

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.018

引用格式:王钰杰, 窦梓懿, 方菊梅, 等. 不同伊犁马放牧强度对昭苏山地草甸草原承载力的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(6): 2147—2160

WANG Yu-jie, DOU Zi-yi, FANG Ju-mei, et al. Effects of Different Grazing Intensities of Yili Horses on the Carrying Capacity of Zhaosu Mountain Meadow Grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6): 2147—2160

不同伊犁马放牧强度对昭苏山地草甸草原承载力的影响

王钰杰^{1,2}, 窦梓懿^{1,2}, 方菊梅^{1,2}, 王玲玲^{1,2}, 郑伟^{1,2*}

(1. 新疆农业大学草业学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 新疆维吾尔自治区草地资源与生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:放牧是草地主要的利用方式,确定适宜的放牧强度对草地保护与畜牧业可持续发展至关重要。本研究于2023年暖季在昭苏县77团马场开展控制性放牧试验,设置无牧、轻度($1 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$)、重度($4 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$)和极度放牧($6 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$)4个处理,采用随机区组设计,通过监测植物群落结构、多样性、牧草现存量、营养品质,并计算消化能(Digestible energy, DE)与粗饲料分级指数(Grading index 2001, GI_{2001}),评估放牧强度对草场承载力的影响。结果表明:轻度放牧维持了较高的物种多样性,无牧区牧草营养品质最优。产量载畜量在重度放牧最高[$0.73 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (122\text{d})^{-1}$],粗蛋白产量载畜量在极度放牧较高[$0.99 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (122\text{d})^{-1}$],但均伴随莎草科植物衰退与杂类草激增,属于不可持续的短期现象。PLS-PM(Partial Least Squares Path Modeling)模型显示放牧强度对 GI_{2001} 和DE有直接负效应。综上,轻度放牧($1 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$)是昭苏山地草甸草原的适宜强度,可兼顾生态保护与伊犁马连续放牧需求。

关键词:放牧强度;山地草甸草原;牧草营养品质;牧草消化能;植被特征

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2147-14

Effects of Different Grazing Intensities of Yili Horses on the Carrying Capacity of Zhaosu Mountain Meadow Grassland

WANG Yu-jie^{1,2}, DOU Zi-yi^{1,2}, FANG Ju-mei^{1,2}, WANG Ling-ling^{1,2}, ZHENG Wei^{1,2*}

(1. College of Prataculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: Grazing is a primary utilization method of grasslands, and determining the appropriate grazing intensity is of crucial for grassland conservation and the sustainable development of animal husbandry. A controlled grazing experiment was conducted during the warm season of 2023 at the 77th Regiment Horse Farm in Zhaosu County, four treatments were set up: no grazing, light grazing ($1 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$), heavy grazing ($4 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$), and extreme grazing ($6 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$), and a randomized block design was adopted. The effects of grazing intensity on pasture carrying capacity were evaluated by monitoring plant community structure, diversity, standing biomass, forage nutritional quality, and by calculating digestible energy (DE) and the grading index 2001 (GI_{2001}). The results indicated that light grazing maintained relatively a high species diversity, while the no-grazing area exhibited the best forage nutritional quality. The biomass carrying capacity was the highest under heavy grazing [$0.73 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (122\text{d})^{-1}$], and the crude protein yield carrying capacity was relatively high under extreme grazing [$0.99 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (122\text{d})^{-1}$]. However, these conditions were accompanied by the decline of

收稿日期:2025-07-31;修回日期:2025-10-27

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发任务课题(2022B03030-2);国家重点研发专项(2022xjkk0404);国家重点研发专项(ALT-KJZC2019002)资助

作者简介:王钰杰(1998-),男,汉族,新疆塔城人,硕士研究生,主要从事草原学研究, E-mail:1363086075@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: zw065@126.com

sedges and a surge in forbs, representing an unsustainable short-term phenomenon. The PLS-PM (Partial Least Squares Path Modeling) model showed a direct negative effect of grazing intensity on GI_{2001} and DE. In conclusion, light grazing ($1 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$) is the suitable intensity for the Zhaosu mountain meadow steppe, effectively balancing ecological conservation and the needs for continuous grazing of Yili horses.

Key words: Grazing intensity; Mountain meadow grassland; Forage nutritional quality; Forage digestible energy; Vegetation characteristics

新疆维吾尔自治区伊犁州的昭苏县拥有优质刈牧兼用型草场,这些草场极具生态与经济价值。其中,山地草甸草原面积占昭苏草地总面积的19.69%,建群种主要包括无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss.)、苇状看麦娘(*Alopecurus ventricosus* Poir.)、羊茅(*Festuca ovina* L.)以及黄花苜蓿(*Medicago falcata* L.)等^[1]。这些优质牧草资源为伊犁马(*Equus caballus* var. *yiliensis*)提供了丰富的营养基础,使昭苏盆地成为伊犁马理想的生态牧场。伊犁马作为新疆地区优良的地方马种,具有适应性强、耐粗饲性以及抗病性等特征^[2]。据数据统计,昭苏县伊犁马存栏量约为12.15万匹,占新疆马匹存栏总量的11.57%,占伊犁哈萨克自治州马匹存栏量的34.71%^[3]。这构成了建设国家级马产业与生态畜牧业基地的核心资源基础。

近年来,过度放牧导致昭苏草原生态系统明显退化,具体表现为植被覆盖度下降、土壤侵蚀加重、毒害草滋生及草场载畜能力降低^[4-6],而这种退化又与放牧模式的转变密切相关。传统的季节性转场放牧(seasonal transhumance grazing)^[7]通过在不同季节草场间的轮换利用,为植被提供了长达数月的休养期,有效维持了草地的生态弹性^[8-9]。然而,随着草原生态旅游、马竞技赛事及马乳加工业的规模化发展,部分养殖主体为满足产业链延伸需求,舍弃传统转场方式,逐步转向固定区域的高强度连续放牧(continuous grazing)。这种连续放牧模式使得草地失去了关键的恢复窗口期,导致优质牧草(如无芒雀麦、苜蓿)无法完成光合产物积累与根系修复,从而出现持续性衰退^[10]。前人研究表明,在同等载畜率下,连续放牧区优质禾本科牧草相对盖度骤降至不足1%^[11],而毒害草(如狼毒 *Diarthron altaicum*)在连续放牧下凭借抗逆性占据生态位,其盖度随放牧强度加剧而显著上升^[12]。这种退化不仅削弱了草地生态系统的承载力,更威胁到伊犁马的健康生长和当地畜牧业的可持续发展。

昭苏地区山地草甸草原因其高初级生产力、优质牧草物种丰富度高及毗邻人口聚集区与旅游枢纽的区位特性,已成为伊犁马暖季(6—9月)连续放

牧的核心区域。伊犁马对牧草的能量密度、营养成分和植株高度有特殊需求^[6],偏好植株高大、营养丰富、能量价值高、粗蛋白含量高、粗纤维含量低且适口性好的牧草^[4],尤其是禾本科和豆科植物。然而,固定区域的连续放牧模式导致优质牧草减少,制约了当地马产业和畜牧业发展。放牧强度作为草场生产与生态功能的关键调控因子,显著影响草场的生产力、载畜能力、植被质量、物种多样性和生态系统稳定性等^[13-15]。不同放牧强度会显著改变牧草的营养品质,包括能量密度、粗蛋白和粗脂肪等关键指标^[16-17]。Dowler等研究表明,适度放牧有助于维持或提升群落物种多样性,但当放牧强度超过生态阈值时,植物群落的物种丰富度指数与多样性指数均呈现显著下降趋势^[5],导致草原生态系统的稳定性与生产力下降。Lithourgidis等研究表明,放牧强度梯度会显著影响牧草产量与营养品质^[4],适度放牧可提高草地群落粗蛋白含量并降低纤维素含量,从而优化牧草营养结构^[18],而过度放牧则导致牧草消化能下降^[19]、粗脂肪减少,同时中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维含量显著上升,最终削弱牧草营养供给能力与草场承载力。过度放牧还会导致高大优质牧草生物量显著降低,低矮植物竞争优势增强,侵占优质牧草生存空间,最终造成牧草总产量下降^[20]。这种影响在伊犁马牧区尤为突出,特别是在缺乏休整的连续放牧制度下,高强度放牧压力会降低优质禾本科与豆科牧草的重要值,并促进毒害草扩散^[21],形成“连续压力-植被退化-承载力下降”的正反馈循环,威胁草场生态稳定。因此,基于生态承载阈值的动态放牧调控策略,是实现伊犁马健康养殖与草场可持续管理的核心措施。

当前关于草食家畜放牧影响的研究,多聚焦于季节性轮牧系统^[22](Seasonal rotational grazing),主要沿4个维度展开:放牧强度对地上净初级生产力(Aboveground net primary production, ANPP)的调控机制^[23],植物群落结构(生活型组成、层片配置)的演替规律^[24],关键植物功能性状(比叶面积、株高可塑性)的响应特征和土壤养分库-群落生产力耦合关系(碳氮磷化学计量比)^[25]。针对特定草食家畜

连续放牧模式的可持续管理研究明显不足,尤其缺乏生态健康阈值与放牧强度优化模型的整合解析^[26]。因此,本研究以伊犁马连续放牧系统为对象,开展1个完整放牧季的控制性放牧试验,旨在系统解析不同放牧强度梯度下山地草甸草原的物种组成结构、多样性、牧草现存量及营养品质的响应规律;阐明单一草食家畜连续放牧对草场质量退化与综合承载力衰减的驱动机制;构建基于生态健康阈值的放牧强度优化模型。期望为连续放牧制度的可持续管理和后续长期定位观测研究提供参考依据,为昭苏国家级马产业与生态畜牧业示范基地建设提供“生态-经济”协同的科学范式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州昭苏县77团马场,地理坐标为43.08°N, 80.79°E,海拔约1800 m。该地区属于寒温带山区半干旱-半湿润冷凉气候,具有典型的寒温带半干旱气候特征。年均气温为4.1℃,2月平均气温最低,为-21.2℃,7月平均气温最高,为13.7℃。年降水量在475 mm至490.1 mm之间,主要集中在5月至10月,约占全年总降水量的74%。年蒸发量为1261.6 mm,约为降水量的2.5倍。无霜期较短,介于85 d至100 d之间。草地类型主要有温性草原、山地草甸草原、山地草甸、亚高山草甸和高寒草甸等^[27],利用方式以季节性轮牧为主,春秋放牧期为传统牧业活动的核心时段,主要畜种为马、牛、羊等,其中伊犁马是优良马种,数量众多。土壤为黑钙土,土壤有机质含量为13.63%~14.89%,全氮、全磷、全钾含量分别为9.53 g·kg⁻¹,12.16 g·kg⁻¹,2.20 g·kg⁻¹,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为459.20 mg·kg⁻¹,144.43 mg·kg⁻¹,473.58 mg·kg⁻¹^[28]。

1.2 试验设计

本研究选取昭苏县77团马场33匹健康伊犁马作为试验动物。在山地草甸草原试验区采用完全随机区组设计(图1),设置4种放牧强度处理:无牧(No grazing, NG)、轻度放牧(Light grazing, LG, 1 horse·hm⁻²)、重度放牧(Heavy grazing, HG, 4 horse·hm⁻²)和极度放牧(Extreme grazing, EG, 6 horse·hm⁻²),各处理设3次重复,共12个小区,每个

小区面积为1 hm²(100 m×100 m)。载畜率依据伊犁马日均干物质采食量与区域多年平均牧草产量计算确定^[15, 29-30]。选用体况相近孕前母马(初始体重约为450 kg),随机编制成组分配至各处理(区组内体重差异<5%)。于2023年6月1日起实施连续放牧,直至2023年9月30日结束(122 d)。每日08:00—21:00放牧期间提供自由饮水及矿质补充,归圈后限量补饲干草。试验全程执行动态调控:①每15 d空腹称重,个体体重>500 kg时进行替换,替换马匹均从同一备用马群中筛选,其初始体重[(450±15) kg]、年龄结构与试验马匹无显著差异;②放牧后期(8—9月)基于中期草产量动态监测数据进行核算,得出与轻度放牧区(LG)相比每匹马日均牧草采食缺口,对重度放牧区(HG)每匹马每天补饲4 kg青干草、极度放牧区(EG)每匹马每天补饲6 kg青干草,确保试验期间马匹体况健康且无显著减重。

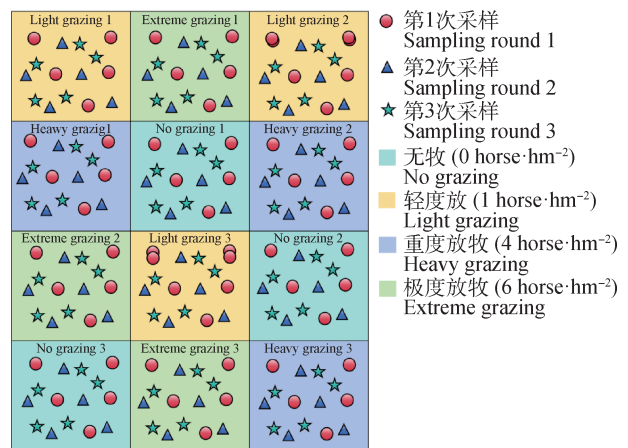


图1 实验区设置图

Fig. 1 Experimental area setting diagram

1.3 数据采集与各项指标测定

在放牧前期(2023年6月1日)、放牧中期(2023年8月1日)及放牧结束后(2023年10月1日)对4种处理(NG/LG/HG/EG)同步实施样地监测,每个处理小区按系统网格法布设5个1 m×1 m永久样方。测定:①群落结构指标,物种组成(记录样方内所有植物物种)、高度(采用直尺测量,对草本植物测量其自然站立高度)、盖度(采用目测法,估算每种植物冠层垂直投影面积占样方面积的百分比)、密度(采用计数法,统计样方内每个植物物种的个体数);②地上生物量(齐地面刈割,并清除粘附的泥土等杂质→电子天平称取鲜重→105℃杀青30 min→70℃烘至恒重→再次称取干重);③营养品质参数:将样品去除土壤等杂质,粉碎并过40目筛后,参

照以下国家标准方法进行分析:粗蛋白(Crude protein, CP)采用奈氏比色法(GB/T 609-2018);粗脂肪(Ether extract, EE)采用索氏提取法(GB/T 6433);中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)与酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)采用滤袋法(GB/T 20806-2006);粗灰分(Ash, A)采用550℃灰化法(GB/T 6438-2007)。

1.4 数据统计与分析

1.4.1 植物多样性 多样性指数及重要值计算公式^[20]

$$\text{重要值: } N_i = \left(\frac{RH + RC + RB + RD}{4} \right) \times 100\%$$

$$\text{丰富度指数: } R_0 = S$$

$$\text{Margalef丰富度指数: } M = (S - 1) / \ln N$$

$$\text{Shannon-Wiener多样性指数: } H = -\sum P_i \ln P_i$$

$$P_i = N_i / N$$

$$\text{Pielou均匀度指数: } J = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

$$\text{Simpson优势度指数: } D = 1 - \sum P_i^2$$

式中: RH 表示相对高度, RC 表示相对盖度, RB 表示相对生物量, RD 表示相对密度; R_0 表示物种丰富度指数, S 为样方内出现的植物物种数; M 表示Margalef物种丰富度指数; H 表示Shannon-Wiener多样性指数, D 表示Simpson优势度指数; J 表示Pielou均匀度指数; P_i 表示某个草地样地中第*i*个物种的相对重要值; N_i 表示该草地样地中的第*i*个物种的重要值; N 表示该草地类型中的所有物种重要值之和。

1.4.2 粗饲料分级指数 干物质采食量(Dry matter intake, DMI)参照Rohweder等^[31]的方法计算, 产奶净能(Net energy for lactation, NEL)参照Lithourgidis等^[4]的方法计算, 粗饲料分级指数(Grading index 2001, GI₂₀₀₁)参照文献^[32]的方法计算。相关指标计算公式:

$$DMI = 120 / NDF$$

$$NEL = \left(\frac{1.044 - 0.0119 \times ADF}{0.45} \right) \times 4.184$$

$$GI_{2001} = DMI \times NEL \times CP / ADF$$

公式中: DMI 含量以体重(Body weight, BW)百分比(% BW)表示。

1.4.3 消化能计算公式 消化能(Digestible energy, DE)参考Dowler等^[5]的计算方法, 相关指标计算公式:

$$DE = 2.118 + 0.01218CP - 0.00937ADF - 0.00383(NDF - ADF) + 0.04718EE + 0.02035NFC - 0.0262Ash$$

式中, DE 为马的消化能($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), CP 为粗蛋白含量, EE 为粗脂肪含量, NDF 为中性洗涤纤维含量, ADF 为酸性洗涤纤维含量, Ash 为粗灰分含量, NFC 为非纤维性碳水化合物, 其计算方法为 $NFC = 100 - NDF - Fat - Ash - CP$, Fat 为脂肪(本研究用 EE 代替)。

1.4.4 载畜量计算 载畜量指单位面积草地基于牧草现存量、粗蛋白和消化能产量可承载的牲畜数量, 计算公式为:

$$\text{载畜量} = \frac{\text{平均牧草现存量}}{\text{马匹日需求量} \times \text{放牧天数}}$$

$$\text{粗蛋白产量载畜量} = \frac{\text{平均粗蛋白产量}}{\text{马匹日需求量} \times \text{放牧天数}}$$

$$\text{消化能载畜量} = \frac{\text{牧草消化能总量}}{\text{马匹日需求量} \times \text{放牧天数}}$$

1.4.5 统计分析 原始数据经Microsoft Excel 2021预处理后, 在SPSS 26.0平台依次执行: 单因素方差分析(One-Way ANOVA), Duncan多重比较($P=0.05$)甄别组间差异, Pearson相关性分析解析物种组成与草场质量/承载力的关联; 数据可视化通过Origin 2021实现。在R 4.2.3环境中采用偏最小二乘结构方程模型(Partial Least Squares Path Modeling, PLS-PM)量化多因子交互机制。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度对山地草甸草原植物群落组成的影响

不同放牧强度对植物功能群的影响具有差异(表1)。禾本科展现强恢复力, 在无牧处理下, 放牧中期较前期重要值下降23%, 但放牧结束后较放牧中期上升87%($IV=0.56$); 重度放牧下, 放牧结束后较放牧前重要值增长71%($IV=0.53$), 禾本科成为绝对优势种。莎草科在轻度放牧下, 放牧结束重要值较放牧中期回升71.50%, 但在极度放牧下, 放牧结束重要值较放牧中期衰退63.64%, 较放牧前期衰退61.90%($IV=0.08$)。豆科牧草在重度放牧处理下, 放牧结束后较放牧前重要值下降89%, 极度放牧后较放牧中期却上升15%, 体现高强度干扰下的生态位重构。除轻度放牧外, 唇形科牧草在其他所有放牧处理下重要值均显著下降, 重度放牧处理下, 放牧后期较前期降幅达83%; 而杂类草在极度放牧下, 放牧结束后较中期重要值上升85%($IV=0.24$), 显示其空生态位占领策略。

多样性指数对放牧时间呈现差异化响应(图 2)。Margalef 丰富度指数随放牧时间持续呈显著下降趋($P<0.05$),放牧后期无牧、轻度、重度放牧处理较放牧前分别降低 43.58%,56.5%,60.24% ($P<0.05$),且放牧前期,轻度放牧比极度放牧高出 10.26% ($P<0.05$) (图 2a);Shannon-Wiener 多样性指数随放牧时间持续下降,在无牧与轻度放牧

处理下,放牧后期较前期分别下降 63.94% 与 56.11% ($P<0.05$) (图 2b);而 Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数随放牧时间持续下降,但均无显著性差异(图 2c-d)。形成“Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数变化明显,而 Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数相对稳定”的响应模式。

表 1 不同放强度下各植物功能群重要值

Table 1 Importance value index of plant functional groups under differential grazing intensities

放牧时期 Grazing stages	功能群类型 Plant functional group types	重要值 Important value			
		无牧 No grazing	轻度放牧 Light grazing	重度放牧 Heavy grazing	极度放牧 Extreme grazing
放牧前 Before grazing	禾本科 Gramineae	0.39±0.0001 ^{aB}	0.43±0.1996 ^{aA}	0.31±0.0003 ^{aC}	0.42±0.0001 ^{aB}
	莎草科 Cyperaceae	0.24±0.0005 ^{cB}	0.31±0.0008 ^{aA}	0.24±0.0003 ^{bB}	0.21±0.0002 ^{dB}
	豆科 Leguminous	0.08±0.0001 ^{dB}	0.13±0.001 ^{cA}	0.18±0.0002 ^{aA}	0.16±0.0004 ^{bA}
	唇形科 Lipstick	0.15±0.0162 ^{aA}	0.03±0.0004 ^{bC}	0.12±0.0001 ^{aA}	0.02±0.0005 ^{bB}
	其他 Other	0.14±0.0002 ^{cB}	0.10±0.00014 ^{dB}	0.15±0.00007 ^{bC}	0.19±0.00133 ^{aB}
放牧中 Metaphase of grazing	禾本科 Gramineae	0.30±0.0003 ^{dC}	0.43±0.0002 ^{aA}	0.40±0.0001 ^{bB}	0.40±0.0002 ^{cC}
	莎草科 Cyperaceae	0.33±0.0004 ^{bA}	0.21±0.0002 ^{dC}	0.36±0.0001 ^{aA}	0.22±0.0001 ^{eA}
	豆科 Leguminous	0.17±0.0003 ^{aA}	0.11±0.0003 ^{bB}	0.02±0.0002 ^{dB}	0.13±0.0001 ^{bC}
	唇形科 Lipstick	0.09±0.0003 ^{cB}	0.12±0.0003 ^{aA}	0.06±0.0001 ^{dB}	0.12±0.0002 ^{bA}
	其他 Other	0.11±0.0001 ^{dC}	0.13±0.0001 ^{cB}	0.16±0.0001 ^{aB}	0.13±0.0001 ^{bC}
放牧结束 End of grazing	禾本科 Gramineae	0.56±0.0001 ^{aA}	0.4±0.0002 ^{dA}	0.53±0.0001 ^{bA}	0.52±0.0007 ^{eA}
	莎草科 Cyperaceae	0.13±0.0001 ^{cC}	0.36±0.0001 ^{aB}	0.23±0.0002 ^{bC}	0.08±0.0008 ^{dC}
	豆科 Leguminous	0.01±0.0003 ^{dC}	0.02±0.0002 ^{bC}	0.02±0.0005 ^{cB}	0.15±0.0002 ^{aB}
	唇形科 Lipstick	0.01±0.0010 ^{dC}	0.06±0.0003 ^{aB}	0.02±0.0003 ^{bC}	0.01±0.0001 ^{cC}
	其他 Other	0.29±0.0001 ^{aA}	0.16±0.0024 ^{dA}	0.20±0.0003 ^{cA}	0.24±0.0003 ^{bA}

注:同列大写字母不同表示同一科植物重要值在相同放牧强度下不同放牧时期间差异显著($P<0.05$);同行小写字母不同表示同一科植物重要值在相同放牧时期内不同放牧强度间差异显著($P<0.05$),表中数据为平均值±标准误

Note: Different capital letters in the same column indicate that the important values of the same family of plants differ significantly in different grazing periods under the same grazing intensity ($P<0.05$); Different lowercase letters in the same row indicate that the important values of the same family of plants have significant differences among different grazing intensities in the same grazing period ($P<0.05$), the data in the table is Mean ± SE

2.2 不同放牧强度对牧草营养物质含量的影响

在放牧前期,无牧区的牧草粗蛋白含量较高,综合营养品质显著优于其他放牧处理;放牧中期,极度放牧区牧草的粗蛋白、粗脂肪含量高于其他放牧处理,营养品质提升明显;放牧结束后,各放牧处理下牧草营养水平均有所下降,但无牧区牧草的营养品质仍处于优势地位(图 3)。无牧处理下粗蛋白产量在各放牧时期均显著高于其他放牧处理($P<0.05$)。无牧、轻度放牧和重度放牧的粗蛋白产量随放牧时间的持续呈逐渐下降的趋势,放牧前期显著高于放牧中期和放牧结束($P<0.05$);极度放牧区的粗蛋白产量随放牧时间持续呈现先增加后减少的趋势,放牧中期显著高于其他时期($P<$

0.05)。轻度和重度放牧处理下粗脂肪产量随放牧时间持续呈现先增加后减少的趋势,放牧中期粗脂肪产量显著高于其他时期($P<0.05$)。放牧前期,无牧处理粗脂肪产量最高;放牧中期和放牧结束,轻度放牧处理粗脂肪产量最高。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维产量的变化趋势一致,无牧处理和极度放牧的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维产量随放牧时间持续逐渐下降,而轻度和重度放牧处理下的产量先增加后减少。放牧前期无牧处理下,中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维产量显著高于其他处理($P<0.05$)。无牧、轻度和重度放牧的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维产量均显著高于极度放牧($P<0.05$) (图 4)。

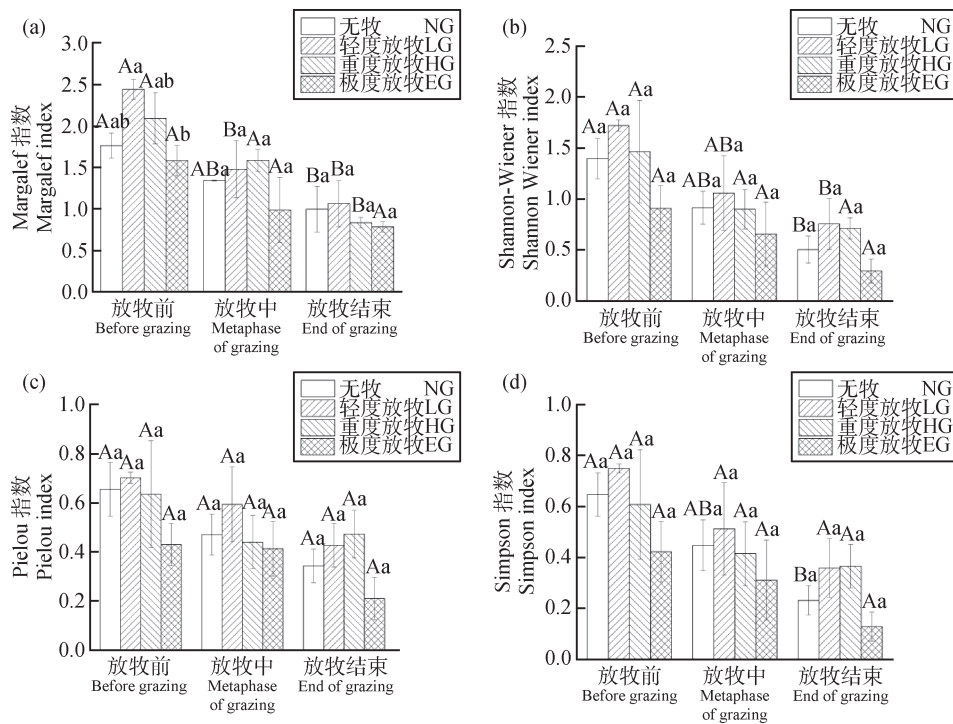


图 2 各时期不同放牧强度对物种多样性的影响

Fig. 2 Effects of differential grazing intensities on species diversity across temporal phases

注:不同大写字母表示同放牧处理不同时期间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同时期不同放牧处理间差异显著($P < 0.05$),NG表示无牧,LG表示轻度放牧,HG表示重度放牧,EG表示极度放牧,下同

Note: Different capital letters indicate significant differences in different periods of the same grazing treatment ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences in different grazing treatments at the same period ($P < 0.05$), NG stands for no grazing, LG stands for light grazing, HG stands for heavy grazing, EG stands for extreme grazing, the same as below

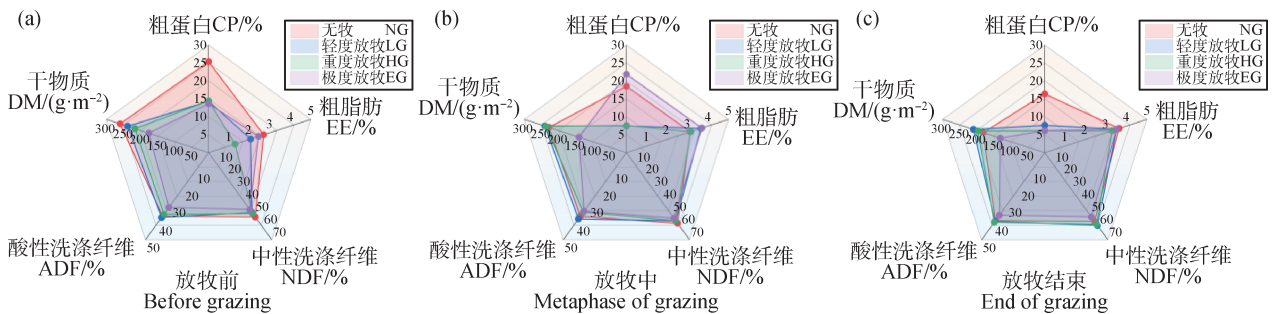


图 3 各时期牧草营养品质综合比较

Fig. 3 Comprehensive comparison of forage nutritional quality across temporal phases

2.3 不同放牧强度下群落组成、物种多样性与营养品质相关性分析

在不同放牧处理下牧草营养品质(DM, EE, NDF 和 ADF)之间均呈极显著正相关($P < 0.001$),而在极度放牧处理下粗蛋白产量同样与其余营养物质呈显著正相关($P < 0.001$),GI₂₀₀₁指数在不同放牧处理下都与粗蛋白产量呈正相关,消化能产量在重度放牧处理下与粗蛋白产量呈极显著负相关($P < 0.001$)。禾本科和莎草科牧草重要值在不同放牧处理下都与 GI₂₀₀₁ 指数显著相关($P < 0.05$);此外,

除极度放牧区外,禾本科和莎草科牧草重要值同样与粗蛋白产量显著相关(图 5 a-d)。在放牧条件下植被群落的多样性与营养品质、GI₂₀₀₁ 和消化能产量均显著相关(图 5 e-h)。

2.4 不同放牧强度下草地承载能力的综合比较

在轻度放牧处理下,草场的平均牧草现存量最高,为 2316.46 kg·hm⁻²,随着放牧强度的增加,平均牧草现存量呈下降趋势。除无牧处理外,重度放牧处理下的载畜量最高,为 0.73 horse·hm⁻²·(122 d)⁻¹,其

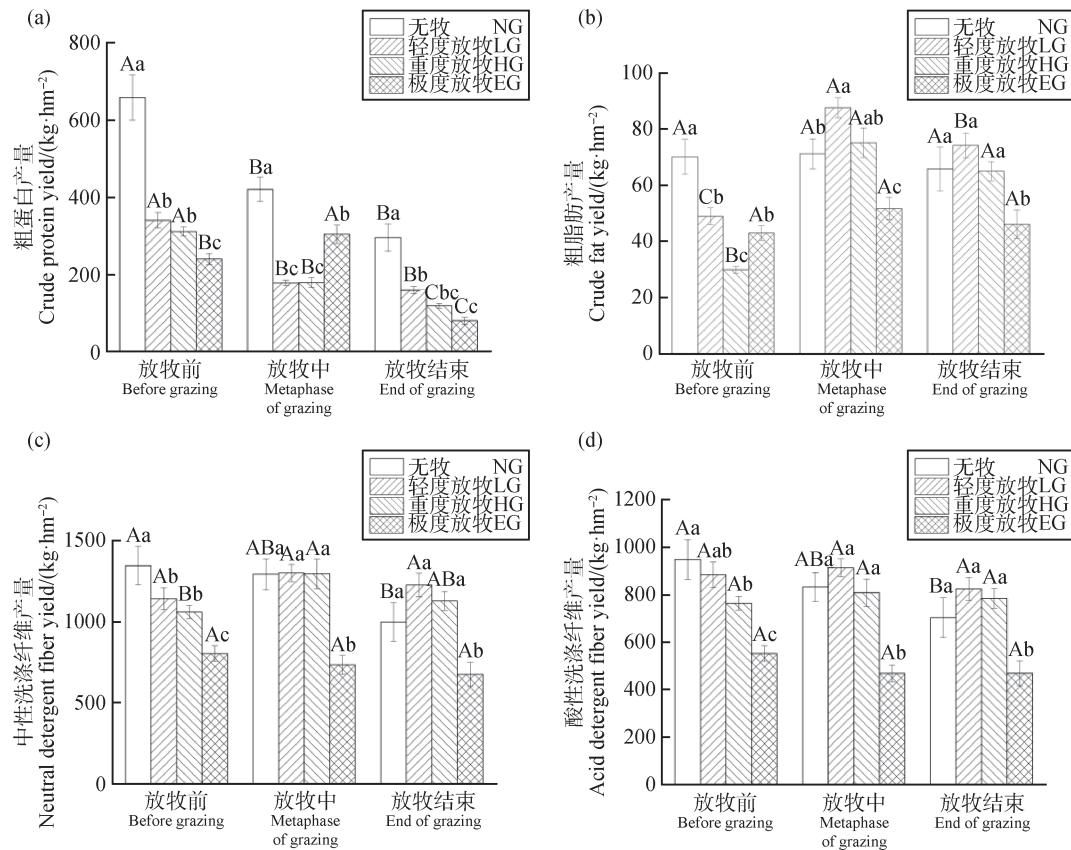


图4 不同放牧强度营养物质现存量

Fig. 4 Standing crop of forage nutrients under differential grazing intensities

次为轻度放牧,极度放牧最低,且轻度放牧和重度放牧处理下的载畜量均显著大于极度放牧($P < 0.05$)。

在无牧条件下,草场的粗蛋白产量达到最高值,为 $448.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于其他放牧处理($P < 0.05$),表明无牧处理可最大化发挥草地粗蛋白资源供给潜力。轻度、重度和极度放牧导致蛋白产量分别下降至 $214.4, 197.59$ 和 $232.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,三者间均无显著性差异。研究发现,随着放牧强度增加,平均粗蛋白产量表现为先下降后上升,而载畜量呈现逐步上升趋势。具体而言,极度放牧处理的载畜量显著高于轻度和重度放牧处理($P < 0.05$)。该结果可能暗示,短期高强度干扰可诱发局部植被的快速补偿生长,然而其长期效应及可持续性仍需进一步研究。

消化能产量在无牧处理下最高,达到 $4598.12 \text{ MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于重度和极度放牧处理($P < 0.05$)。极度放牧的消化能产量最低,为 $2706.40 \text{ MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著低于其他所有放牧处理($P < 0.05$)。可能说明消化能产量在高强度采食下被过度消耗,能量供给能力遭受不可逆损失,消化能载畜量在极度放牧处理下最低,为 $0.16 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (122\text{d})^{-1}$,各处理间大小关系为重度放牧 > 轻度放牧 > 极度放

牧,且各处理组之间均有显著性差异($P < 0.05$)。这可能说明消化能产量在放牧处理下更具韧性,但极端利用仍会突破生态阈值,造成不可逆损失(表2)。

2.5 不同放牧强度下草场承载能力影响因素分析

在3种载畜量核算模式下,植物组分(植物群落组成:禾本科牧草、莎草科牧草、豆科牧草、唇形科牧草及其他杂类草重要值)对植物多样性均有显著积极影响($P < 0.05$),放牧处理对 GI_{2001} 指数和消化能均有显著消极影响($P < 0.05$),营养品质对 GI_{2001} 指数均有极显著消极影响($P < 0.001$)。值得注意的是,营养品质和 GI_{2001} 指数对产量载畜量有极显著消极影响($P < 0.01$),而在粗蛋白产量载畜量核算模式中,仅营养品质对其有显著消极影响($P < 0.05$),在消化能载畜量核算模式中仅 GI_{2001} 指数对其有显著消极影响($P < 0.05$)。就标准化总效应而言, GI_{2001} 指数对产量载畜量和消化能载畜量的贡献最大,营养品质对粗蛋白产量载畜量的贡献最大。PLS-PM模型分别解释了45.04%,40.48%和40%的产量载畜量、粗蛋白产量载畜量和消化能载畜量的方差(图6)。

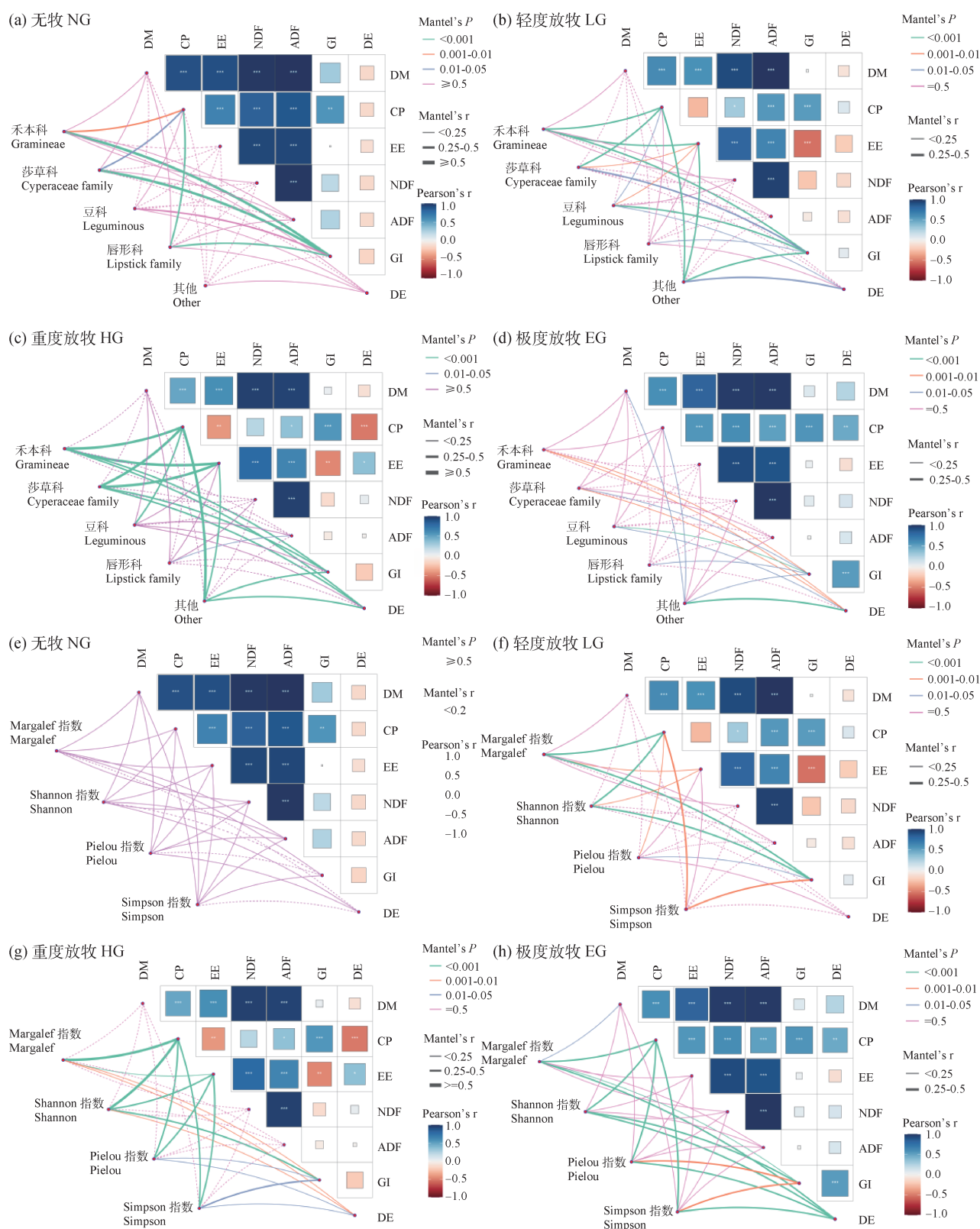


图 5 不同放牧强度下群落结构组成、物种多样性与草场营养品质的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis among community structure composition, species diversity, and pasture nutritional quality under differential grazing intensities

注: 实线表示两个元素之间正相关, 虚线表示两个元素之间负相关, $P < 0.05$, $**P < 0.01$, $***P < 0.001$

Note: The solid line represents a positive correlation between two elements, while the dashed line represents a negative correlation between two elements, $P < 0.05$, $**P < 0.01$, $***P < 0.001$

表 2 不同放牧强度下山地草甸草原载畜量核算

Table 2 Carrying capacity accounting for mountain meadow steppe under differential grazing intensities

放牧强度 Grazing intensity	平均牧草现存量 Average forage standing crop/ (kg·hm ⁻²)	利用率 Utilization rate	采食量 Feed intake/ (kg·horse ⁻¹ ·d ⁻¹)	围栏面积 Fence area/hm ²	放牧天数 Grazing time/ d	载畜量 Stocking capacity/ [horse·hm ⁻² ·(122d) ⁻¹]
无牧 No grazing	2239.19±144.72 ^a	0	14.83	1	122	0
轻度放牧 Light grazing	2316.46±90.61 ^a	0.5	14.83	1	122	0.64±0.05 ^a
重度放牧 Heavy grazing	2214.35±103.57 ^a	0.6	14.83	1	122	0.73±0.06 ^a
极度放牧 Extreme grazing	1463.25±80.47 ^a	0.75	14.83	1	122	0.61±0.04 ^b
放牧强度 Grazing intensity	平均蛋白产量 Average protein yield/(kg·hm ⁻²)	利用率 Utilization rate	蛋白需求量 Protein requirement/(kg·horse ⁻¹ ·d ⁻¹)	围栏面积 Fence area/hm ²	放牧天数 Grazing time/d	载畜量 Stocking capacity/[horse·hm ⁻² ·(122d) ⁻¹]
无牧 No grazing	448.95±28.58 ^a	0	1.44	1	122	0
轻度放牧 Light grazing	214.4±8.62 ^b	0.5	1.44	1	122	0.61±0.05 ^b
重度放牧 Heavy grazing	197.59±8.51 ^b	0.6	1.44	1	122	0.67±0.05 ^b
极度放牧 Extreme grazing	232.6±13.33 ^b	0.75	1.44	1	122	0.99±0.08 ^a
放牧强度 Grazing intensity	消化能产量 Digestible energy production/ (MJ·hm ⁻²)	利用率 Utilization rate	消化能需求量 Digestible energy requirement/ (MJ·horse ⁻¹ ·d ⁻¹)	围栏面积 Fence area/hm ²	放牧天数 Grazing time/d	载畜量 Stocking capacity/ [horse·hm ⁻² ·(122d) ⁻¹]
无牧 No grazing	4598.12±16.94 ^a	0	101.4	1	122	0
轻度放牧 Light grazing	4571.83±29.07 ^{ab}	0.5	101.4	1	122	0.18±0 ^b
重度放牧 Heavy grazing	4510.7±28.82 ^b	0.6	101.4	1	122	0.22±0 ^a
极度放牧 Extreme grazing	2706.4±11.64 ^c	0.75	101.4	1	122	0.16±0 ^c

注:不同字母表示该指标在不同放牧强度下具有显著性差异, $P<0.05$,表中数据为平均值±标准误,采食量、蛋白需求量、消化能需求量为维持家畜正常生长发育所需的平均量

Note: Different letters indicate that the index has significant differences under different grazing intensities, $P<0.05$, the data in the table is Mean±SE. Feed intake, protein demand and digestible energy demand are the average amounts required to maintain the normal growth and development of livestock

3 讨论

3.1 放牧强度对物种组成和物种多样性的影响

作为天然草地的主要利用方式,放牧对草地生态系统的物种多样性产生了显著影响。本研究显示,在轻度放牧处理下,家畜对禾本科等优势牧草进行适度啃食,限制了禾本科牧草的生长,降低了优势种的竞争优势,为莎草科和唇形科等敏感功能群提供生态位空间。在放牧结束后,莎草科和唇形科的重要值较放牧前分别增长 16.1% 和 100%,这种模式支持了 Connell 的中度干扰假说^[33],即适度干扰可最大化物种多样性。然而,重度放牧会引发功能群替代现象^[34]。本研究表明,在重度放牧下,禾本科植物放牧结束后较放牧前重要值增长 71%,成为绝对优势种,这可能是由于禾本科植物具有强大的分蘖能力,在持续采食后能快速再生,从而垄断光照与空

间资源,使再生能力较弱的豆科与唇形科等阔叶植物在资源竞争中落败,最终导致群落结构单一化。

随着放牧时间的持续,草地植物多样性出现降低的趋势。轻度放牧区的 Shannon-Wiener 多样性指数始终处于最高值,这与张静妮等^[25],刘发央等^[24]的研究结果一致。而极度放牧区的物种丰富度和物种多样性无论在哪个时期,都处于最低值。汪诗平等^[19, 35-38]的相关研究显示,在冷蒿草原、羊草草原以及高寒草甸,不同放牧压力均会造成生物多样性的波动,适度放牧可以提高草地生产力和物种多样性,而过度放牧则可能导致草地退化。无牧处理、轻度放牧处理和极度放牧处理的 Pielou 均匀度指数均随放牧时间呈梯度式下降,重度放牧的 Pielou 均匀度指数在放牧后期出现升高趋势,达到该时期的最高值, Hickman 等也得出过类似结论,随着放牧强度的增加,植物的多样性会有增加的趋势^[22]。随着放牧时

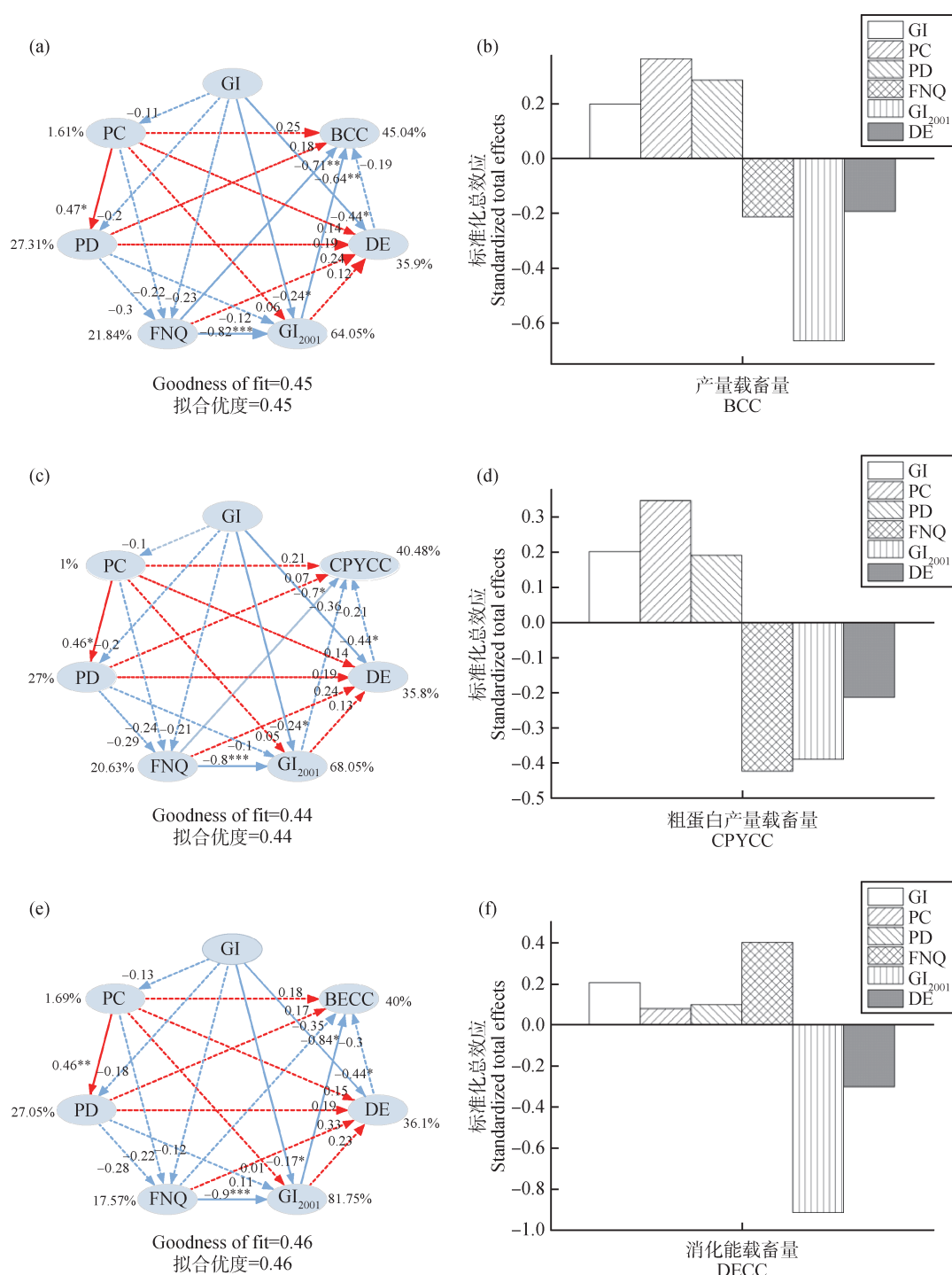


图6 偏最小二乘路径建模(PLS-PM)分析放牧强度、植物组分、植物多样性、牧草营养品质、粗饲料分级指数、消化能以及载畜量之间的关系

Fig. 6 Partial least squares path modeling (PLS-PM) analysis of relationships among grazing intensity, botanical composition, plant diversity, forage nutritional quality, roughage grading index, digestible energy, and stocking rate

注:GI表示放牧强度,PC表示植物组分,PD表示植物多样性,FNQ表示牧草营养品质,GI₂₀₀₁表示粗饲料分级指数,DE表示消化能,BCC表示产量载畜量,CPYCC表示粗蛋白产量载畜量,DECC表示消化能载畜量。正效应和负效应分别用红色和蓝色箭头表示;具显著差异的路径系数用实线表示,* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$,无显著性差异的用虚线表示。方框旁的百分比代表变量的解释能力。拟合优度用于评估模型

Note: GI represents grazing intensity, PC represents plant composition, PD represents plant diversity, FNQ represents forage nutritional quality, GI₂₀₀₁ represents roughage grading index, DE represents digestible energy, BCC represents yield-based carrying capacity, CPYCC represents crude protein yield-based carrying capacity, and DECC represents digestible energy carrying capacity. The positive and negative effects are represented by red and blue arrows, respectively; The path coefficients with significant differences are represented by solid lines, * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, and those without significant differences are represented by dashed lines. The percentage next to the box represents the explanatory power of the variable. The goodness of fit is used to evaluate the model

间的持续,各放牧处理的Simpson指数整体呈下降趋势。轻度放牧区的Simpson指数处于最高值,极度放牧区的Simpson指数始终处于最低值,这说明极度放牧处理对草场植物多样性具有较大影响。这要求管理实践必须建立基于“放牧强度-植被响应”的预警机制,以避免生态系统发生状态转换^[39]。

3.2 不同核算方式下载畜量的适用性与局限性

不同的载畜量核算方法因生态指标与区域特征而异。产量载畜量是基于平均牧草现存量与采食需求,在轻度放牧下载畜量为 $0.64 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$,但产量法过于依赖当年牧草现存量数据,而忽略降水等气候因素的影响,在实际应用中结合动态气候模型进行修正,可以使得计算结果更为精准^[40-41]。因为昭苏山地草甸草原是以禾本科和杂类草为建群种的群落结构,生物量供给相对稳定,所以与其他两种载畜量计算方式相比,产量载畜量在各处理间差异性较小,但在极度放牧处理下载畜量下降 4.7% ,为 $0.61 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$,说明极端放牧仍然会打破草地的能量平衡。该区域豆科植物(如黄芪、苜蓿)的整体粗蛋白供给存在不稳定性(可能由其不均匀分布导致),导致粗蛋白产量载畜量对放牧干扰更为敏感,在轻度放牧处理下降至 $0.61 \text{ horse} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。蛋白法适用于豆科植物优势区(如昭苏山地草甸草原),但对不同地区蛋白产量的时空异质性响应不足,在针对大面积、多地区、不同草地类型、不同建群种草原的载畜量计算时稍显不足。值得注意的是,粗蛋白产量载畜量在极度放牧处理下高于轻度放牧和重度放牧,是因为植物在持续高强度采食压力下产生了胁迫生理响应。为应对生存压力,耐牧植物通过缩短生命周期、加速氮代谢等机制维持叶片较高的粗蛋白含量^[42-43],体现了典型的生存优先的资源分配策略。然而,这种现象伴随着明显的生态代价,高蛋白往往与木质素等次生代谢物的积累相关,导致牧草消化率下降^[44-45],同时大量消耗根系储备养分,削弱植物长期生存能力^[46-47]。这种以牺牲个体健康和生态系统可持续性为代价的短期营养提升,可能是草地退化的预警信号,而非承载力的真实提升。与蛋白指标不同,消化能载畜量与消化能产量在各处理间的差异较大,可能是因为能量供给更依赖牧草结构组成而非单纯的生物量。另一方面,消化能载畜量随放牧强度呈先增后降的趋势,其峰值出现在重度放牧区,这可能是由于放牧干扰提高了牧草分蘖与幼嫩组织的比例,

暂时提升了群落整体消化率,而极度放牧则导致优质牧草耗竭,群落以纤维含量高的劣质牧草为主,造成了消化能供给的下降^[48]。

综上所述,三种载畜量核算结果呈现明显分化:产量与消化能载畜量在重度放牧下达峰值,而粗蛋白产量载畜量则在极度放牧下最高。这表明单一指标易误导管理决策,三类指标的综合评估可为草地多目标、可持续管理提供科学依据。极度放牧下粗蛋白产量载畜量较高是植物在胁迫下的生理响应,但这是一种以牺牲草地长期健康为代价的“假象”,消化能载畜量普遍低于产量载畜量和粗蛋白产量载畜量,这可能是由于家畜对牧草的选择性采食(如偏好高糖低纤维部分)导致实际摄入的消化能显著低于理论值,使粗饲料中部分潜在能量未被利用^[49]。重度放牧虽通过促进牧草快速周转暂时提升生物量与能量供给,但对植物组分和植物物种多样性的破坏较为严重^[50]。极度放牧触发植物胁迫响应,激活氮代谢通路以提高叶片粗蛋白含量,但伴随木质素积累导致消化率下降。这种“生物量-养分”权衡及能量转化阈值共同解释了不同载畜量指标的峰值差异现象^[51]。因此,在草场管理中应合理控制放牧强度,以实现草场资源的可持续利用和草地载畜量的最大化,未来的研究可以进一步探讨如何通过优化放牧管理策略来提高草场的生产力和生态服务功能。

3.3 放牧强度对草地群落组成、多样性、牧草营养品质与草场承载能力关系的影响

在草地生态系统中,放牧强度影响着植物组成和草地生产性能。本研究发现,无牧处理下,禾本科、莎草科牧草重要值与粗蛋白含量显著正相关,表明无牧处理下草地营养循环稳定,有利于植物生长与营养积累。这可能是由于无放牧干扰时土壤养分自然积累,为植物生长奠定良好基础^[52]。轻度放牧下,粗蛋白含量与粗脂肪含量呈负相关,禾本科、莎草科牧草重要值与粗蛋白含量、粗脂肪含量显著正相关,说明轻度放牧对草地生态干扰较小,生态系统物质循环和能量流动稳定,维持了植物正常生长与营养合理分配^[52]。重度放牧处理下,牧草产量与多个营养元素(CP,EE,NDF,ADF)显著正相关,而禾本科、莎草科牧草重要值与牧草产量、中性洗涤纤维含量、酸性洗涤纤维含量负相关。这可能是由于重度放牧对草地生态压力较大,虽短期内部分营养元素含量可能提升,但长期将加剧草地退化,影响可持

续生产能力^[53]。无牧和轻度放牧下, 营养元素间多为正相关, 而重度放牧处理下粗脂肪含量与消化能显著负相关。这与部分研究的结论一致^[54], 可能是较高的物种多样性有助于提高牧草的营养品质。

了解不同放牧处理对各指标的影响及作用关系, 对调节草地生态健康具有重要意义。研究发现放牧对各指标均有消极影响, 植物组分对植物多样性具有极显著积极影响^[55], 牧草营养品质对GI₂₀₀₁指数具有极显著消极影响, 除放牧强度外其余指标均对消化能有积极影响, GI₂₀₀₁指数的解释模型拟合良好, 解释率平均可达71.3%。这可能是由于粗蛋白、中性洗涤纤维等物质与GI₂₀₀₁指数、消化能存在协同效应, 有相关研究指出粗蛋白含量每增加1%, 消化能提升0.62 MJ·kg⁻¹; 中性洗涤纤维消化率每提高10%, 消化能增加0.48 MJ·kg⁻¹^[56], 干物质采食量与消化能的相关系数达0.79^[57-59]。过度放牧造成草地退化, 草地承载能力下降, 影响草地生态系统为马等食草动物提供能量的能力, 进而威胁草地生态系统的稳定与可持续发展。合理放牧能维持草地生态平衡, 提升生产性能, 满足马的代谢能需求。未来研究应聚焦不同放牧方式对草地生态系统的长期影响, 为草地资源可持续利用提供科学依据。

4 结论

轻度放牧(1 horse·hm⁻²)可维持较高的物种多样性, 并优化牧草营养结构, 实现生态与生产的平衡。重度放牧虽使产量载畜量[0.73 horse·hm⁻²·(122 d)⁻¹]及消化能载畜量[0.22 horse·hm⁻²·(122 d)⁻¹]达峰值, 但导致禾本科优势度过高、群落简化; 极度放牧虽粗蛋白载畜量[0.99 horse·hm⁻²·(122 d)⁻¹]较高, 却伴随多样性显著下降与消化能供给的严重损失。PLS-PM分析进一步表明, 放牧强度对粗饲料分级指数(GI₂₀₀₁)和消化能具有直接负效应。综上, 轻度放牧是昭苏山地草甸草原兼顾伊犁马养殖与草地健康的适宜放牧强度。本研究基于单一年度数据, 未来需通过长期定位观测, 以验证结论的稳定性。

参考文献

- [1] 孙慧兰, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1273-1277
SUN H L, CHEN Y N, LI W H, et al. Study on types and ecological services values of the grassland in the Ili River Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(5): 1273-1277
- [2] 李海, 江世华, 王雪芬, 等. 昭苏草地资源及其可持续利用[J].

- 草业科学, 2004, 21(3): 7-10
LI H, JIANG S H, WANG X F, et al. The Zhaosu grassland resources and their sustainable use[J]. Pratacultural Science, 2004, 21(3): 7-10
- [3] 喀尔肯·马木尔汗, 吐尔逊江·吾木尔艾力, 马军, 等. 伊犁马产业发展现状与对策[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(2): 54-56
MAMUERHAN K, WUMUERAILI T, MA J, et al. Current situation and countermeasures of Ilima industry development[J]. Special Economic Animals and Plants, 2022, 25(2): 54-56
- [4] LITHOURGIDIS A S, VASILAKOGLU I B, DHIMA K V, et al. Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios[J]. Field Crops Research, 2006, 99(2/3): 106-113
- [5] DOWLER L E, SICILIANO P D, PRATT-PHILLIPS S E, et al. Determination of pasture dry matter intake rates in different seasons and their application in grazing management[J]. Journal of Equine Veterinary Science, 2012, 32(2): 85-92
- [6] 孙小富, 唐华江, 杨红文, 等. 我国草地退化原因及治理对策[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(9): 39-44, 50
SUN X F, TANG H J, YANG H W, et al. The causes of grassland degradation and countermeasures in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(9): 39-44, 50
- [7] 陈茂, 马晓林, 陈路瑶, 等. 伊犁河谷山地草甸群落特征和植物多样性对封育年限的响应[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 57-66
CHEN M, MA X L, CHEN L Y, et al. The response of community characteristics and plant diversity to enclosure years in the nalati mountain meadow[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2024, 43(1): 57-66
- [8] TEAGUE W R, DOWHOWER S L. Patch dynamics under rotational and continuous grazing management in large, heterogeneous paddocks[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 53(2): 211-229
- [9] BYRNES R C, EASTBURN D J, TATE K W, et al. A global meta-analysis of grazing impacts on soil health indicators[J]. Journal of Environmental Quality, 2018, 47(4): 758-765
- [10] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 244-264
HOU F J, YANG Z Y. Effects of grazing of livestock on grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 244-264
- [11] 张铜会, 杨甲定, 赵哈林. 科尔沁沙质草地禾本科植物主要功能类型对连续放牧的反应[J]. 草业学报, 2004, 13(1): 89-93
ZHANG T H, YANG J D, ZHAO H L. Responses to continual grazing of major functional types of Gramineae in Horqin sandy grassland, Inner Mongolia[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(1): 89-93
- [12] 赵成章, 樊胜岳, 殷翠琴, 等. 毒杂草型退化草地植被群落特征的研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 507-512
ZHAO C Z, FAN S Y, YIN C Q, et al. Study on vegetation community's structure of degraded grassland of noxious and miscellaneous grass type[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(4): 507-512
- [13] 孙逊, 俞玥, 梁俊毅. 放牧对中国北方天然草地群落营养品质影响的Meta分析[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2843-2852
SUN X, YU Y, LIANG J Y. Effects of grazing on nutritional quality of natural grassland communities in northern China: a

- meta-analysis[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(9): 2843-2852
- [14] 乌依勒斯, 乌鲁木山·布仁巴依尔, 谢静, 等. 不同放牧强度对家畜生产性能与牧草干物质体外消化率的影响[J]. *畜牧与饲料科学*, 2013, 34(1): 4-7
WUYILESI, BURENBAYIER W, XIE J, et al. Effects of different grazing intensities on livestock performance and in vitro digestibility of forage dry matter[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2013, 34(1): 4-7
- [15] 魏鹏. 放牧条件下乳用伊犁马采食量及采食习性的初步研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014: 25-27
WEI P. Preliminary study of dairy Yili horse feed intake under grazing conditions[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014: 25-27
- [16] YAO X X, LI C H, ALI AHMAD A, et al. An increase in livestock density increases forage nutritional value but decreases net primary production and annual forage nutritional yield in the alpine grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1020033
- [17] ZHA X J, TIAN Y, OUZHU, et al. Response of forage nutrient storages to grazing in alpine grasslands[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 991287
- [18] 董全民, 赵新全, 王玉寿, 等. 放牧强度对高寒混播人工草地群落特征及地上现存量的影响[J]. *草地学报*, 2012, 20(1): 10-16
DONG Q M, ZHAO X Q, MA Y S, et al. Effect of grazing intensity on community character and aboveground present biomass of alpine mixed-sown pasture[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(1): 10-16
- [19] 汪诗平, 李永宏, 王艳芬, 等. 不同放牧率对内蒙古冷蒿草原植物多样性的影响[J]. *植物学报*, 2001, 43(1): 89-96
WANG S P, LI Y H, WANG Y F, et al. Influence of different stocking rates on plant diversity of *Artemisia frigida* community in Inner Mongolia steppe[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(1): 89-96
- [20] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上)[J]. *生物多样性*, 1994(3): 162-168
MA K P. Measurement methods of biotic community diversity: I. α diversity measurement (Part 1) [J]. *Biodiversity Science*, 1994, (3): 162-168
- [21] 胡向敏, 乌仁其其格, 高铁奇, 等. 放牧强度对贝加尔针茅草甸草原植物群落功能群及多样性的影响[J]. *草原与草业*, 2023, 35(3): 15-21
HU X M, WU R, GAO T Q, et al. Effects of different grazing intensities on plant community functional groups and diversity in *Stipa baicalensis* meadow steppe[J]. *Grassland and Prataculture*, 2023, 35(3): 15-21
- [22] HICKMAN K R, HARTNETT D C, COCHRAN R C, et al. Grazing management effects on plant species diversity in tall-grass prairie[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2004, 57(1): 58-65
- [23] 许宏斌, 辛晓平, 宝音陶格涛, 等. 放牧对呼伦贝尔羊草草甸草原生物量分布的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(3): 768-774
XU H B, XIN X P, BAOYIN T, et al. Effects of grazing on biomass distribution on the *Leymus chinensis* meadow steppe of Hulunbeier[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(3): 768-774
- [24] 刘发央, 徐长林, 龙瑞军. 牦牛放牧强度对金露梅灌丛草地群落物种多样性的影响[J]. *草地学报*, 2008, 16(6): 613-618
LIU F Y, XU C L, LONG R J. Effect of yak grazing intensity on species diversity of *Dasiphora fruticosa* shrub grassland communities[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 16(6): 613-618
- [25] 张静妮, 赖欣, 李刚, 等. 贝加尔针茅草原植物多样性及土壤养分对放牧干扰的响应[J]. *草地学报*, 2010, 18(2): 177-182
ZHANG J N, LAI X, LI G, et al. Response of plant diversity and soil nutrient condition to grazing disturbance in *Stipa baicalensis* Roshev. grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(2): 177-182
- [26] 姚喜喜, 王立亚, 严振英, 等. 放牧对温性荒漠草原植物群落特征与牧草营养品质的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(S1): 165-172
YAO X X, WANG L Y, YAN Z Y, et al. Effects of grazing on vegetation characteristics and forage nutritional quality in a temperate desert steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(1): 165-172
- [27] 胥洪军. 昭苏县草地资源分布与特征[J]. *新疆畜牧业*, 2014, 30(12): 50-51
XU H J. Distribution and characteristics of grassland resources in Zhaosu County[J]. *Xinjiang Animal Husbandry*, 2014, 30(12): 50-51
- [28] 马军, 郑伟, 张博, 等. 基于马营养需求的燕麦-箭筈豌豆混播草地生产性能的评价[J]. *草业科学*, 2015, 32(6): 1002-1009
MA J, ZHENG W, ZHANG B, et al. Production performance evaluation of oat-common vetch mixed pasture based on nutrient needs of horses[J]. *Prataculture Science*, 2015, 32(6): 1002-1009
- [29] 李翎羽. 蒙古马牧食行为监测[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023: 25-28
LI L Y. Monitoring grazing behavior of Mongolian horses[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023: 25-28
- [30] 王占义, 赵向玲, 王成杰, 等. 不同牧马强度对荒漠草原植物群落特征的影响[J]. *草原与草业*, 2023, 35(1): 10-16
WANG Z Y, ZHAO X L, WANG C J, et al. Effects of horse grazing intensities on plant community characteristics in desert steppe[J]. *Grassland and Prataculture*, 2023, 35(1): 10-16
- [31] ROHWEDER D A, JORGENSEN N, BARNES R F. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality[J]. *Journal of Animal Science*, 1978, 47(3): 747-759
- [32] 张吉鹏. 粗饲料品质评定指数的比较研究[J]. *饲料研究*, 2003, 26(9): 17-20
ZHANG J K. The comparative study on forage quality evaluation indexes[J]. *Feed Research*, 2003, 26(9): 17-20
- [33] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. *Science*, 1978, 199(4335): 1302-1310
- [34] OLSON B E, WALLANDER R T. Does ruminal retention time affect leafy spurge seed of varying maturity? [J]. *Journal of Range Management*, 2002, 55(1): 65
- [35] SOUSA W P. The role of disturbance in natural communities[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1984, 15: 353-391
- [36] 李永宏. 放牧影响下羊草草原和大针茅草原植物多样性的变化[J]. *植物学报*, 1993(11): 877-884
LI Y H. Grazing dynamics of the species diversity in *Aneurolepidium chinense* steppe and *Stipa grandis* steppe [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1993(11): 877-884
- [37] 江小蕾, 张卫国, 杨振宇, 等. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(9): 1479-1485

- JIANG X L, ZHANG W G, YANG Z Y, et al. Effects of different disturbance types on community structure and plant diversity of alpine meadow[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(9): 1479-1485
- [38] 王文颖, 王启基. 高寒嵩草草甸退化生态系统植物群落结构特征及物种多样性分析[J]. 草业学报, 2001, 10(3): 8-14
WANG W Y, WANG Q J. The structure and plant species diversity of the degraded ecosystems in alpine Kobresia meadow[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2001, 10(3): 8-14
- [39] SUDING K N, HOBBS R J. Threshold models in restoration and conservation: a developing framework[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, 24(5): 271-279
- [40] 汤昕, 张福平, 冯起, 等. 20年来鄂尔多斯市草地产草量变化及草畜平衡[J]. 生态学报, 2024, 44(23): 10887-10896
TANG X, ZHANG F P, FENG Q, et al. Changes in grassland yield and grassland-livestock balance in Ordos City over the past 20 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10887-10896
- [41] 朱晓艳, 张英俊, 刘荣堂, 等. 不同季节南方人工改良草地载畜量研究[J]. 草原与草坪, 2011, 31(4): 64-69
ZHU X Y, ZHANG Y J, LIU R T, et al. Study on stocking rate of improved pastures in different seasons in Southern China[J]. Grassland and Turf, 2011, 31(4): 64-69
- [42] 乔茅塔, 杨阳, 张峰, 等. 不同载畜率下短花针茅分蘖特征和贮藏养分的变化[J]. 中国草地学报, 2019, 41(5): 80-85
QIAO J R, YANG Y, ZHANG F, et al. Changes of tiller characteristics and storage nutrient of *Stipa breviflora* under different stocking rates[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(5): 80-85
- [43] FENETAHUN Y, YUAN Y, FENTAHUN T, et al. Effects of grazing intensity on forage nutritive value of dominant grass species in Borana rangelands of Southern Ethiopia[J]. PeerJ, 2021, 9: e12204
- [44] 郭佩. 典型草原放牧滩羊的消化代谢和肠道甲烷排放[D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 12-23
GUO P. Digestion, metabolism and enteric methane emission of tan sheep grazing in typical steppe[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 12-23
- [45] RUGGIERI A C, DA SILVA CARDOSO A, ONGARATTO F, et al. Grazing intensity impacts on herbage mass, sward structure, greenhouse gas emissions, and animal performance: analysis of *Brachiaria* pastureland[J]. Agronomy, 2020, 10(11): 1750
- [46] WAHEED A, QIAO X, MUHAMMAD M, et al. Plant root-mediated carbon sequestration and nutrient cycling in grassland ecosystems under land use and climate change[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 393: 109865
- [47] TIAN T, GUO J Y, YANG Z Q, et al. Effects of different grazing treatments on the root system of *Stipa krylovii* Steppe[J]. Sustainability, 2024, 16(10): 3975
- [48] KAZAKOU E, BUMB I, GARNIER E. Species dominance rather than complementarity drives community digestibility and litter decomposition in species-rich Mediterranean rangelands[J]. Applied Vegetation Science, 2022, 25(4): e12685
- [49] 焦婷, 吴铁成, 吴建平, 等. 不同类型藏羊消化率与采食量的比较研究[J]. 草业学报, 2019, 28(5): 100-108
JIAO T, WU T C, WU J P, et al. A comparative study on digestibility and feed intake of Tibetan sheep of different types[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5): 100-108
- [50] 高苏日固嘎, 斯琴朝克图, 乌兰图雅, 等. 克氏针茅草原群落物种多样性与生物量关系对放牧强度的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9736-9746
GAO S R G G, SI Q C K T, WULAN T Y, et al. Response of the relationship between species diversity and biomass of *Stipa krylovii* grassland community to grazing intensity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9736-9746
- [51] 靳茗茗, 徐增让, 成升魁. 藏北高寒草地植被和土壤对不同放牧强度的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8753-8762
JIN M M, XU Z R, CHENG S K. Response of vegetation and soil to different grazing intensities of alpine grassland in Northern Tibet[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8753-8762
- [52] 姜丽霞, 田赞, 刘新月, 等. 不同放牧方式对草地群落植物功能群组成和结构的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 77-86
JIANG L X, TIAN Y, LIU X Y, et al. Effects of different grazing methods on the composition and structure of plant functional groups in grassland community[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(1): 77-86
- [53] ZHU Q A, CHEN H, PENG C H, et al. An early warning signal for grassland degradation on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 6406
- [54] 易灵心, 李多才, 安玉峰, 等. 祁连山高寒典型草原物种多样性和功能组成与牧草品质的关系[J]. 草业科学, 2022, 39(8): 1513-1520
YI L X, LI D C, AN Y F, et al. Relationship between species diversity, functional composition and forage quality in alpine typical grassland of Qilian Mountain[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(8): 1513-1520
- [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] 梁建勇, 焦婷, 吴建平, 等. 不同类型草地牧草消化率季节动态与营养品质的关系研究[J]. 草业学报, 2015, 24(6): 108-115
LIANG J Y, JIAO T, WU J P, et al. The relationship between seasonal forage digestibility and forage nutritive value in different grazing pastures[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(6): 108-115
- [57] DELABY L, BAUMONT R, BROCARD V, et al. Grassland at the heart of circular and sustainable food systems[C]//Proceedings of the 29th General Meeting of the European Grassland Federation, Caen, France, 2022: 83-94
- [58] STERGIADIS S, ALLEN M, CHEN X J, et al. Prediction of nutrient digestibility and energy concentrations in fresh grass using nutrient composition[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(5): 3257-3273
- [59] O'MARA F. The main output of livestock in agriculture is animal-sourced food[J]. Animal-Science Proceedings, 2024, 15(1): 1

(责任编辑 闵芝智)