多样性和功能多样性,而重度放牧则对长期封育草地产生了诸多负面效应。与有学者提出的适度放牧有助于提升群落多样性,过度放牧则会引发草地退化的观点相吻合^[48]。这些结果可能与动物的践踏和觅食行为有关,其通过改变草地群落结构,削弱优势物种,促进多样性的维持。适度放牧时,这些行为还能加速养分循环,促进植物生长;但过度放牧会导致植被破坏,降低生物多样性,阻碍营养物质矿化,加速草原退化^[49-50]。而且,适度放牧能够增强养分循环,刺激植物的补偿性生长^[51]。同时本研究发

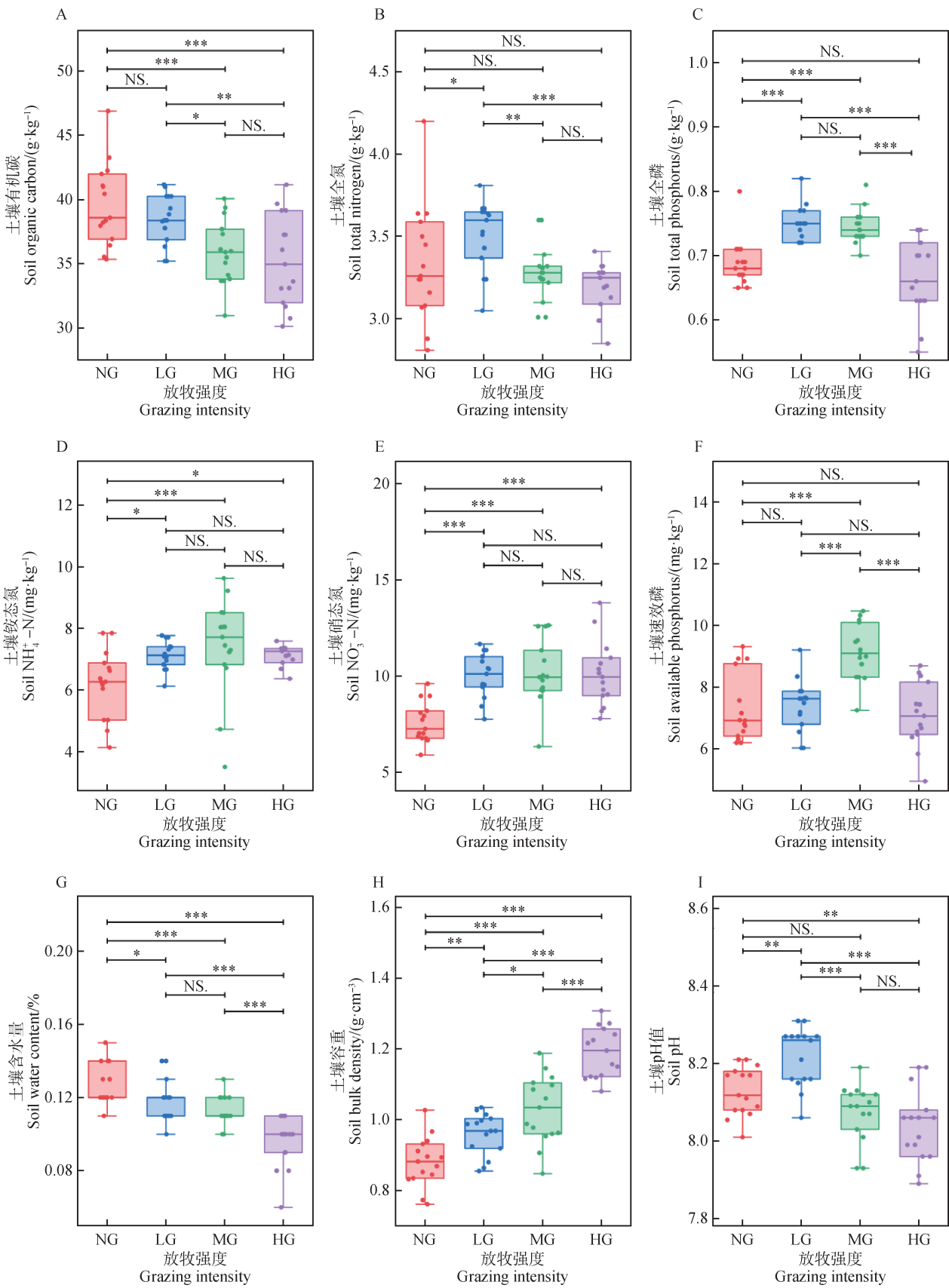


图 4 不同放牧强度下生态系统功能的变化

Fig. 4 Changes in ecosystem functioning under different grazing intensities

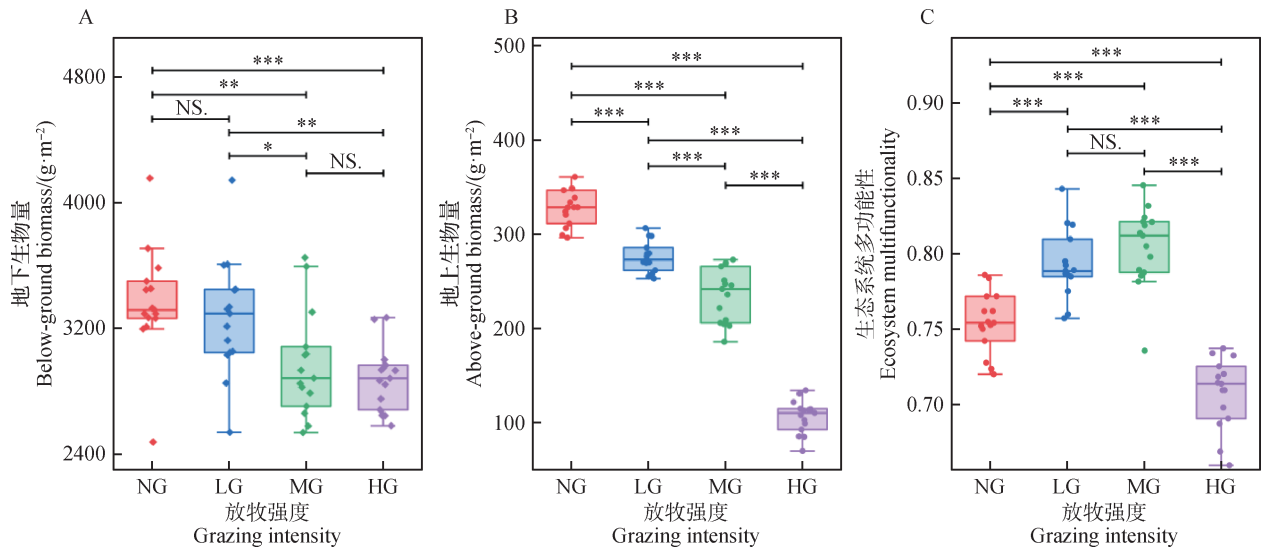


图 5 不同放牧强度下草地生物量和生态系统多功能性的变化

Fig. 5 Changes in grassland biomass and ecosystem multifunctionality under different grazing intensities

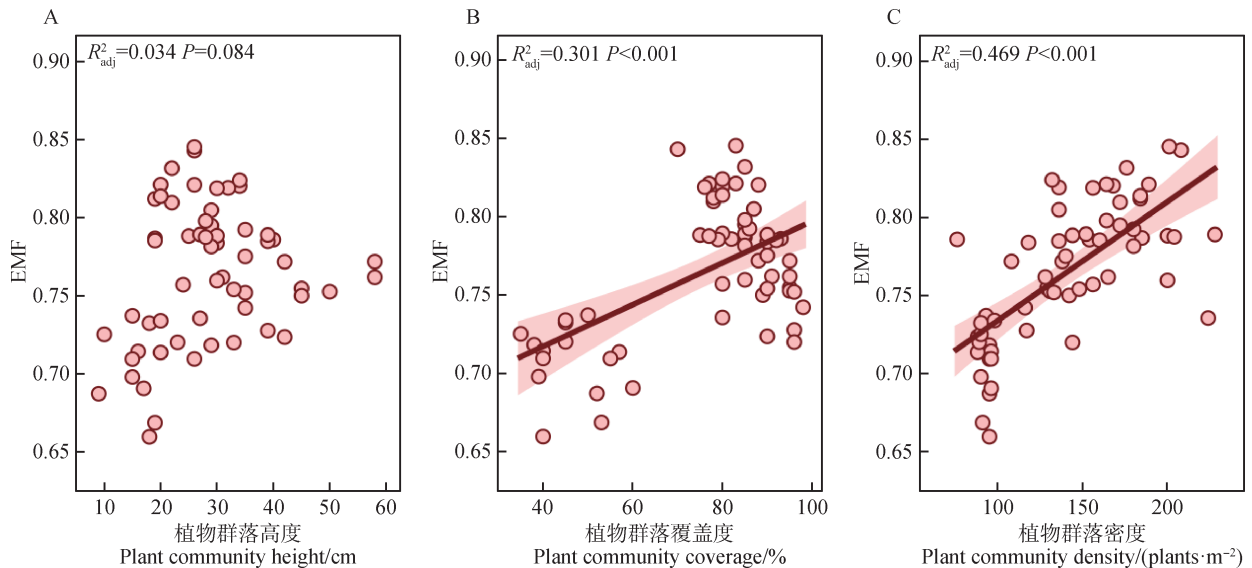


图 6 植物群落数量特征与 EMF 的关系

Fig. 6 Relationship between community quantitative traits and EMF

现沿放牧梯度,群落多样性除功能均匀度外均表现为单峰曲线,且适度放牧下多样性达到最高值,这与中度干扰假说相契合^[52]。因此,对于长期封育草地,适度放牧是维持群落结构和多样性的最佳选择。

3.2 放牧通过调控群落结构和物种多样性改变生态系统多功能性

根据全球尺度 meta 分析成果,在长期封育草地的管理中采取合理的放牧措施对草地 EMF 的增强与维持具有关键作用^[53-54],轻度放牧处理是更好地保护生物多样性及维持草地 EMF 的可行策略,并且优化放牧管理可以通过维持草原植物多样性和

优势来增强多种生态系统服务^[55-56]。本研究表明,相较于封育且未放牧的草地而言,适度放牧在提高 EMF 方面表现出较为显著的优势,而重度放牧的 EMF 则明显降低,说明在长期封育草地实施适度放牧有助于 EMF 的提升。

受放牧行为的影响,群落结构和物种多样性发生显著变化,适度放牧能改善群落结构和显著提高物种多样性^[57]。有研究表明 EMF 的变化与特定的植物功能性状(如叶片面积、叶片含水量和叶片含氮量等)相关,植物功能性状之间的协同作用和权衡直接影响了植物和土壤之间的相互作用,从而改变了 EMF 的整体动态和特征^[58],本研究通过线性回归分析

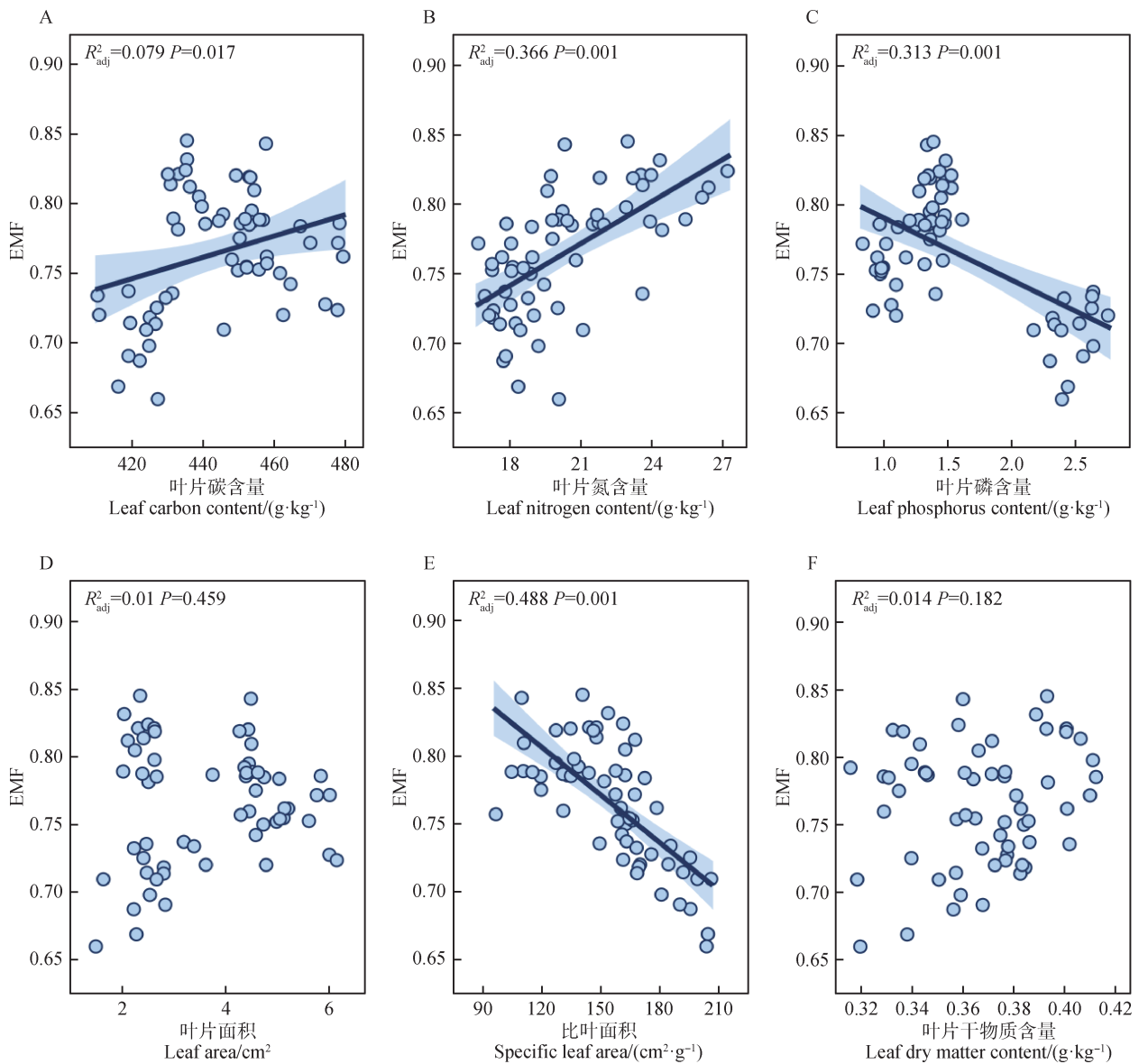


图7 叶片功能性状与EMF的关系

Fig. 7 Relationship between leaf functional traits and EMF

揭示了植物群落结构和多样性与EMF之间存在显著相关性,结果与之契合。许多学者也从不同维度群落多样性视角分析了多样性与EMF之间的关联,其中有研究表明群落物种多样性(物种丰富度、Shannon-Wiener指数等指标)对EMF起到关键作用,且群落物种多样性与EMF呈线性相关,且提高物种多样性能够显著提升EMF^[26],这也能佐证本研究中除功能离散度外,群落多样性与EMF呈显著的正相关关系的结果。究其原因,可能是放牧通过选择性采食使群落构建以随机过程为主,降低了种间竞争,促进了多物种的共存,提高了植物物种多样性。选择性采食还能使群落对践踏和排泄物返还引起的土壤性质变化不敏感,保持较高的多样性和随机的群落构建模式^[12]。

一些学者的研究也表明,物种多样性不仅直接促进了EMF,还可以通过增强其他营养级的多样性来促进EMF^[59]。物种多样性显著增强了EMF及其时间稳定性,并提高了群落对不同干扰事件的抵抗力,在维持EMF和稳定性方面具有重要作用^[60],而本研究的随机森林模型的预测结果也能证明群落结构(植物性状、密度和盖度)、物种多样性指数和物种丰富度指数是EMF重要影响因素。本研究发现,放牧对群落结构、物种多样性以及EMF有着显著影响,结合随机森林模型的预测结果,植物群落密度和盖度、叶片磷含量和Shannon-Wiener指数是EMF的非常显著的预测因子,说明放牧主要通过调控植物群落组成、结构,优化叶片功能性状进而改变EMF。

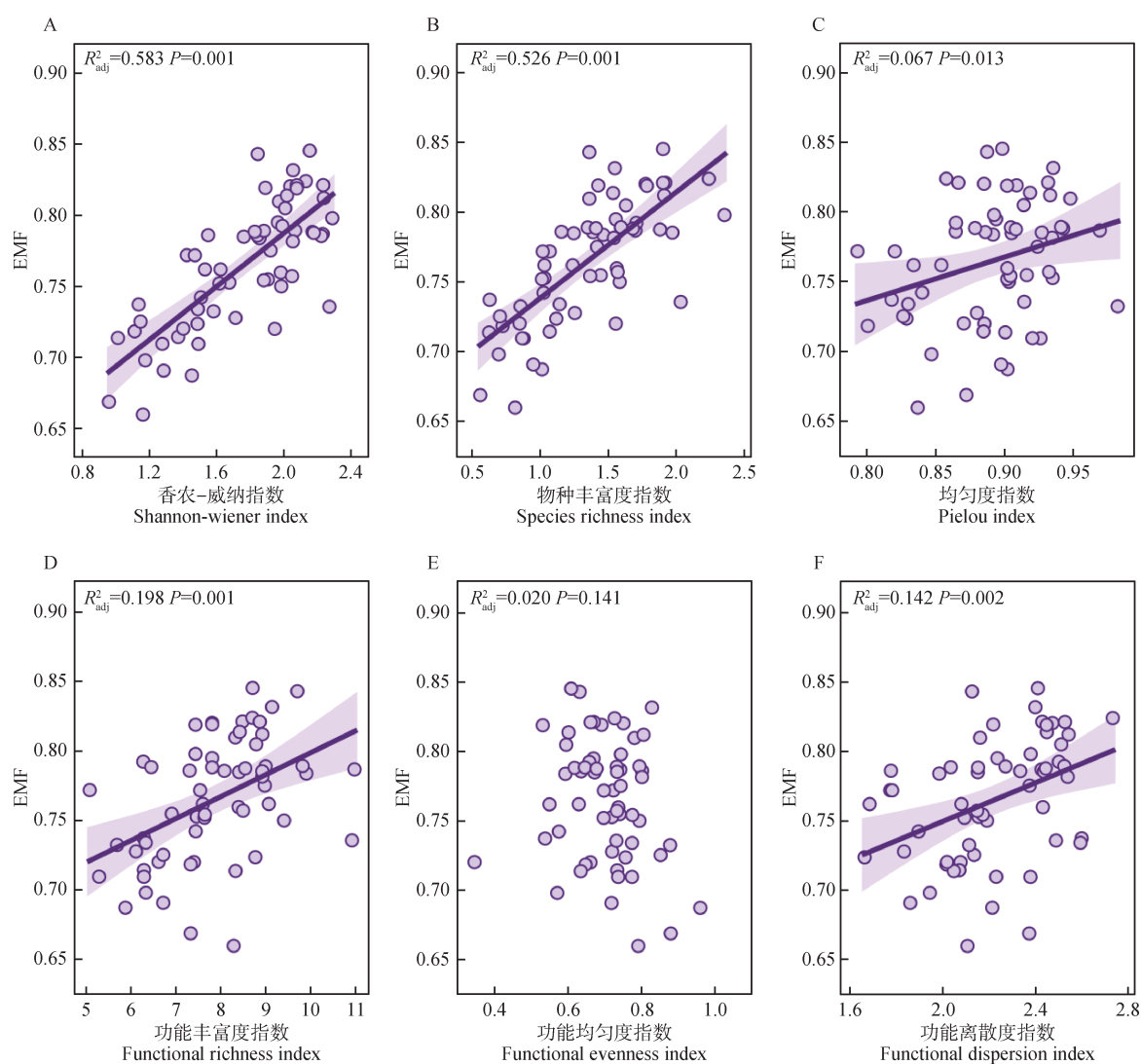


图 8 群落多样性与 EMF 关系

Fig. 8 Relationship between community diversity and EMF

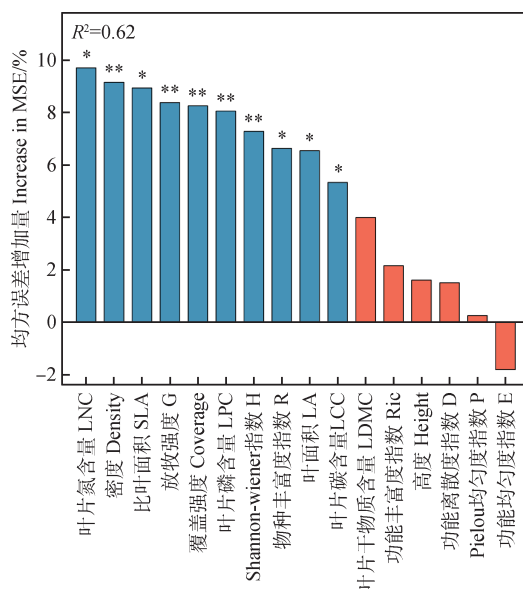


图 9 随机森林模型分析的 EMF 预测因子重要性排序

Fig. 9 Ranking of EMF predictor importance for random forest model analysis

4 结论

放牧能显著改变长期封育草地地下、地上生态功能及生态系统多功能性。适度放牧能促进植物-土壤养分循环,改善草地植物群落组成,显著增强植物叶片功能性状,提高草地植物物种多样性和功能性状多样性,进而提高 EMF。因此,为了维持长期封育草地较高的 EMF,并优化群落组成、结构和维持群落多样性,可以在长期封育草地进行夏秋轮封轮牧-冬春舍饲养殖,且放牧强度控制在 2~4 个羊单位。该研究为长期封育草地后续合理利用提供了直接的数据支撑和理论依据。

参考文献

- [1] 高英志,韩兴国,汪诗平. 放牧对草原土壤的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 790-797

- GAO Y Z, HAN X G, WANG S P. The effects of grazing on grassland soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (4): 790-797
- [2] 杜好田, 焦峰, 姚静, 等. 黄土丘陵区降水变化对退耕草地土壤水分特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 81-88
DU H T, JIAO F, YAO J, et al. Effects of precipitation changes on soil moisture characteristics of returning farmland in loess hilly region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5): 81-88
- [3] 平晓燕, 王铁梅, 董世魁. 我国草原分区-分类-分级生态修复模式研究[J]. *草地学报*, 2024, 32(1): 1-12
PING X Y, WANG T M, DONG S K. Study on the regional-classified-hierarchical ecological restoration model for grasslands in china[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 1-12
- [4] 彭镇华, 董林水, 张旭东, 等. 植被封禁保护是黄土高原植被恢复的重要措施[J]. *世界林业研究*, 2006(2): 61-67
PENG Z H, DONG L S, ZHANG X D, et al. Closing hillsides to facilitate afforestation: an important measure for the vegetation restoration of the loess plateau in china[J]. *World Forestry Research*, 2006(2): 61-67
- [5] JIN X, DENG A, FAN Y, et al. Diversity, functionality, and stability: shaping ecosystem multifunctionality in the successional sequences of alpine meadows and alpine steppes on the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1436439
- [6] 李振威, 缪雨珏, 宗宁. 围栏封育对藏北高寒草地植物多样性与生态系统多功能性的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(2): 596-608
LI Z W, MIAO Y J, ZONG N, et al. Effects of grazing exclusion on plant diversity and ecosystem multifunctionality of alpine grasslands in northern Xizang[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 596-608
- [7] CUEVAS J G, LEQUESNE C. Low vegetation recovery after short-term cattle exclusion on Robinson Crusoe Island [J]. *Plant Ecology*, 2006, 183(1): 105-124
- [8] 姚喜喜, 肖锋, 祁守忠, 等. 高寒草甸植被群落特征及其营养品质对围栏封育的响应[J]. *草地学报*, 2021, 29(Sup1): 208-217
YAO X X, XIAO F, QI S Z, et al. Responses of plant functional group traits and nutritional quality to fencing in an alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(Sup1): 208-217
- [9] 夏悦, 王国会, 沈禹颖, 等. 黄土高原草地植被的嬗变[J]. *草业科学*, 2021, 38(9): 1869-1881
XIA Y, WANG G H, SHEN Y Y, et al. The evolution of grassland vegetation on the Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(9): 1869-1881
- [10] 万里强, 陈玮玮, 李向林, 等. 放牧对草地土壤含水量与容重及地下生物量的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(26): 25-29
WAN L Q, CHEN W W, LI X L, et al. Effects of grazing on soil moisture, bulk and pasture underground biomass[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(26): 25-29
- [11] 拓行行. 马鹿放牧干扰下黄土高原典型草原生态系统多功能性评估[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024: 40-41
- TUO H H. Evaluation of multifunctionality of typical steppe under the disturbance of *Cervus elaphus kansuensis* grazing on the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024: 40-41
- [12] GUO T T, GUO M Q, PANG Y, et al. Ungulate herbivores promote beta diversity and drive stochastic plant community assembly by selective defoliation and trampling: From a four-year simulation experiment [J]. *Journal of Ecology*, 2024, 112 (9): 1992-2006
- [13] 仁青吉, 武高林, 任国华. 放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植物群落特征的影响[J]. *草业学报*, 2009, 18(5): 256-261
REN Q J, WU G L, REN G H. Effect of grazing intensity on characteristics of alpine meadow communities in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2009, 18(5): 256-261
- [14] 刘文亭, 卫智军, 吕世杰, 等. 荒漠草地植物多样性对草食动物采食的响应机制[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(6): 564-573
LIU W T, WEI Z J, LÜ S J, et al. Response mechanism of plant diversity to herbivore foraging in desert grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(6): 564-573
- [15] 王兴, 宋乃平, 杨新国, 等. 放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应[J]. *草业学报*, 2013, 22(5): 27-36
WANG X, SONG N P, YANG X G, et al. The response of grassland plant diversity to soil factors under grazing disturbance[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2013, 22(5): 27-36
- [16] 赵哈林, 大黑俊哉, 李玉霖, 等. 人类放牧活动与气候变化对科尔沁沙质草地植物多样性的影响[J]. *草业学报*, 2008(5): 1-8
ZHAO H L, OKURO T, LI Y L, et al. Effects of human activities and climate changes on plant diversity in Horqin sandy grassland, Inner Mongolia[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2008 (5): 1-8
- [17] 宋洁, 王凤歌, 温璐, 等. 放牧对温带典型草原植物物种多样性及土壤养分的影响[J]. *草地学报*, 2019, 27(6): 1694-1701
SONG J, WANG F G, WENG L, et al. Effects of grazing on plant diversity and soil nutrients in a typical temperate steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(6): 1694-1701
- [18] 戎郁萍, 周禾, 韩建国. 不同放牧强度对草地土壤化学性质的影响[C]//中国农学会(China Association of Agricultural Science Societies), 中国草原学会(Chinese Grassland Society). 21世纪草业科学展望——国际草业(草地)学术大会论文集. 北京: 中国农业大学草地研究所, 2001: 293-296
RONG Y P, ZHOU H, HAN J G. The effects of different grazing intensity on soil chemical properties [C] //China Association of Agricultural Science Societies, Chinese Grassland Society. Prospects for Grassland Science in the 21st Century-Proceedings of the International Grassland (Pasture) Conference. Beijing: China Agricultural university, 2001: 293-296
- [19] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 等. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J]. *中国草地*, 2001(4): 42-48
RONG Y P, HAN J G, WANG P, et al. The effects of grazing

- intensity on soil physics and chemical properties[J]. Grassland of China, 2001, (4): 42-48
- [20] 侯扶江, 任继周. 甘肃马鹿冬季放牧践踏作用及其对土壤理化性质影响的评价[J]. 生态学报, 2003, (3): 486-495
HOU F J, REN J Z. Evaluation on trampling of grazed Gansu wapiti (*Cervus elaphus kansuensis* Pocock) and its effects on soil property in winter grazing land[J]. Acta Ecologica sinica, 2003, (3): 486-495
- [21] LAI L M, KUMAR S. A global meta-analysis of livestock grazing impacts on soil properties[J]. Plos One, 2020, 15(8): e0236638
- [22] 刘淑琪, 崔东, 江智诚, 等. 短期氮、水添加和刘割减弱了苦豆子型退化草地土壤生物多样性与生态系统多功能性的联系[J]. 生物多样性, 2025, 33(3): 172-185
LIU S Q, CUI D, JIANG Z C, et al. Short-term nitrogen addition, watering, and mowing weakened the relationship between soil biodiversity and ecosystem multifunctionality in degraded *Sophora alopecuroides* grassland [J]. Biodiversity Science, 2025, 33(3): 172-185
- [23] GU H D, LIU Z, YAO Q, et al. Distinct effects of abundant and rare microbial communities on ecosystem multifunctionality across the soil profiles in agricultural Isohumosols [J]. Soil Ecology Letters, 2025, 7(2): 240289
- [24] GAMFELDT L, HILLEBRAND H, JONSSON P R. Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning[J]. Ecology, 2008, 89(5): 1223-1231
- [25] 张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系[J]. 生物多样性, 2018, 26(2): 111-129
ZHANG Z H, ZHOU H K, ZHAO X Q, et al. Relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Biodiversity Science, 2018, 26(2): 111-129
- [26] HECTOR A, BAGCHI R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. Nature, 2007, 448(7150): 188-190
- [27] 徐炜, 马志远, 井新, 等. 生物多样性与生态系统多功能性: 进展与展望[J]. 生物多样性, 2016, 24(1): 55-71
XU W, MA Z Y, JING X, et al. Biodiversity and ecosystem multifunctionality: advances and perspectives[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(1): 55-71
- [28] 拓行行, 黄建弟, 白玥, 等. 半灌木扩张草原生长季内土壤氮矿化特征及其影响因素[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2730-2739
TUO H H, HUANG J D, BAI Y, et al. Characteristics of soil nitrogen mineralization and its influencing factors before and after growing season in shrub expansion grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2730-2739
- [29] 侯扶江. 草地-马鹿系统的草地表现[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2000: 133-138
HOU F J. The performance of grassland in the grassland-wapiti system [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2000: 133-138
- [30] ZHANG Y W, PENG Z C, CHANG S H, et al. Growing season grazing promotes the shallow stratification of soil nutrients while non-growing season grazing sequesters the deep soil nutrients in a typical alpine meadow [J]. Geoderma, 2022, (426): 11611
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 8-49
BAO S D. Soil agricultural chemical analysis. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 8-49
- [32] GARNIER E, CORTEZ J, BILLÈS G, et al. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession[J]. Ecology, 2004, 85(9): 2630-2637
- [33] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995(3): 268-277
MA K P, HUANG J H, YU S L, et al. Plant community diversity in Dongling mountain, Beijing, china: II. Richness, evenness and species diversities [J]. Acta Ecologica sinica, 1995 (3): 268-277
- [34] MASON N W H, MOUILLOT D, LEE W G, et al. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity [J]. Oikos, 2005, 111(1): 112-118
- [35] PETCHEY O L, GASTON K J. Functional diversity (FD), species richness and community composition [J]. Ecology Letters, 2002, 5(3): 402-411
- [36] MAESTRE F T, CASTILLO-MONROY A P, BOWKER M A, et al. Species richness effects on ecosystem multifunctionality depend on evenness, composition and spatial pattern [J]. Journal of Ecology, 2012, 100(2): 317-330
- [37] MAESTRE F T, QUERO J L, GOTELLI N J, et al. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands [J]. Science, 2012, 335(6065): 214-218
- [38] LI L, ZHAO H X, ZHANG X M, et al. Different effects of grazing and nitrogen addition on ecosystem multifunctionality are driven by changes in plant resource stoichiometry in a typical steppe [J]. Plant and Soil, 2022, 481(1-2): 179-194
- [39] YAN Y Z, ZHANG Q, BUYANTUEV A, et al. Plant functional β diversity is an important mediator of effects of aridity on soil multifunctionality [J]. Science of the Total Environment, 2020, (726): 138529
- [40] JING X, SANDERS N J, SHI Y, et al. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate [J]. Nature Communications, 2015, (6): 8159
- [41] BYRNES J E K, GAMFELDT L, ISBELL F, et al. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2014, 5(2): 111-124
- [42] ZAVALETA E S, PASARI J R, HULVEY K B, et al. Sustaining multiple ecosystem functions in grassland communities requires higher biodiversity [J]. Proceedings of the National

- Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(4):1443-1446
- [43] ZHENG J H, ZHANG B, ZHANG F, et al. Effects of fencing on near-term ecosystem multifunctionality in a typical steppe in Inner Mongolia [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2023, (342):108238
- [44] LIU J K, BIAN Z, ZHANG K B, et al. Effects of different fencing regimes on community structure of degraded desert grasslands on Mu Us desert, China [J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(6):3367-3377
- [45] CHEN K Y, XING S, SHI H L, et al. Long-term fencing can't benefit plant and microbial network stability of alpine meadow and alpine steppe in Three-River-Source National Park [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, (902):166076
- [46] WANG X Y, LI F Y, WANG Y N, et al. High ecosystem multifunctionality under moderate grazing is associated with high plant but low bacterial diversity in a semi-arid steppe grassland [J]. *Plant and Soil*, 2020, 448(1-2):265-276
- [47] HAYASHI M, FUJITA N, YAMAUCHI A. Theory of grazing optimization in which herbivory improves photosynthetic ability [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2007, 248 (2): 367-376
- [48] ELDRIDGE D J, POORE A G B, RUIZ-COLMENERO M, et al. Ecosystem structure, function, and composition in rangelands are negatively affected by livestock grazing [J]. *Ecological Applications*, 2016, 26(4):1273-1283
- [49] ZHOU G Y, ZHOU X H, HE Y H, et al. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(3):1167-1179
- [50] 陈斌, 李海东, 曹学章. 青藏高原典型生态系统退化及植被恢复技术综述 [J]. *世界林业研究*, 2014, 27(5):18-23
- CHEN B, LI H D, CAO X Z. Advances in studies on degradation and re-vegetation of typical ecosystems on Tibetan Plateau, China [J]. *World Forestry Research*, 2014, 27(5):18-23
- [51] CARRERA A L, BERTILLER M B, LARREGUY C. Leaf litter fall, fine-root production, and decomposition in shrublands with different canopy structure induced by grazing in the Patagonian Monte, Argentina [J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(1-2):39-50
- [52] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs [J]. *Science*, 1978, 199(4335):1302-1310
- [53] SHU X Y, YE Q X, HUANG H, et al. Effects of grazing exclusion on soil microbial diversity and its functionality in grasslands: a meta-analysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, (15):1366821
- [54] YAO Z Y, SHI L N, HE Y C, et al. Grazing intensity, duration, and grassland type determine the relationship between soil microbial diversity and ecosystem multifunctionality in Chinese grasslands: A meta-analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2023, (154):110801
- [55] 江康威, 张青青, 王亚菲, 等. 天山北坡中段草地生态系统多功能性对放牧的响应 [J]. *生态学报*, 2024, 44(8):3440-3456
- JIANG K W, ZHANG Q Q, WANG Y F, et al. Response of grassland ecosystem multifunctionality to grazing in the middle part of the northern slope, Tianshan Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8):3440-3456
- [56] LIU N, GUO T T, ZHANG H, et al. Optimized grazing management enhances multiple ecosystem services by maintaining plant diversity and dominance in grasslands [J]. *One Earth*, 2025, 8(7):101319
- [57] 郭振宁, 孙世贤, 张焱, 等. 放牧干扰下荒漠草原植物功能群数量特征与输沙量的关系 [J]. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 29-39
- GUO Z N, SUN S X, ZHANG Y, et al. Relationship between plant functional group quantitative characteristics and sand transport in desert grasslands under grazing disturbance [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1):29-39
- [58] GAO Y, LIU J, WANG D J, et al. Synergy and trade-off between plant functional traits enhance grassland multifunctionality under grazing exclusion in a semi-arid region [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, (373):123877
- [59] LI Y, SCHULDT A, EBELING A, et al. Plant diversity enhances ecosystem multifunctionality via multitrophic diversity [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2024, 8(11):2037-2047
- [60] DIETRICH P, EBELING A, MEYER S T, et al. Plant diversity and community age stabilize ecosystem multifunctionality [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(3):e17225

(责任编辑 付 宸)