

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.025

引用格式:任磊,武倩,韩国栋.放牧强度和放牧时间对荒漠草原优势牧草营养品质的影响[J].草地学报,2026,34(8):3026—3036

REN Lei, WU Qian, HAN Guo-dong. Effects of Grazing intensity and Grazing Time on the Nutritional Quality of Dominant Forages in Desert Grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8):3026—3036

放牧强度和放牧时间对荒漠草原优势牧草 营养品质的影响

任磊,武倩,韩国栋*

(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010011)

摘要:本研究基于短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原建立的长期放牧试验平台,分析主要优势植物短花针茅(*Stipa breviflora*)和无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)的营养品质随放牧强度和放牧时间的动态变化规律。研究表明,中度放牧和重度放牧均显著降低两物种粗蛋白含量,重度放牧显著增加两物种中性洗涤纤维含量并且显著降低无芒隐子草粗脂肪含量,轻度放牧显著降低短花针茅粗灰分含量。随着放牧时间的延续,两物种粗蛋白含量逐渐降低,粗脂肪和酸性洗涤纤维含量呈现先上升后降低趋势,短花针茅和无芒隐子草粗脂肪含量分别在8月和7月达到最大值,酸性洗涤纤维含量均在7月达到最大值。两物种粗蛋白含量与中性洗涤纤维含量、粗脂肪含量与粗灰分含量均呈显著负相关关系,中性洗涤纤维含量与酸性洗涤纤维含量均呈显著正相关关系。研究结果为提高内蒙古短花针茅荒漠草原生物资源利用效率提供了科学依据,有利于实现草地可持续利用。

关键词:放牧强度;放牧时间;荒漠草原;牧草营养

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)08-3026-11

Effects of Grazing intensity and Grazing Time on the Nutritional Quality of Dominant Forages in Desert Grassland

REN Lei, WU Qian, HAN Guo-dong*

(College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources, Ministry of Education, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: Based on a long-term grazing experiment platform established in the *Stipa breviflora* desert steppe, this study analyzed the dynamic changes in the nutritional quality of two dominant plants *Stipa breviflora* and *Cleistogenes songorica* under different grazing intensities and duration. The results indicated that both moderate and heavy grazing significantly reduced the crude protein (CP) content of the both species. Heavy grazing significantly increased the neutral detergent fiber (NDF) content in the both species and significantly reduced the ether extract (EE) content of *Cleistogenes songorica*, while light grazing significantly reduced the crude ash content of *Stipa breviflora*. As the grazing season progressed, the CP content of the both species gradually decreased, whereas the ether extract and acid detergent fiber (ADF) contents exhibited an initial increase followed by a decrease. Specifically, the ether extract content of *Stipa breviflora* and *Cleistogenes songorica* peaked in August and July, respectively, while the ADF content for both species reached its maximum in July. Furthermore, CP significant negatively correlated with NDF, as well as between ether extract with crude ash. In contrast, NDF and ADF showed a significant positive correlation. These findings provide a scientific basis

收稿日期:2025-09-22;修回日期:2025-11-17

基金项目:国家自然科学基金重大项目(32192463);内蒙古揭榜挂帅项目(2024JBGS0011);科技部政府间合作项目(2024YFE0113100);内蒙古教育厅(BR22-12-07);创新平台载体(人才)计划项目“内蒙古自治区草地管理与利用重点实验室(2022PT0003)”;学科揭榜挂帅项目YLBKZX-NND-001资助

作者简介:任磊(2000-),男,汉族,内蒙古锡林浩特人,硕士研究生,主要从事草地资源生态与管理研究,E-mail:renlei@emails.imau.edu.cn;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:hanguodong@imau.edu.cn

for improving the utilization efficiency of biological resources in the *Stipa breviflora* desert steppe of Inner Mongolia and contribute to the sustainable management of grassland ecosystems.

Key words: Grazing capacity; Grazing time; Desert grassland; Forage nutrition

内蒙古荒漠草原属于典型草原向荒漠过渡的类型,草地面积占全国草地总面积的20%,占该自治区土地总面积的67%^[1],在畜牧业生产和维持生态平衡方面发挥着重要作用。放牧是最高效的草地利用方式,家畜可通过选择性采食、游走践踏等行为,对土壤理化性质与微生物活性产生影响,同时改变植物群落的构成、结构及多样性,进而对生态系统功能产生影响^[2-5]。近年来,过度放牧干扰草地致使其出现不同程度的退化,草地的生产功能和生态功能也在不断下降^[6]。因此,在确保草原稳定性不受破坏的前提下,对草地资源进行合理的放牧利用至关重要。

草地植被是家畜的主要食物来源,也是草地畜牧业发展的关键物质基础^[7-8]。牧草营养品质作为一种评估草地资源的重要指标,不仅涵盖营养成分含量与可消化性两大维度,更直接关联家畜的生长发育进程和畜产品的品质^[9]。目前,通常用粗蛋白(Crude protein, CP),粗脂肪(Ether extract, EE),中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)的含量及产量作为评价牧草营养物质生产能力的指标^[10-11]。牧草生产营养品质受CP, EE, NDF及ADF的含量与产量两方面因素影响。其中,CP与EE是家畜生长发育的必需营养物质,也是衡量牧草营养品质优劣的重要指标之一,而纤维含量则主要对牧草的消化率、适口性以及采食量等产生影响^[12]。所以通常认为,CP和EE含量越高,牧草营养品质越好;纤维含量越高,则牧草营养品质越差^[13-14]。不同放牧季节^[15]、放牧强度^[16]下,牧草营养品质均存在差异。对照区的牧草EE与NDF含量明显高于轻度、中度和重度放牧区,中度放牧区牧草ADF含量高于其他放牧区,而重度放牧区牧草CA含量明显高于轻度、中度和对照区^[17]。姜晓红等^[18]对荒漠草原的研究表明,适度放牧区牧草的粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分、磷、钙等营养成分含量均显著高于禁牧区,而粗纤维、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量则明显降低。不同放牧强度还能通过干扰植物正常生长发育节律,改变植物茎叶比例和禾草分蘖枝条数,影响牧草品质^[19]。综上,放牧强度对牧草营养品质的影响目前尚未形成一致的研究结论,因此优势牧草营养

品质对放牧强度的动态响应规律仍需深入探讨。另有研究表明牧草生长也受到季节的限制,营养物质含量会随着生长阶段不同而不断发生改变^[20]。Ball等^[21]和谢敖云等^[22-23]研究发现,在牧草开始生长的阶段,CP含量较高,之后随着牧草不断生长,可消化的蛋白含量下降。也有研究表明生长季节改变后,牧草的木质化程度上升,粗纤维含量增加,同时导致牧草的养分含量下降^[24]。放牧草地植物不同的物候期以及放牧家畜的选择性采食使这些植物在生长期的协同进化过程中形成各自不同的生长发育节律,在时间上形成物候期的相互交错,不同的植物结构产生不同的营养等级^[25]。因此,不同放牧时间下牧草的营养品质存在差异,开展本研究具有必要性。

长期以来,大量研究表明,放牧强度与放牧时间均会对牧草营养品质产生显著影响。因此,探究牧草营养含量特征在不同放牧强度与放牧时间下的变化规律,具有重要的研究意义。本研究依托荒漠草原长期定位放牧试验平台,在牧草生长期6—9月,测定内蒙古四子王旗荒漠草原两种主要优势植物营养成分,分析在不同放牧强度与放牧时间下,牧草营养品质的动态变化规律。旨在确定适宜的载畜率以及放牧家畜的营养需求,为草地的合理利用、草地生产力的提升及草地生态的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验区位于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗境内的内蒙古农牧业科学院试验基地(北纬41°46′43.6″,东经111°53′41.7″,平均海拔1456 m)。本研究区地处中温带大陆性季风气候区,雨热同期;年均降水量约为235 mm,降水集中在6—9月。该试验地年均气温约为3.7℃,最热月份为7月,最冷月份为1月,≥10℃的积温为2200~2500℃。研究区属短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原地带性植被,建群种为短花针茅,优势种为无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*),其他常见主要伴生种有银灰旋花(*Convolvulus ammanni*)、木地肤(*Kochia*

prostrata)等。试验区植被密稀疏,总盖度平均为18%~25%,植物群落高度约5~7 cm。该试验区土壤类型多为淡栗钙土。

1.2 试验设计

放牧试验于2024年开始,采用完全随机区组试验设计,不同放牧试验小区被放牧围栏划分成3个区组。每个区组设置4个放牧强度,分别为不放牧对照(control, CK; 0羊单位·hm⁻²·半年⁻¹)、轻度放牧(light grazing, LG; 0.91羊单位·hm⁻²·半年⁻¹)、中度放牧(moderate grazing, MG; 1.82羊单位·hm⁻²·半年⁻¹)和重度放牧(heavy grazing, HG; 2.71羊单位·hm⁻²·半年⁻¹),每个放牧小区面积为4.4 hm²。放牧强度水平根据卫智军等人^[26-27]提出的短花针茅荒漠草原的理论载畜量进行设置。每年5—10月在LG, MG和HG处理小区放牧2岁蒙古绵羯羊,每天早晨6:00将绵羊驱赶至放牧区,18:00驱赶回畜圈休息,其余时间不放牧。

1.3 牧草样品采集与制备

2024年牧草生长旺盛期(6—9月),每月采集短花针茅和无芒隐子草两种优势牧草样品。采样时于每个区组内沿两条对角线随机取样,离地面割取生长状况一致的目标植物完整植株,同一条对角线上的同种植物样品混合后装入信封袋带回实验室。所有样品先经105℃烘箱杀青30 min,再于65℃烘干48 h至恒重;烘干后粉碎过筛,分别制备40目、100目及球磨粉末,用于后续试验分析。

1.4 测定项目及方法

粗蛋白利用全自动杜马斯定氮仪(N-Realyzer, 德国)测定;粗脂肪利用脂肪测试仪(VELP SER148/6, 意大利)测定;粗灰分采用550℃灼烧法(GB/T 6438—2007)测定;中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维利用纤维分析仪(ANKOM A220型,美国)测定。

1.5 数据处理

本研究利用Excel 2019软件对数据进行整理。利用Origin 2024软件进行双因素方差分析,检验放牧强度、放牧时间及其交互作用对短花针茅和无芒隐子草粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维5项营养指标的影响显著性;组间多重比较采用Tukey法,显著性水平设定为0.05。通过

Pearson相关性分析探究牧草各营养指标间的关联程度。

2 结果与分析

2.1 牧草基本特征的变化

短花针茅的高度、盖度、密度、地上生物量在各放牧区均高于无芒隐子草(图1)。短花针茅在CK, LG的高度显著高于MG, HG处理($P<0.05$);无芒隐子草的高度随放牧强度的增加呈显著下降趋势,CK最高, LG次之, MG和HG处理显著降低且两者之间无差异。短花针茅盖度在LG处理下最高,显著高于CK, MG, HG处理($P<0.05$);无芒隐子草的盖度随放牧强度增加呈下降趋势, CK, LG处理显著高于MG, HG处理($P<0.05$)。短花针茅的密度在HG处理下最高,且显著高于CK, LG, MG处理($P<0.05$);无芒隐子草密度在CK, LG, MG处理下均无显著差异。短花针茅的地上生物量随放牧强度增加呈下降趋势,且各放牧处理间无显著差异。无芒隐子草地上生物量在HG处理最高, CK次之,且显著高于MG处理($P<0.05$)。

2.2 粗蛋白含量的变化

放牧强度和时间对两种牧草CP含量影响极显著($P<0.0001$)(表1)。由图2可知,两种牧草CP含量随放牧强度增加均呈现先升高后降低的趋势,均以轻度放牧区最高,重度放牧区最低。短花针茅和无芒隐子草轻度放牧CP含量显著高于其他放牧强度($P<0.05$),且短花针茅中度放牧和重度放牧CP含量显著低于不放牧处理($P<0.05$);无芒隐子草7—9月重度放牧处理CP含量显著低于不放牧处理($P<0.05$)。两物种CP含量随放牧时间推移呈现逐渐下降的趋势,均表现为6月最高,9月最低,且短花针茅各月份间CP含量差异显著($P<0.05$)。

2.3 粗脂肪含量的变化

放牧强度和时间对两种牧草EE含量影响极显著($P<0.0001$)(表1)。由图3可知,短花针茅EE含量随放牧强度增加表现为先上升后降低的趋势。6—8月EE含量轻度放牧处理最高,不放牧处理最低,随着放牧时间延续EE含量呈现先上升后降低的趋势,8月EE含量显著高于其他月份($P<0.05$)。无芒隐子草在7—8月重度放牧处理EE含量显著低

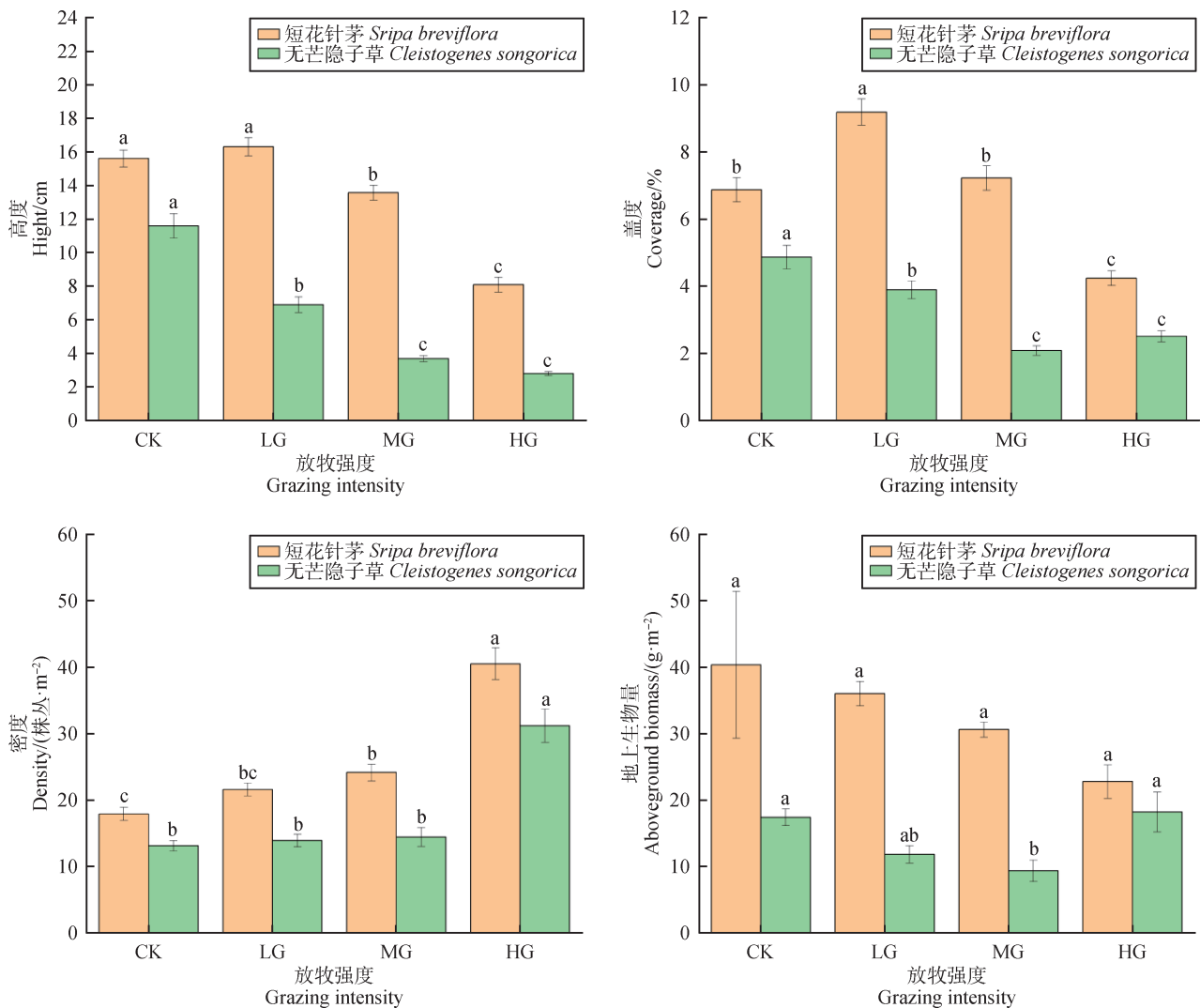


图1 生长季不同放牧强度对牧草基本特征的影响

Fig. 1 Effects of different grazing intensities on the basic characteristics of forage during the growing season

注:不同小写字母表示不同放牧强度间差异显著,显著性水平 $P < 0.05$,CK为不放牧对照,LG为轻度放牧处理,MG为中度放牧处理,HG为重度放牧处理

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different grazing intensity, the significance level $P < 0.05$, CK represents the non-grazing control group, LG the light grazing treatment, MG the moderate grazing treatment, and HG the heavy grazing treatment

于轻度放牧处理($P < 0.05$),9月不放牧处理EE含量显著高于其他放牧处理($P < 0.05$),随着放牧时间延续无芒隐子草EE含量呈现出先升高后降低的趋势,且EE含量在7月达到峰值。

2.4 粗灰分含量的变化

放牧强度和时间对两种牧草CA含量影响极显著($P < 0.0001$)(表1)。由图4可知,放牧强度和放牧时间对两种牧草处理CA含量均有显著影响($P < 0.05$)。短花针茅不放牧处理CA含量6月最高,轻度、中度和重度放牧处理CA含量9月最高,且均在8月最低;相同放牧时间下重度放牧处理

CA含量最高,6,7,9月不放牧、中度放牧处理CA含量显著高于轻度放牧($P < 0.05$)。无芒隐子草CA含量随放牧时间推移呈现先降低后升高的趋势,不放牧、轻度放牧和重度放牧处理均为6月最高,7月最低,相同放牧时间下随放牧强度增加CA含量逐渐升高,各月份重度放牧处理CA含量显著高于不放牧处理($P < 0.05$)。

2.5 中性洗涤纤维含量的变化

放牧强度和时间对两种牧草NDF含量影响极显著($P < 0.0001$)(表1)。由图5可知,短花针茅NDF含量随放牧强度增加呈现先降低后升高的趋

表 1 放牧强度和时间对牧草营养品质的方差分析

Table 1 Analysis of variance of forage nutritional quality under grazing intensity and duration

植物种类 Plant species	因子Factor	统计量 Statistic	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Ether extract	粗灰分 Crude ash	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	放牧时间 Grazing time	df	3	3	3	3	3
		F	1270.720	75.495	51.313	50.583	15.293
		P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	放牧强度 Grazing intensity	df	3	3	3	3	3
		F	584.036	8.929	53.920	33.825	13.064
		P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	放牧时间×放牧强度 Grazing time× Grazing intensity	df	9	9	9	9	9
		F	6.889	1.716	3.965	1.730	0.755
		P	<0.0001	0.099	0.000	0.096	0.657
无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	放牧时间 Grazing time	df	3	3	3	3	3
		F	178.450	66.572	18.669	292.672	51.236
		P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	放牧强度 Grazing intensity	df	3	3	3	3	3
		F	81.990	22.832	12.987	57.865	34.023
		P	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
	放牧时间×放牧强度 Grazing time× Grazing intensity	df	9	9	9	9	9
		F	2.011	11.389	2.005	1.265	0.255
		P	0.049	<0.0001	0.049	0.269	0.984

注: P值加粗表示对应解释变量下响应变量的差异显著, df是自由度, 用于衡量模型中独立参数的数量

Note: P values in bold indicate significant differences in response variables under corresponding explanatory variables, and df is the degrees of freedom, used to measure the number of independent parameters in a model

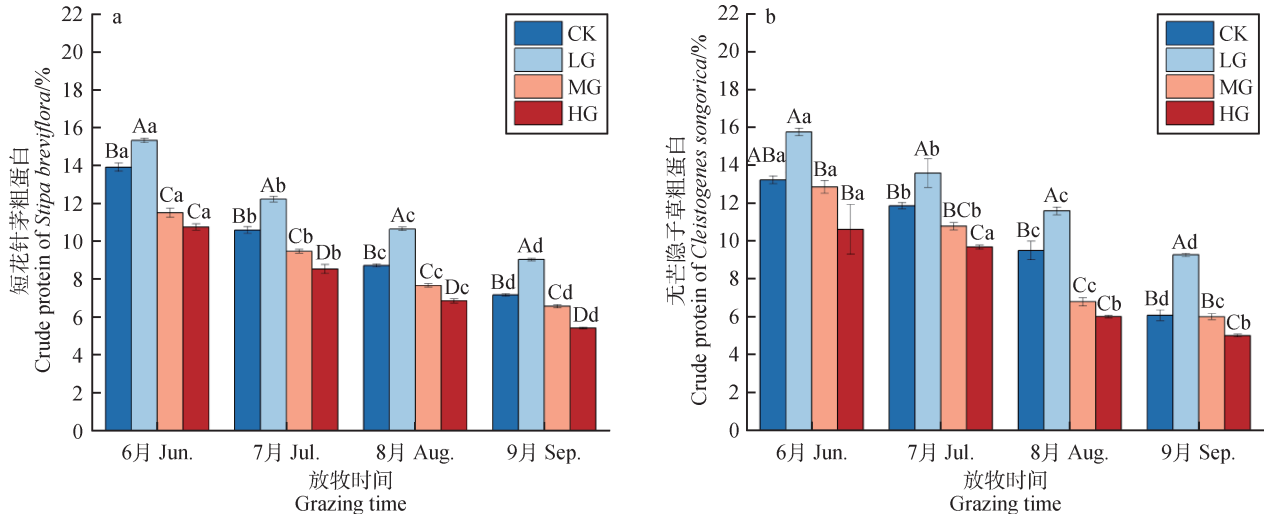


图 2 不同放牧强度下牧草粗蛋白含量随放牧时间的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of crude protein content of forage with grazing time under different grazing intensities

注: 不同大写字母表示相同放牧时间下不同放牧强度之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同放牧强度下不同放牧时间之间显著差异 ($P < 0.05$); a 表示短花针茅; b 表示无芒隐子草。下同

Note: Different capital letters indicate significant differences between different grazing intensities at the same grazing time ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences between different grazing times under the same grazing intensity ($P < 0.05$). a means *Stipa breviflora*; b indicates *Cleistogenes songorica*. The same as below

势, 重度放牧处理最高, 轻度放牧处理最低; 随放牧时间延续 NDF 含量逐渐升高, 且在 6 月最低, 9 月最高。无芒隐子草 NDF 含量随放牧强度增加呈现先

降低后升高的趋势, 重度放牧处理最高, 轻度放牧处理最低; 随放牧时间延续 NDF 含量先升高后降低, 6 月最低, 8 月最高。

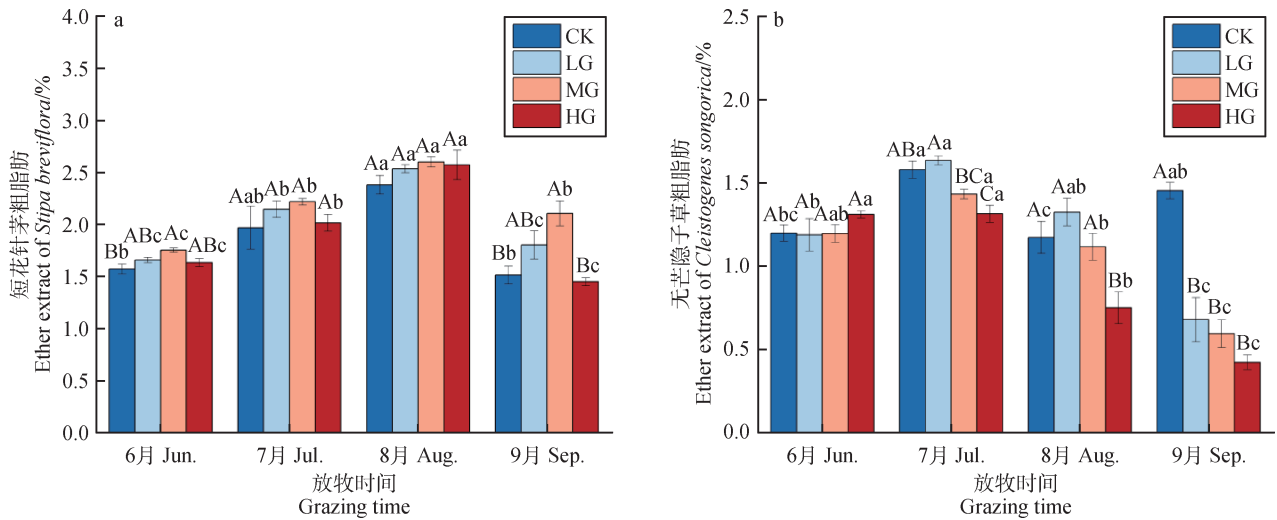


图3 不同放牧强度下牧草粗脂肪随放牧时间的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of ether extract content of forage with grazing time under different grazing intensities

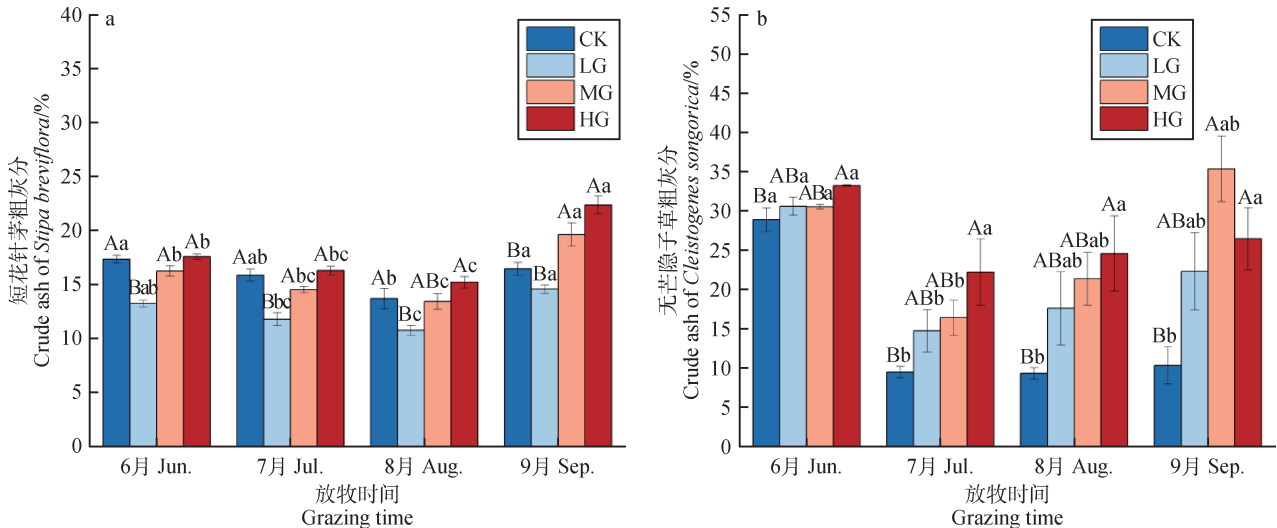


图4 不同放牧强度下牧草粗灰分含量随放牧时间的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of crude ash content of forage with grazing time under different grazing intensities

2.6 酸性洗涤纤维含量的变化

放牧强度和时间对两种牧草 ADF 含量影响极显著 ($P < 0.0001$) (表 1)。由图 6 可知,短花针茅 ADF 含量随放牧强度增加呈现先降低后升高趋势,6 月和 7 月中度、重度放牧处理显著高于不放牧和轻度放牧处理 ($P < 0.05$);随放牧时间延续 CA 含量呈现先升高后降低趋势,7 月最高,6 月最低,且多数月份间差异显著 ($P < 0.05$)。无芒隐子草 ADF 含量随放牧强度增加逐渐降低,不放牧处理最高,重度放牧处理最低,6 月和 9 月不放牧和轻度放牧处理显著高于中度、重度放牧处理 ($P < 0.05$),且 7、8 月不放牧显著高于重度放牧处理 ($P < 0.05$);随放牧时间延续 ADF 含量呈现先升高后降低趋势,7 月最高,6 月最低,7—9 月 ADF 含量与 6 月差异显著 ($P < 0.05$)。

2.7 牧草各营养品质之间的相关性分析

由图 7 可知,短花针茅 CP 含量与 CA, ADF, NDF 含量显著负相关,EE 含量与 CA 含量显著负相关, NDF 含量与 CA, ADF 含量显著正相关。无芒隐子草 NDF 含量与 CP, EE, CA 含量显著负相关,与 ADF 含量显著正相关, CP 含量与 EE 含量显著正相关, EE 含量与 CA 含量显著负相关。

3 讨论

3.1 不同放牧强度对牧草营养品质的影响

牧草营养成分含量是衡量其营养品质的核心指标,直接关系到家畜生长发育与生产性能。本研究发现不同放牧强度会改变荒漠草原优势牧草营

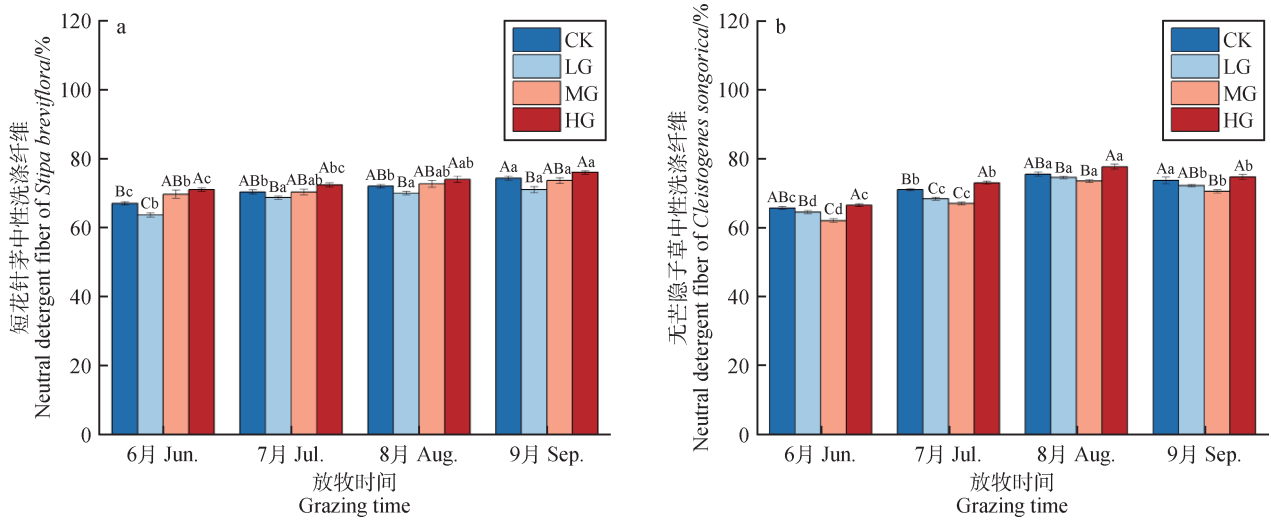


图5 不同放牧强度下牧草中性洗涤纤维随放牧时间的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of forage neutral washing fibers with grazing time under different grazing intensities

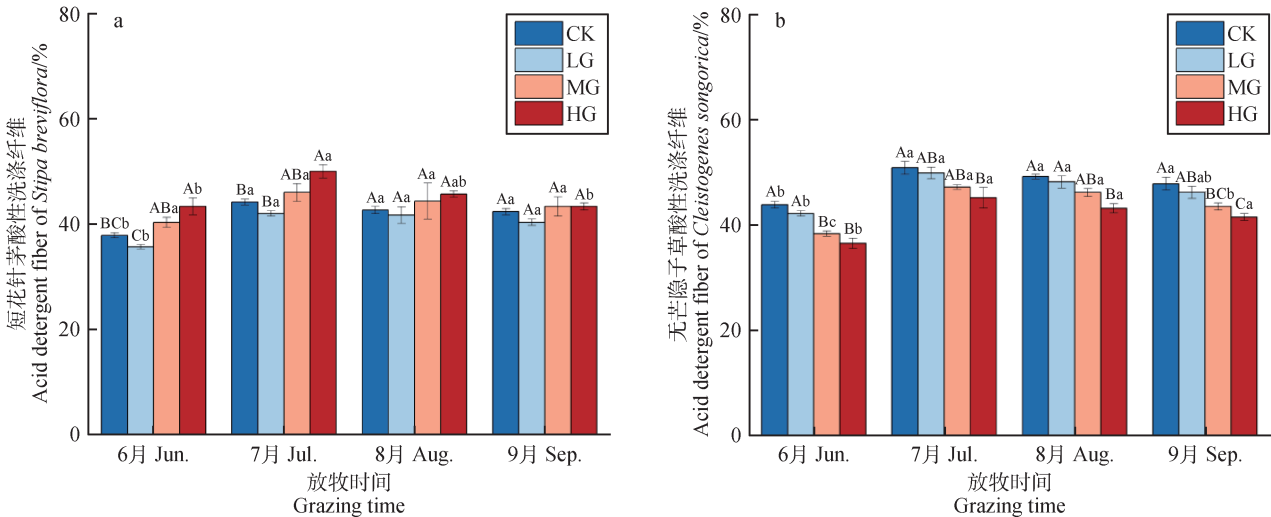


图6 不同放牧强度下牧草酸性洗涤纤维随放牧时间的动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of forage acid washing fibers with grazing time under different grazing intensities

养物质含量,这与以往研究结果一致^[28]。本研究区荒漠草原中,轻度放牧区牧草 NDF 与 ADF 含量与重度放牧区相比显著降低,随着放牧强度增加 NDF 与 ADF 含量呈上升趋势,这与鞠馨等人^[29]研究结果一致。这可能是由以下原因造成的:首先,放牧家畜的踩踏行为会扰动草地原有平衡,改变土壤养分分配模式,而土壤全氮作为牧草中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量的重要调控因子^[30],土壤养分分配模式的改变进而会对牧草 NDF 与 ADF 含量产生影响。其次,重度放牧还会削弱牧草根系活力,导致土壤氮素吸收受限,植物体内 C/N 比值升高,研究表明土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与植株 C/N 比值的变化显著影响 NDF 与 ADF 积累,氮素限制下纤维素合成相对增强,导致 NDF 含量上升,而 ADF 含

量受到木质素合成影响也会有上升趋势^[31]。最后,随着放牧强度增加,家畜对牧草采食压力增大,被采食过后的新生牧草叶片往往更厚,纤维密度增加。叶片厚度增加伴随细胞壁纤维素沉积的提升,使得 NDF 含量呈现上升趋势^[32]。

CP 也是衡量牧草营养品质的重要指标之一^[13],牧草中 CP 含量较高表明其作为饲草可利用养分含量高、品质好^[33]。有研究指出^[34]随着放牧强度增加牧草中 CP 含量升高,本研究结果与其结论存在差异。本研究表明,总体上随着放牧强度增加,牧草 CP 含量先升高后降低,轻度放牧区的 CP 含量显著上升,重度放牧不利于 CP 的积累。其潜在成因可归结为以下方面:一方面从生理代谢角度分析,轻度放牧对牧草的适度采食可形成“补偿性

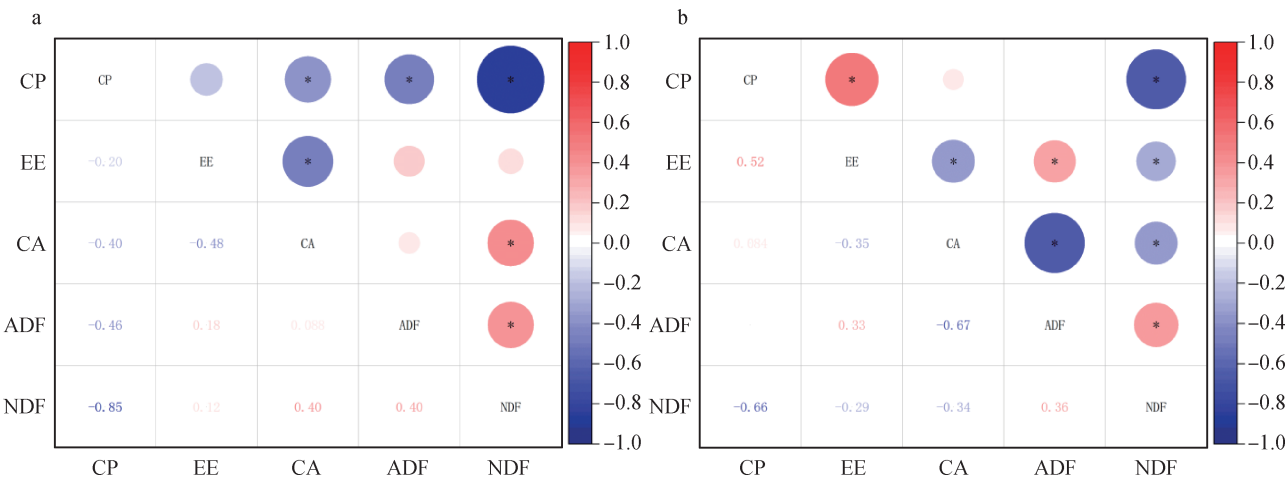


图 7 牧草各营养品质间的相关分析

Fig. 7 Correlation analysis between the nutritional qualities of forage

注: *表示 $P < 0.05$; CP 表示粗蛋白; EE 表示粗脂肪; CA 表示粗灰分; ADF 表示酸性洗涤纤维; NDF 表示中性洗涤纤维; a 表示短花针茅; b 表示无芒隐子草

Note: * indicates $P < 0.05$; CP, crude protein; EE, ether extract; CA, crude ash; ADF, acidic detergent fiber; NDF, neutral detergent fiber; a means *stipa breviflora*; b indicates *Cleistogenes songorica*

生长效应”^[35]。牧草被采食部分老叶后,会启动自身生长调节机制,将光合产物与氮素更多分配到新生叶片的再生,而新生组织中细胞分裂与蛋白质合成代谢更为旺盛,使得 CP 积累量显著提升。同时轻度放牧压力促使牧草根系氮素吸收能力增强,叶片叶绿素含量与光合速率提升,促进蛋白质合成,使得 CP 含量增加,而重度放牧时,过度采食导致牧草生长受阻,叶片面积大幅度减少,光合作用减弱,氮素吸收与利用效率降低,蛋白质合成原料不足,CP 含量下降^[36]。另一方面,放牧过程中家畜粪便和尿液可增加土壤养分。轻度放牧时,适量粪便归还土壤,增加土壤氮素等养分含量,为牧草吸收利用提供更多原料,有利于蛋白质合成,提高 CP 含量。但重度放牧时,家畜过度践踏会破坏土壤结构,降低土壤通气性和透水性,影响牧草根系生长和养分吸收,同时大量家畜采食导致地上生物量减少,归还土壤的有机质也减少,土壤养分供应不足,进而影响牧草 CP 含量^[37]。结合本研究牧草生长特征来看,轻度放牧下短花针茅盖度、无芒隐子草高度均维持较高水平,植株光合面积充足,物质合成效率提升,且两种牧草 CP 含量与 NDF 含量均呈显著负相关,表明植株优先将光合产物分配至蛋白质合成而非纤维类物质积累,这一分配策略,印证了适度放牧对牧草营养的改善作用。重度放牧导致 CP 含量下降、NDF 含量升高,核心在于生物量与碳氮分配失衡:短花针茅地上生物量随放牧强度下

降,生物量不足限制氮素吸收,植株被迫优先合成纤维(如细胞壁)以维持生长,也与 CP 含量和 NDF 含量负相关结果直接呼应。

牧草中 EE 含量可以反映其消化特性。本研究表明短花针茅 EE 含量随着放牧强度增加表现为先上升后降低,无芒隐子草 EE 含量在 7 月、8 月和 9 月随着放牧强度增加呈现下降趋势,重度放牧处理下 EE 含量显著降低,与张丞宇等人^[38]研究结果一致。其原因可能是过度放牧会降低参与代谢的酶活性,减少土壤可利用养分含量,进而减缓植物体内养分累积,最终导致植物群落 EE 含量减少^[39]。另一方面,随着放牧强度增加,会通过改变植物种类组成及其比例从而对草地品质产生影响,草地植物物种丰富可以提高草地资源利用效率,促进植物生长,增强植物代谢,使得脂肪合成与储存增加^[40]。牧草中的 CA 大部分是钙、磷、钾的氧化物,反映了牧草矿质养分的吸收和总体含量^[41],CA 含量的变化也会影响牧草消化率。本研究表明,短花针茅和无芒隐子草 CA 含量随放牧强度增加而增加,这可能是由于荒漠草原土壤通常富含矿物质,随着放牧强度增加,植物为了更好地生长发育会通过根系从土壤中吸收更多矿物质,牧草中矿物质成分积累,进而使得 CA 含量增高^[42]。本研究表明 EE 与 CA 的响应具有物种特异性:短花针茅轻度放牧处理 EE 含量最高且 8 月达峰,此时其生物量处于旺盛期,光合产物为脂肪合成提供充足碳源;无芒隐子草重度放

牧处理7,8月EE显著降低,可能与其高度、生物量降低导致的叶绿体数量减少脂肪合成场所减少相关。CA含量方面,重度放牧下两种牧草CA含量均显著高于对照,且短花针茅EE含量与CA含量呈负相关,可能说明植株通过增加矿物质吸收加固细胞壁以抵抗劣势环境与放牧胁迫。

3.2 不同放牧时间对牧草营养品质的影响

本研究发现荒漠草原优势种6,7月的CP含量显著高于8月($P<0.05$),这与王莹等人^[43]研究结果一致。荒漠草原优势牧草CP含量6月最高,之后逐渐降低,这可能与研究区牧草的物候期有关。5,6月份属于牧草返青期,随太阳辐射渐强、大气温度和土壤温度增加,地表消融,提高了草原土壤含水量,为荒漠植物提供了良好的水热条件,促进了牧草返青初期营养成分的快速积累^[44],最终CP含量在6月达到峰值。本研究发现优势牧草NDF,ADF在6月最低,之后逐渐升高,这与张鲜花等人^[45]在新疆褐牛放牧试验研究结果一致。6月份牧草处于快速生长期,牧草细胞壁(纤维素、半纤维素、木质素)尚未充分发育,可溶性碳水化合物和蛋白质含量较高,纤维化程度低,ADF,NDF含量低。7月份之后高温加速植物成熟,茎秆比例增加,半纤维素积累,NDF含量上升。部分牧草进入生殖生长期,木质素沉积增多,导致ADF含量升高^[46]。但在8,9月ADF含量没有明显上升,这可能与草地类型和当年降水偏多有关。董全民等人^[47]在高寒混播草地研究中指出放牧时间对EE和CA含量的影响不显著,本研究与其研究结果不一致,这可能是由于放牧草地类型不一致导致的。由于荒漠草原土壤矿质元素丰富,6—7月牧草快速生长,根系活跃,矿物质吸收转化快,CA下降,但随着放牧时间延续,牧草趋于成熟,Ca,P等物质在细胞壁沉积,7,8,9月灰分含量逐渐上升^[48]。6—8月牧草由返青期进入青草期,牧草光合速率升高,碳同化产物(糖、脂质)积累,EE含量随之提升;9月牧草进入枯黄期,植株成熟,碳向纤维转化,脂质占比相对减少,EE含量下降^[49]。

4 结论

研究表明,轻度放牧是维持荒漠草原两种优势牧草营养品质的适宜放牧强度。轻度放牧下牧草CP,EE含量较高,NDF与ADF含量较低,有

利于改善牧草适口性并提升其营养价值;而中度与重度放牧会显著降低CP含量,并促进纤维类物质积累,致使牧草营养品质下降。放牧时间对优势牧草营养品质同样存在显著影响,其中6月牧草营养品质最佳,CP含量最高且纤维类物质含量最低;9月牧草营养品质相对较差,不同月份间牧草营养差异显著,可为该区域草原放牧时间的优化调控提供理论依据。此外,牧草各营养品质指标间存在显著相关关系,CP含量与NDF,ADF含量总体呈显著负相关,而NDF与ADF含量之间呈显著正相关。

参考文献

- [1] 刘利珍. 内蒙古草原畜牧业经济可持续发展的法律问题探究[J]. 前沿,2017(1):68-72
LIU L Z. Legal issues on sustainable development of grassland animal husbandry economy in Inner Mongolia [J]. Forward Position,2017(1):68-72
- [2] LI L,ZHANG J,HE X Z,et al. Different effects of sheep excrement type and supply level on plant and soil C:N:P stoichiometry in a typical steppe on the Loess Plateau[J]. Plant and Soil, 2021,462(1):45-58
- [3] ZHANG R Y,WANG Z W,HAN G D,et al. Grazing induced changes in plant diversity is a critical factor controlling grassland productivity in the Desert Steppe,Northern China[J]. Agriculture,Ecosystems & Environment,2018,265:73-83
- [4] LI W H,HOOVER D U,WU L J,et al. Grazing regime alters plant community structure via patch-scale diversity in semiarid grasslands[J]. Ecosphere,2021,12(6):e03547
- [5] ZHANG M N,LI G Y,LIU B,et al. Effects of herbivore assemblage on the spatial heterogeneity of soil nitrogen in eastern Eurasian steppe[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 57(8):1551-1560
- [6] 刘玉祯,赵新全,董全民,等. 放牧对草地生态系统结构与功能影响的研究进展[J]. 草地学报,2023,31(8):2253-2262
LIU Y Z,ZHAO X Q,DONG Q M,et al. Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem structure and function[J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(8):2253-2262
- [7] HOPKINS A. Grass: its production and utilization [M]. 3rd Edition. London:Blackwell Science,2000:140-195
- [8] 张春林,韩向敏,郎侠,等. 青藏高原东北缘不同草地类型牧草营养品质动态[J]. 草业科学,2019,36(3):763-771
ZHANG C L,HAN X M,LANG X,et al. Forage nutrition from different grassland types at different growth stages on the northeast margin of the Qinghai - Tibet Plateau[J]. Pratacul-tural Science,2019,36(3):763-771
- [9] 霍秀文,云锦凤,米福贵,等. 牧草生物技术研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报,2006,27(3):140-147
HUO X W,YUN J F,MI F G,et al. Advances in genetic transformation of forage[J]. Journal of Inner Mongolia Agricul-

- tural University (Natural Science Edition), 2006, 27 (3) : 140-147
- [10] CHERNEY J H, HALL M V. Forage quality in perspective[R]. Agronomy Facts 30. University Park, PA: Pennsylvania State University, College of Agricultural Sciences, 2007:2
- [11] SCHAUER C S, BOHNERT D W, GANSKOPP D C, et al. Influence of protein supplementation frequency on cows consuming low-quality forage: performance, grazing behavior, and variation in supplement intake[J]. Journal of Animal Science, 2005, 83(7):1715-1725
- [12] 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
- [13] BARNES R F, NELSON C J, COLLINS M, et al. Forages: an introduction to grassland agriculture [M]. 6th edition. Ames. :Iowa State University Press, 2003:363-390
- [14] 王宏辉, 李瑜鑫, 王建洲, 等. 藏东南地区草地资源与营养评价[J]. 草业科学, 2010, 27(1):56-59
WANG H H, LI Y X, WANG J Z, et al. The evaluation of grassland resources and its nutrition in Southeastern Tibet[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(1):56-59
- [15] JENSEN K B, ROBINS J G, RIGBY C, et al. Comparative trends in forage nutritional quality across the growing season in thirteen grasses[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2016: CJPS-2015-0328
- [16] 张正义, 胡逸, 张振豪, 等. 高寒草甸功能群组成及营养品质对不同放牧强度的响应[J]. 草业科学, 2024, 41(1):151-162
ZHANG Z Y, HU Y, ZHANG Z H, et al. Responses of Alpine meadow functional group composition and nutrient quality to grazing intensity[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(1):151-162
- [17] 乌鲁木齐. 布仁巴依尔, 敖特根, 乌依勒斯, 等. 不同放牧强度和时期对内蒙古克什茅草原牧草养分含量的影响[J]. 草业与畜牧, 2013(1):5-9
WU Lumushan. burenbayier, AO T G, WU Y, et al. The effects of different grazing intensities and periods on forage nutritive contents in Inner Mongolia *Stipa krylovii* grassland [J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2013(1):5-9
- [18] 姜晓红, 宝力道, 阿拉腾布力格, 等. 不同放牧强度对荒漠草原牧草微量元素和营养成分的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2021, 42(2):91-96
JIANG X H, BAO L D, A L, et al. Effects of different grazing intensities on trace elements and nutritional components of forage grasses in desert steppe [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2021, 42(2):91-96
- [19] MYSTERUD A, HESSEN D O, MOBÆK R, et al. Plant quality, seasonality and sheep grazing in an Alpine ecosystem[J]. Basic and Applied Ecology, 2011, 12(3):195-206
- [20] 刘艾, 刘德福. 我国草地生物量研究概述[J]. 内蒙古草业, 2005, 17(1):7-11, 52
LIU A, LIU D F. Overview of grassland biomass research in China[J]. Journal of Inner Mongolia Prataculture, 2005, 17(1): 7-11, 52
- [21] BALL R, WAGNER D G, POWELL J, et al. Plant chemical composition and digestibility of rangeland forage[J]. Journal of Animal Science, 1976, 43(2):54-55
- [22] 谢敖云, 柴沙驼, 王万邦, 等. 高山草甸草地牧草产量及其营养变化规律[J]. 青海畜牧兽医杂志, 1996, 26(2):8-10
XIE A Y, CHAI S T, WANG W B, et al. The herbage yield and the nutrient variation in mountain meadow[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 1996, 26(2):8-10
- [23] 谢敖云, 刘书杰, 薛白, 等. 不同施氮量对高山草甸草地牧草产量及营养成分的影响[J]. 青海畜牧兽医杂志, 1996, 26(2):5-7
XIE A Y, LIU S J, XUE B, et al. The effect of nitrogen treatments on herbage yield and nutrient content in mountain meadow[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 1996, 26(2):5-7
- [24] 金花, 苏楞高娃, 敖特根, 等. 荒漠草原草地营养动态研究[J]. 内蒙古草业, 2007(3):47-49
JIN H, SU L, AO T G, et al. Study on nutritional dynamics of desert grassland[J]. Inner Mongolia Prataculture, 2007(3):47-49
- [25] STEBBINS G L. Coevolution of grasses and herbivores[J]. Annals of the Missouri Botanical Garden, 1981, 68(1):75-86
- [26] 卫智军, 韩国栋, 赵钢, 等. 中国荒漠草原生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013:344-381
WEI Z J, HAN G D, ZHAO G, et al. Research on the Eco-system of Desert Steppe in China[M]. Beijing: Science Press, 2013:344-381
- [27] 卫智军, 韩国栋, 杨静, 等. 短花针茅荒漠草原植物群落特征对不同载畜率水平的响应[J]. 中国草地, 2000(6):1-5
WEI Z J, HAN G D, YANG J, et al. The response of *Stipa breviflora* community to stocking rate[J]. Grassland of China, 2000(6):1-5
- [28] SCHÖNBACH P, WAN H, GIERUS M, et al. Effects of grazing and precipitation on herbage production, herbage nutritive value and performance of sheep in continental steppe[J]. Grass and Forage Science, 2012, 67(4):535-545
- [29] 鞠馨, 王新雅, 王冰莹, 等. 放牧强度对荒漠草原植物群落组成和营养品质的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(9):2962-2972
JU X, WANG X Y, WANG B Y, et al. Effects of grazing intensity on plant community composition and nutrient quality of forage in a desert steppe [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33 (9):2962-2972
- [30] 鲁星鑫, 陈天赐, 尉剑飞, 等. 新疆伊犁不同草地类型牧草营养价值及其影响因素[J]. 草业科学, 2025, 12(12):3182-3196
LU X X, CHEN T C, YU J F, et al. Nutritional value of forages and their impact factors across different grassland types in Yili, Xinjiang[J]. Pratacultural Science, 2025, 12(12):3182-3196
- [31] 万里强, 李向林, 陈玮玮, 等. 不同放牧强度对南方人工草地植被特征的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(1):290-294
WAN L Q, LI X L, CHEN W W, et al. Effects of different stocking rates on vegetation traits of cultivated pastures in

- Southern China [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(1): 290-294
- [32] WU J P, GONG X Y, YAO X X, et al. Plant communities responding to grazing pressure by sheep in an Alpine meadow [J]. Translational Animal Science, 2020, 4(2): txaa075
- [33] 刘程, 李慧, 黄晶, 等. 天然草地牧草营养变化及羔羊消化代谢、能量需求的研究 [J]. 草地学报, 2023, 31(11): 3415-3422
- LIU C, LI H, HUANG J, et al. Study on the changes of forage nutrient and the digestive metabolism and energy requirements of lambs in native grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11): 3415-3422
- [34] 微微, 卫智军, 宝路如, 等. 典型草原不同生境条件下植被群落特征与营养物质变化动态研究 [J]. 内蒙古草业, 2009, 21(2): 41-44
- WEI W, WEI Z J, BAO L R, et al. Dynamic study on vegetation community characteristics and nutrient changes in different habitats of typical grassland [J]. Inner Mongolia Prataculture, 2009, 21(2): 41-44
- [35] 汪诗平, 王艳芬. 不同放牧率下糙隐子草种群补偿性生长的研究 [J]. 植物学报, 2001(4): 413-418
- WANG S P, WANG Y F. Study on over-compensation growth of *Cleistogenes squarrosa* population in Inner Mongolia steppe [J]. Acta Botanica Sinica, 2001(4): 413-418
- [36] 付娟娟, 益西措姆, 陈浩, 等. 青藏高原高山嵩草甸优势植物营养成分对放牧的响应 [J]. 草业科学, 2013, 30(4): 560-565
- FU J J, YI X, CHEN H, et al. Responses of dominant plant nutrients to grazing intensity in *Kobresia pygmaea* meadow of the Qinghai-Tibet plateau [J]. Pratacultural Science, 2013, 30(4): 560-565
- [37] 王芳芳, 徐欢, 李婷, 等. 放牧对草地土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3277-3284
- WANG F F, XU H, LI T, et al. Effects and mechanisms of grazing on key processes of soil nitrogen cycling in grassland: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3277-3284
- [38] 张丞宇, 牛壮, 王彦庆, 等. 放牧强度对小叶章草场地上现存量及营养成分动态变化的影响 [J]. 中国草地学报, 2014, 36(4): 18-23
- ZHANG C Y, NIU Z, WANG Y Q, et al. Effects of grazing intensity on the aboveground present biomass and dynamic changes of nutrient components in *Deyeuxia angustifolia* meadow [J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(4): 18-23
- [39] KLEINEBECKER T, WEBER H, HÖLZEL N. Effects of grazing on seasonal variation of aboveground biomass quality in calcareous grasslands [J]. Plant Ecology, 2011, 212(9): 1563-1576
- [40] 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(S1): 165-172
- [41] 马晓霞, 秘一先, 陈宏亮, 等. 14个引进紫花苜蓿品种在宁夏引黄灌区的生产性能和营养价值综合分析 [J]. 草业科学, 2022, 39(2): 328-342
- MA X X, BI Y X, CHEN H L, et al. Comprehensive analysis of production performance and nutritional value of 14 alfalfa varieties in the Ningxia Yellow River diversion irrigation area [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(2): 328-342
- [42] 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
- [43] 王莹, 朱国栋, 郭娜, 等. 内蒙古荒漠草原主要植物营养成分含量及消化率的月动态变化分析 [J]. 畜牧与饲料科学, 2019, 40(5): 37-43
- WANG Y, ZHU G D, GUO N, et al. Monthly dynamic changes of nutrient content and digestibility of main plants in desert steppe of Inner Mongolia [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2019, 40(5): 37-43
- [44] 郭凤清, 孙书洪, 曾辉, 等. 海北高寒草甸返青期土壤温度与水分动态变化 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 408-414
- GUO F Q, SUN S H, ZENG H, et al. Dynamic change of soil temperature and moisture during re-greening period on Alpine meadow at Haibei station [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(3): 408-414
- [45] 张鲜花, 朱进忠, 孙宗玖, 等. 放牧强度对草地牧草现存量及养分动态的影响 [J]. 草业科学, 2014, 31(1): 116-124
- ZHANG X H, ZHU J Z, SUN Z J, et al. Influence of grazing intensity on the aboveground biomass and nutrient dynamics of community [J]. Pratacultural Science, 2014, 31(1): 116-124
- [46] 潘发明, 刘函伊, 常生华. 放牧和季节对荒漠草原优势牧草养分含量和消化性能的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2025, 60(3): 204-212
- PAN F M, LIU H Y, CHANG S H. The effect of grazing and season on nutrient content and digestibility of dominant forage grasses in desert steppe [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2025, 60(3): 204-212
- [47] 董全民, 赵新全, 马玉寿. 放牧强度和放牧时间对高寒混播草地牧草营养含量的影响 [J]. 中国草地学报, 2007, 29(4): 67-73
- DONG Q M, ZHAO X Q, MA Y S. Effects of grazing intensity and time on forage nutrition contents in Alpine mixed-sown grassland [J]. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(4): 67-73
- [48] 潘发明, 常生华, 王国栋, 等. 物候期对放牧牦牛瘤胃液、牧草中脂肪酸及乳脂中共轭亚油酸组成的影响及其相关性分析 [J]. 草业学报, 2021, 30(3): 110-120
- PAN F M, CHANG S H, WANG G D, et al. Effects of phenological period on the composition of fatty acids and conjugated linoleic acids in rumen fluid, forage and milk fat of grazing yak and their correlation analysis [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(3): 110-120
- [49] BABER K. The effects of defoliation on the nutritive value of common forage grasses: first Place, Darrel S. Metcalfe Journalism Contest; Written as a technical paper with a target audience of researchers [J]. Natural Sciences Education, 2020, 49: e20003