中国科学: 生命科学 2026 年 第 56 卷 第 3 期: 671 ~ 684
SCIENTIA SINICA Vitae lifecn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

支撑“标准草”概念的牧草养分评估指标体系初探

李妮妮[1], 田地[1*], 陈冰瑞[1], 徐龙超[2], 刘智全[3], 贺志雄[4], 钟瑾[5], 景海春[3], 方精云[6]

1. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083
2. 太原理工大学环境与生态学院, 太原 030000
3. 饲草种质高效设计与利用全国重点实验室, 中国科学院植物研究所, 北京 100093
4. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125
5. 中国科学院微生物研究所, 北京 100101
6. 北京大学生态研究中心, 北京 100871
* 联系人, E-mail: tiandi@bjfu.edu.cn

收稿日期: 2025-08-09; 接受日期: 2025-11-19; 网络版发表日期: 2026-02-09
中国科学院战略性先导科技专项(批准号: XDA26050000)资助

摘要 羊草(*Leymus chinensis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、燕麦(*Avena sativa*)和甜高粱(*Sorghum bicolor*)是我国北方4种常见的优势牧草. 本研究梳理了国内外7个单位的牧草质量标准, 通过在内蒙古谢尔塔拉农牧场开展种植试验, 解析了四种牧草全生育期的养分动态, 并对比了其收获期品质与国内外标准的差异. 结果发现: (ⅰ) 以干草制作为主要利用方式, 紫花苜蓿宜在盛花期收获, 燕麦在蜡熟期收获, 甜高粱和羊草分别在拔节末期和抽穗期收获, 目前仅紫花苜蓿近乎达到我国或美国特级品质标准; (ⅱ) 综合分析发现, 粗蛋白(CP)、瘤胃降解蛋白(RDP)、非纤维性碳水化合物(NFC)、非结构性碳水化合物(NSC)等是影响牧草品质的关键指标; (ⅲ) 本研究同时关注了牧草RDP:NFC, NFC:NDF, SFA:UFA等比值在生育期内的变化, 以期将评价视角延伸至家畜对养分的吸收利用层面. 本研究为构建我国北方优质饲草的标准化评价体系, 推动“标准草”从概念走向实践奠定了科学基础.

关键词 生态草牧业, 优势牧草, 养分指标, 化学计量, 标准草

在我国现行粮食消费结构中, 饲草已成为“大粮食安全”的重要组成部分[1], 其供给稳定性对保障畜牧业发展至关重要. 当前我国对于优质饲草仍存在较高的对外依赖性, 紫花苜蓿进口需求量在2012~2022年间由145万吨持续增长至240万吨, 替代饲粮高粱的净进口占比也由2012年不到1%攀升至2023年的62.73%, 且供需缺口仍持续存在[2~4]. 因此, 确保饲粮供给稳定, 尤其是提升高品质饲草的自给能力, 已成为当前化解我国粮食安全潜在风险、支撑畜牧业高质量发展的重要突破口.

随着畜牧业对优质饲草需求的日益增长, 我国牧草品质与供给之间的矛盾日益凸显. 当前, 各产区牧草品质普遍欠佳(网络版附表1), 且牧草养分含量与发达国家优质牧草养分评判标准尚存差距(网络版附表2), 这已成为制约我国畜牧业高质量发展的关键瓶颈. 针对当前我国牧草供给侧矛盾, “生态草牧业”理念应

引用格式: 李妮妮, 田地, 陈冰瑞, 等. 支撑“标准草”概念的牧草养分评估指标体系初探. 中国科学: 生命科学, 2026, 56: 671–684
Li N N, Tian D, Chen B R, et al. A preliminary study on the evaluation index system of forage nutrients for the concept of “Standard Forage” (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2026, 56: 671–684, doi: 10.1360/SSV-2025-0108

© 2026《中国科学》杂志社 www.scichina.com
https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

运而生, 倡导发展高效高产的人工草场, 通过从品种选育到养殖用粮终端的“种草-制草-养畜”全流程调控, 实现草产品全产业链标准化生产, 打造各生产环节品质达标的“标准草”, 最终致力于用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复, 实现牧区“生产-生活-生态”的协调发展[5,6].

为实现上述目标, 需构建完善牧草及草产品的评价标准体系, 服务于优质饲草生产, 提升各生产环节耦合效率. 2025年1月, 农业农村部发布了两项行业标准, 采用综合指数法评定青贮玉米及青贮苜蓿质量, 推动青贮饲料行业标准化进程[7,8], 但关于干草及草粉等粗饲料, 现行行业标准仍主要关注粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、粗灰分等单一指标的分级评价(网络版附表1和2), 国内尚未建立统一的优质牧草质量评价体系[9]. 现有研究对重要牧草营养状况的系统评估不足, 更缺乏对养分间计量关系的深入探讨, 导致“标准草”的生产在实践中缺乏定量化依据. 因此, 我国牧草品质评价体系仍需进一步探索与完善.

羊草(*Leymus chinensis*)是呼伦贝尔地区禾本科牧草的典型代表[10], 被称为“牧草中的细粮”[11]. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是多年生豆科植物, 是世界上种植最早、最广泛的牧草品种之一[12]. 甜高粱(*Sorghum bicolor*)是禾本科高粱属饲料作物, 是极具潜力的优良青贮饲料[13]. 燕麦(*Avena sativa*)是我国北方冷凉、干旱地区广泛种植的禾本科作物, 已成为呼伦贝尔地区栽培草地和冬春补饲的优选饲草[14]. 以上四种牧草在呼伦贝尔农垦地区广泛利用, 也是草牧业全产业链中的重点研究物种. 为完善我国牧草品质评价体系, 本研究以上述四种牧草作为研究对象, 关注牧草在生育期内的养分变化特征, 从养分计量角度在种草环节为“标准草”的生产提供评判依据, 以提高产业链下游草产品的饲用价值和生产效率, 预期达到以下目标: (ⅰ) 阐明四种重要牧草生物量与养分在关键生育期内的动态变化规律, 初步确定四种牧草在呼伦贝尔地区的最佳收获期; (ⅱ) 厘清呼伦贝尔地区四种重要牧草收获后养分含量与国内外标准间的差异, 为牧草营养与国际标准接轨提供参考; (ⅲ) 发掘影响牧草品质的重要指标, 同时关注牧草养分间的重要计量关系, 从养分平衡的角度为构建牧草养分评估指标体系提供参考, 在种草环节为“标准草”的判定打下基础, 并为牧户和企业实际生产提供理论指导.

1 材料与研究方法

1.1 牧草种植试验地概况

牧草(苜蓿、燕麦和甜高粱)种植试验地位于呼伦贝尔市海拉尔区谢尔塔拉生态草牧业示范区(49°21′N, 120°06′E), 属中温带大陆性草原气候, 雨热同期, 夏季高温多雨, 冬季寒冷, 气温年较差较大, 年平均降雨量为400 mm. 土壤以黑钙土和暗栗钙土为主, 全氮含量2.04 g/kg, 全磷含量0.50 g/kg, 全钾含量14.56 g/kg[15]. 天然羊草试验地为谢尔塔拉生态草牧业实验区内不受人工干预的天然草场, 采样区域固定, 区域内以羊草为优势种, 羊草覆盖率达90%以上.

1.2 牧草品种选择与实验设计

按照呼伦贝尔农垦一线生产常采用的品种进行牧草品种选择, 其中紫花苜蓿选择公农5号, 燕麦选择坝莜18号, 甜高粱选择科甜30号, 羊草为天然草场的野生种.

2022年在试验区设置紫花苜蓿、燕麦、甜高粱3种牧草单作模式, 每种种植模式重复3次, 4种牧草共设12个小区. 3种牧草在完全自然降雨条件下生长, 田间管理措施一致. 4种牧草在不同生育期(表1)采用刈割法在样地内进行完全随机取样, 采样面积为1 m×1 m, 每种牧草各生育时期采集的样品设置3个重复, 样品采集皆选取长势均匀区域, 刈割后立即称量计算鲜草产量.

1.3 牧草营养指标及检测方法

将采集的四种牧草鲜草迅速带回实验室, 取一半称重后置于烘箱中在105℃下杀青30 min, 然后在65℃下烘干至恒重, 称重测定干物质和水分含量, 随后使用粉碎机研磨, 过100目筛后进行牧草养分含量测定. 使用元素分析仪测定牧草碳(C)含量. 采用近红外光谱(NIRS)技术, 使用FOSS 5000型号近红外分析仪, 对照美国CVAS数据库进行光谱扫描分析, 测定了蛋白质类、碳水化合物类、脂肪类及元素类四类共计23个指标, 其中蛋白质类包括粗蛋白(CP)、可溶性蛋白(SP)、瘤胃降解蛋白(RDP)、氨态氮(NH3CPE)、中性洗涤不溶蛋白(NDICP)、酸性洗涤不溶蛋白(ADICP), 碳水化合物类包括淀粉(starch)、非结构性碳水化合物(NSC)、非纤维性碳水化合物(NFC)、中性洗涤纤维(NDF)、

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

表 1　试验区4种牧草采样时期

Table 1　Sampling period of four forage species in the experiment

牧草	品种	采样期	采样时间	参考文献
紫花苜蓿 (*M. sativa*)	公农5号	现蕾初期	2022.07.24	[16,17]
		现蕾末期	2022.08.01	
		初花期	2022.08.14	
		盛花期	2022.08.23	
		结荚期	2022.09.01	
燕麦 (*A. sativa*)	坝莜18号	拔节末期	2022.07.18	[17,18]
		孕穗期	2022.07.24	
		抽穗期	2022.08.01	
		灌浆期	2022.08.07	
		蜡熟期	2022.08.21	
甜高粱 (*S. bicolor*)	科甜30号	拔节初期	2022.08.14	[19,20]
		拔节末期	2022.09.03	
		孕穗期	2022.09.09	
羊草 (*L. chinensis*)	天然羊草	拔节期	2022.07.05	[21,22]
		抽穗期	2022.07.18	
		灌浆期	2022.08.01	
		乳熟期	2022.08.14	
		蜡熟期	2022.08.27	

酸性洗涤纤维(ADF)、木质素(lignin)、醇溶糖(ESC), 脂肪类包括粗脂肪(EE)、总脂肪酸(TFA)、饱和脂肪酸(SFA)、不饱和脂肪酸(UFA), 元素类包括粗灰分(ash)、碳(C)、磷(P)、钙(Ca)、镁(Mg)、钾(K); 同时还计算了牧草相对饲喂价值(RFV)与总可消化养分(TDN).

1.4　国内外牧草分级标准

本研究收集了美国、澳大利亚等畜牧业发达国家和我国共计7个国家/单位关于牧草干草质量的分级评价标准, 对比不同评价指标与分级标准间的差异以及呼伦贝尔草牧业示范区牧草与国内外优质牧草标准间的差异, 为完善我国牧草品质评价标准与“标准草”的确立提供参考. 国内外标准来源见表2, 评价指标与分级标准详见网络版附表2和3.

1.5　统计与分析方法

参考概略养分分析体系和Van Soest饲料分析体系[23], 选取粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维五个评价牧草品质的关键指标, 使用最小二乘回归对上述指标含量在四种牧草关键生育期内进行动态变化曲线拟合, 并添加二次项来提高回归的预测精度. 之后, 结合鲜草产量, 确定四种牧草的最佳收获期. 为对比呼伦贝尔地区四种牧草收获时的养分含量与国内和国际最优级别牧草标准间的差异, 在进行数据统计分析前, 利用Shapiro-Wilk检验数据正态性, 数据通过正态性检验便进行下一步分析, 将各营养成分含量与国内外最优级标准做差, 后将差值与0进行单样本t检验, 若$P<0.05$, 则差异显著.

本研究对不同类别的养分指标 进行主成分分析, 评估不同类别各指标的重要程度, 筛选出每一类中具有代表性的养分指标, 服务于后续牧草品质评价. 本研究还重点关注了NFC:RDP, NFC:NDF, SFA:UFA, Ca:P, K:Mg等计量比值在生育期内的变化, 同样使用最小二乘回归并添加二次项拟合上述比值在四种牧草关键生育期内的动态变化曲线. 上述所有统计分析及绘图皆在R 4.5.0中完成.

2　结果

2.1　四种牧草产量和重要养分在关键生育期的变化

紫花苜蓿产量随着生育期的推进显著上升, 灰分

表 2　国内外牧草干草质量分级评价标准来源

Table 2　Sources of domestic and international guidelines for forage quality grading and evaluation

	牧草(科属/品种)	标准来源
我国标准	紫花苜蓿、燕麦	中国畜牧业协会(caaa.cn)
	羊草、豆科、禾本科	中华人民共和国农业农村部(moa.gov.cn)
国外标准	紫花苜蓿	美国农业部(usda.gov)
	燕麦	澳大利亚Balco公司(balco.au)
	豆科	美国饲草和草地协会(afgc.org)、美国密西西比州立大学(msstate.edu)、美国佛蒙特大学(uvm.edu)
	禾本科	美国农业部(usda.gov)、美国密西西比州立大学(msstate.edu)、美国佛蒙特大学(uvm.edu)

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

含量下降, 其余养分指标在不同生育期内差异不显著. 当紫花苜蓿进入花期, 地上生物量相较于现蕾末期显著增加了约57%, 盛花期的CP, ADF, NDF含量较初花期与结荚期而言相对表现更优, 因此确定盛花期为其最适收获期(图1A和B). 燕麦的CP和ash含量在生育期内呈下降趋势, 产量、ADF、NDF则呈先升后降趋势, 粗脂肪则先下降后上升. 燕麦在抽穗期产量达到最高, 但此时ADF及NDF较高, 并不利于干草制作, 综合考虑燕麦宜在蜡熟期进行收获(图1C和D). 甜高粱产量在生育期内显著上升; CP, EE, ash含量总体呈下降趋势.

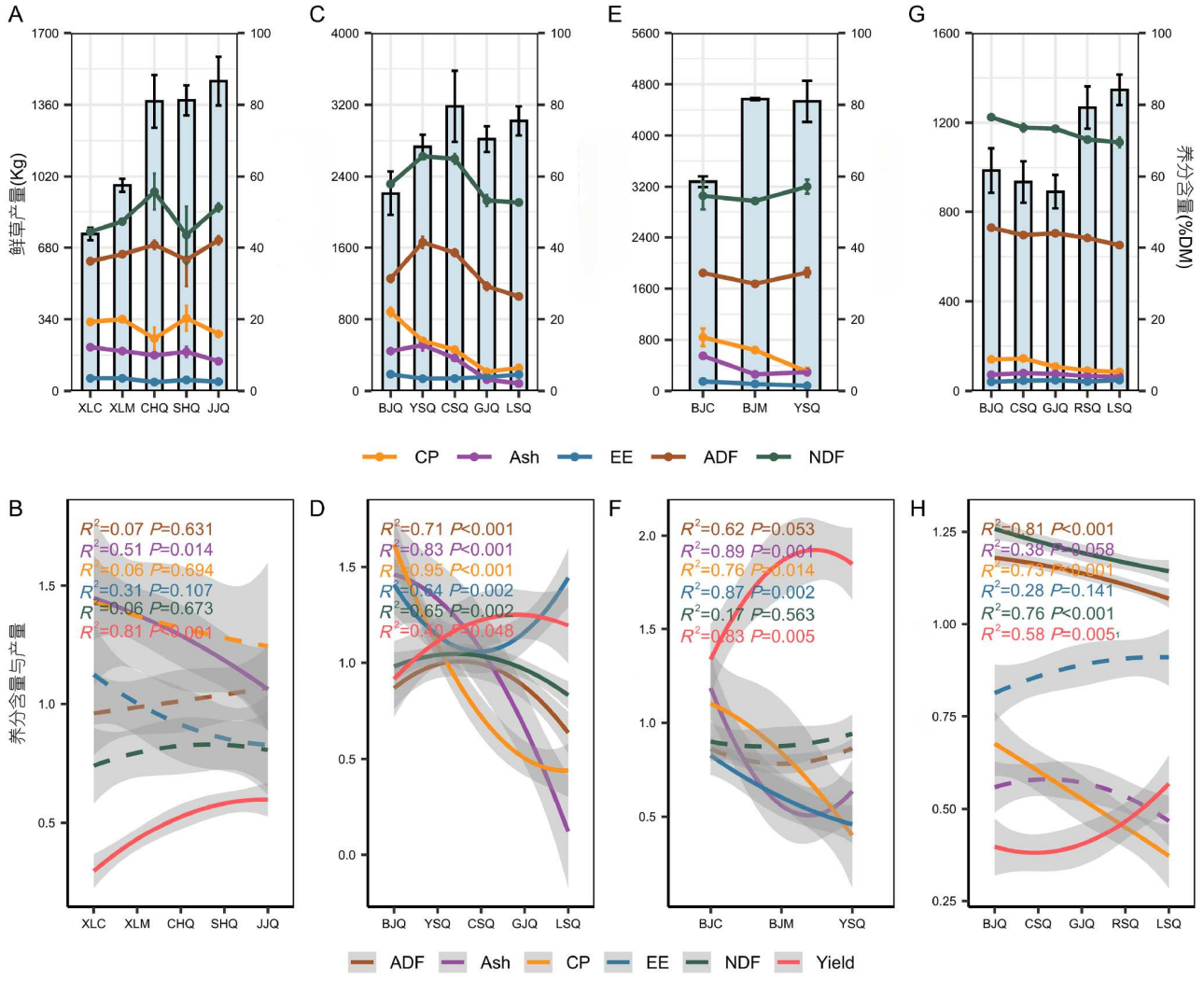


图 1 四种牧草产量和重要养分在关键生育期内的变化. 图A, C, E, G分别为紫花苜蓿、燕麦、甜高粱、羊草产量和重要养分在生育期内的实测值变化; 图B, D, F, H则为上述四种牧草对应的二次项拟合曲线, 其中各相关指标在拟合前进行了标准化处理, 实线表示相应指标在不同生育期内存在显著差异, 虚线则表示相应指标在各生育期内差异不显著. 图中横坐标表示牧草生育期, XLC为现蕾初期、XLM为现蕾末期、CHQ为初花期、SHQ为盛花期、JJQ为结荚期、BJQ为拔节期、BJC为拔节初期、BJM为拔节末期、YSQ为孕穗期、CSQ为抽穗期、GJQ为灌浆期、RSQ为乳熟期、LSQ为蜡熟期

Figure 1 Changes of yield and key nutrients in the four forages during critical growth stages. A, C, E, and G: changes of the measured values in yield and key nutritional components of the four forage species—alfalfa, oat, sweet sorghum, and sheep grass during different growth stages. B, D, F, and H: the corresponding quadratic fitting curves for these four forages; all relevant variables were standardized prior to fitting. For each indicator, solid and dashed lines denote the presence or absence of significant differences among different growth stages, respectively. The *x*-axis represents the growth stages of the forage grasses. XLC: early bud stage; XLM: end of bud stage; CHQ: early flowering stage; SHQ: full flowering stage; JJQ: seed bearing stage; BJQ: Jointing stage; BJC: early jointing stage; BJM: end of jointing stage; YSQ: booting stage; CSQ: heading stage; GJQ: grain filling stage; RSQ: milk stage; LSQ: waxy stage

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

拔节期为甜高粱快速生长阶段，末期地上生物量相较于初期增加了约37%. 拔节末期与抽穗期地上生物量无显著差异，但品质在拔节末期至抽穗期间下降较快，因此甜高粱最适收获期应为拔节末期(图1E和F). 天然羊草CP, ADF, NDF随生育期推进显著下降, 产量逐渐上升, 在抽穗期时综合品质最优, 宜在该时期进行收获(图1G和H). 本研究所测定的其余养分指标在生育期内的变化情况详见网络版附表4.

2.2 最佳收获期收获的牧草养分质量与国际/国家标准之间的差距

我国畜牧业协会与美国农业部所制定的紫花苜蓿干草质量评价标准在评价指标与质量分级标准上一致(网络版附表2和3). 对比该标准, 本实验中的紫花苜蓿干草CP, ADF, NDF, ash, RFV与TDN指标与国内外标准特级水平间的差异均不显著，表明示范区内紫花苜蓿品质达到特级水平. 燕麦对比我国畜牧业协会所制定的特级燕麦干草标准表现为ADF, NDF, ash达标, 但CP距特级标准仍存在显著差距. 就澳大利亚Balco公司标准而言，ADF达到最优级标准，但CP和NDF含量存在差距(表3). 甜高粱的CP含量低于美国农业部及佛蒙特大学的最优级标准，但达到我国及美国密西西比州立大学标准；TDN和NDF则高于美国密西西比州立大学与佛蒙特大学标准，因此甜高粱达到我国及美国密西西比州立大学优质牧草标准，但略低于美国农业部及佛蒙特大学优质牧草标准(表3). 天然羊草CP含量达到我国特级标准，而ADF与NDF含量高于我国特级标准，纤维含量在牧草品质评价中表现较差. 对比国外禾本科优质牧草标准，CP含量、TDN皆低于各优质饲草标准, ADF与NDF则高于各标准, 因此天然羊草与国外优质牧草标准间仍存在较大差距(表3).

2.3 四种牧草的多维养分指标选取

将牧草23个主要营养成分指标划分为蛋白质类、碳水化合物类、脂肪类、元素类四类，并对四种牧草养分按类别进行主成分分析. 四种牧草上述养分类别中PC1的方差解释率均较高(50.1%~92.8%)，能够较好地反映养分指标在牧草养分评价中的重要程度(表4). 综合四种牧草的分析结果，筛选出各类别的核心评价指标：CP与RDP是表征蛋白质品质的关键指标；NSC, NFC，ADF及NDF共同反映了碳水化合物结构；EE与TFA代表了脂肪品质；而Ca, P及ash则是评价元素供给状况的核心指标. 四种牧草的各主成分方差解释率及变量贡献率详见表4.

2.4 四种牧草养分关键评估指标及其比值关系在全生育期的变化

四种牧草重要养分计量比值在生育期内呈现不同的变化趋势. 紫花苜蓿的NFC:RDP，NFC:NDF, SFA:UFA，K:Mg比值在全生育期内保持稳定，Ca:P比值则呈现先下降后上升的趋势. 燕麦的NFC:RDP, NFC:NDF和SFA:UFA比值在生育期内总体呈上升趋势，Ca:P比值则下降，K:Mg在不同生育期内差异不显著；甜高粱NFC:RDP比值呈上升趋势，Ca:P比值则先升后降，在拔节末期达峰值，NFC:NDF，SFA:UFA, K:Mg在不同生育期内差异并不显著. 对于羊草, NFC:RDP与NFC:NDF比值随生育期推进而上升, SFA:UFA与K:Mg比值则下降，Ca:P比值在整个生育期内保持稳定(图2), 具体比值详见网络版附表5.

3 讨论

3.1 呼伦贝尔地区四种牧草的最佳收获期

在最适收获期内完成牧草的收获工作，能有效减少牧草营养物质的流失，并提升后续青贮与干草调制的质量，通常牧草最适收获期的确定需要平衡其质量与产量[24]. 本研究结果显示，以干草为主要加工形式, 紫花苜蓿的最适收获期为盛花期，此时紫花苜蓿产量稳定，营养品质相对更优；但也有许多相关研究认为, 在现蕾期至初花期阶段进行收获最佳[25,26]. 关于紫花苜蓿最适收获期的不同结论，与研究的品种、种植区域的自然条件、后期加工方式选择等因素有关. 呼伦贝尔地区纬度较高，苜蓿各生育期起始受气候条件影响会有所延长[27]，受温度影响，苜蓿开花时间可能随之推迟，延迟开花可提升茎叶比及消化率，增加生物量的同时保证紫花苜蓿营养品质[28,29]. 另外，从后期加工方式考虑，已有研究表明，调制干草宜在盛花期收获，青贮加工则在初花期收获较佳[30]，与本研究结论相似. 甜高粱宜在拔节末期进行收获，王宏博等人[31]从真蛋白质含量及其可利用性方面考虑也推荐甜高粱在拔节期收获，但也有相关研究得出甜高粱宜在完熟期进行收获的结论[19,32]. 就呼伦贝尔地区实际

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

表 3 示范区牧草品质与国内外饲草最优级标准间的差异分析[a)]

Table 3 Analysis of the gap between forage quality in the demonstration zone and optimal domestic and international standards[a)]

牧草品种	标准	指标	最适收获期养分与最优标准间的差值(均值±标准误差)
紫花苜蓿	美国农业部(USDA) 中国畜牧业协会	粗蛋白(CP)	−1.70±3.45
		酸洗洗涤纤维(ADF)	9.60±7.30
		中性洗涤纤维(NDF)	9.53±8.05
		相对饲喂价值(RFV)	−43.00±35.85
		灰分(ash)	−1.70±3.45
		总可消化养分(TDN)	9.60±7.30
燕麦	中国畜牧业协会	粗蛋白(CP)	−6.57±0.18***
		酸洗洗涤纤维(ADF)	−6.63±0.26**
		中性洗涤纤维(NDF)	−2.27±0.41*
		灰分(ash)	−10.91±0.26***
	澳大利亚Balco公司	粗蛋白(CP)	−3.57±0.18**
		酸洗洗涤纤维(ADF)	−1.63±0.26*
		中性洗涤纤维(NDF)	3.73±0.41*
甜高粱	中国农业农村部	粗蛋白(CP)	0.4±0.36
	美国农业部(USDA)	粗蛋白(CP)	−1.6±0.36*
	美国密西西比州立大学	粗蛋白(CP)	−0.6±0.36
		总可消化养分(TDN)	7.33±0.29**
	美国佛蒙特大学	粗蛋白(CP)	−6.6±0.36**
		酸洗洗涤纤维(ADF)	−0.1±0.4
		中性洗涤纤维(NDF)	3.17±0.5*
羊草	中国农业农村部	粗蛋白(CP)	0.03±0.59
		酸洗洗涤纤维(ADF)	13.5±0.23***
		中性洗涤纤维(NDF)	18.63±1.07**
	美国农业部(USDA)	粗蛋白(CP)	−3.97±0.59*
	美国密西西比州立大学	粗蛋白(CP)	−0.6±0.36
		总可消化养分(TDN)	−3.93±0.13**
	美国佛蒙特大学	粗蛋白(CP)	−8.97±0.59**
		酸洗洗涤纤维(ADF)	13.5±0.23***
		中性洗涤纤维(NDF)	23.63±1.07**

a) *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$. 表中CP, TDN, RFV为正向指标, 即与标准间差值为正则表明牧草该指标达到标准, 差值越高则牧草品质更优; ADF, NDF与ash为负向指标, 即与标准间差值为负则表明牧草该指标达到标准. RFV=DMI(%BW)×DDM(%DM)/1.29. TDN=DCP(%)+DEE(%)×2.25+DCF(%)+DNFE(%), 其中, DCP为可消化粗蛋白, DEE为可消化粗脂肪, DCF为可消化粗纤维, DNFE为可消化无氮浸出物

情况考虑, 在甜高粱生长的中后期面临着气温下降、霜打至倒伏减产的威胁, 常不能完成整个生育期, 为抵御冻害, 甜高粱的品质也会随之下降, 综合考虑推荐在拔节末期至孕穗期间收获为宜. 野生的天然羊草相较于产量, 更应关注其养分品质, 虽然抽穗期产量较低, 但各养分指标都处于较优水平, 宜在此时进行收获. 燕麦拔节期产量最优, 但产量较低; 抽穗期产量高, 但纤维含量较高, 中性洗涤纤维含量大于55%, 不利于干草制作, 综合考虑宜在蜡熟期进行收获. 关于羊草及燕麦的收获期在前人的研究中也获得了相似的结论[24,33].

3.2 四种牧草品质评价及其指标体系构建

在牧草品质的评价方面, CP含量直接影响牧草可利用价值, ADF与NDF含量与饲草的适口性及消化率成反比[34], 故CP, ADF, NDF含量一直是国内外评价牧草品质时重点关注的指标. 在本研究中, 我国呼伦贝尔地区4种重要牧草中仅紫花苜蓿达到了我国特级标准,

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

表 4　4种牧草重要养分主成分第一轴方差解释率及变量贡献率

Table 4　Principal component analysis (PCA) results for nutritional components of the four forages

物种	解释率	蛋白质类	碳水化合物类	脂肪类	元素类
紫花苜蓿	方差解释	56.4%	50.1%	92.8%	57.6%
	变量贡献	CP(25.91%)	ADF(17.98%)	TFA(26.54%)	Ca(24.98%)
		RDP(24.52%)	NDF(17.6%)	EE(26.24%)	P(20.96%)
		NDICP(20.1%)	starch(16.32%)	UFA(24.42%)	K(17.45%)
		NH3CPE(13.4%)	NFC(15.49%)	SFA(23.48%)	ash(16.24%)
		SP(11.43%)	NSC(14.69%)	–	C(11.62%)
		ADICP(5.16%)	lignin(11.28%)	–	Mg(8.75%)
		–	ESC(3.47%)	–	–
燕麦	方差解释	89.6%	76.3%	71%	87.3%
	变量贡献	NDICP(18.36%)	NFC(17.87%)	TFA(34.72%)	C(18.16%)
		RDP(18.08%)	NSC(17.67%)	EE(33.19%)	ash(18.07%)
		CP(18.02%)	lignin(15.9%)	SFA(23.17%)	Mg(16.64%)
		SP(16.45%)	starch(15.72%)	UFA(8.03%)	Ca(16.09%)
		ADICP(15.07%)	NDF(15.25%)	–	K(15.78%)
		NH_3CPE(14.09%)	ADF(14.22%)	–	P(15.25%)
		–	ESC(3.03%)	–	–
甜高粱	方差解释	85.3%	51%	92.6%	67.5%
	变量贡献	CP(19.2%)	NFC(23.71%)	TFA(26.5%)	ash(22.39%)
		RDP(19.04%)	NSC(22.71%)	EE(26.15%)	P(21.68%)
		NH_3CPE(18.47%)	starch(17.96%)	UFA(23.77%)	Mg(18.92%)
		NDICP(17.66%)	ESC(16.16%)	SFA(23.75%)	K(19.56%)
		SP(17.46%)	lignin(9.43%)	–	Ca(14.5%)
		ADICP(7.92%)	NDF(6.18%)	–	C(2.96%)
		–	ADF(4.92%)	–	–
羊草	方差解释	90.3%	85.8%	86.3%	57.4%
	变量贡献	RDP(18.25%)	NFC(25.69%)	TFA(28.14%)	Ca(25.29%)
		CP(18.01%)	NSC(21.66%)	EE(26.47%)	P(24.66%)
		ADICP(17.58%)	starch(19.27%)	UFA(24.22%)	ash(20.04%)
		NDICP(17.05%)	ADF(10.24%)	SFA(21.31%)	K(14.31%)
		SP(16.01%)	ESC(9.15%)	–	Mg(14.59%)
		NH_3CPE(13.03%)	NDF(7.13%)	–	C(1.12%)
		–	lignin(5.4%)	–	–

其余三种禾本科牧草与国内外优质牧草标准的差距主要表现在CP含量低于优质牧草标准, 而ADF与NDF含量高于优质牧草标准. 结合我国与美国、新西兰等畜牧业发达国家在优质牧草种质资源培育速度及牧草种植管理与栽培技术等方面都存在着较大差距的现实情况[35], 未来我国应致力在禾本科优质牧草育种及饲草加工上取得突破, 缩小禾本科牧草与优质牧草标准间的差距. 另外, 前人已有研究表明, 干草加工中提升干燥速度能减少牧草中营养物质的流失[36,37], 这为牧草收获后的快速烘干技术研发等提出了迫切需求. 近年来, 我国牧草加工技术不断革新. 研究表明, 与干草相比, 青贮能更好地保存营养物质, 粗蛋白含量更高, 而酸性洗涤纤维与中性洗涤纤维含量则相对较低[38], 具有营养流失少、适口性好、消化率高等优点[39,40], 为保障优质饲草供应, 我国也可加快推进牧草青贮工艺的发展, 并通过菌剂研发改良等举措来系统性提升青贮品质[41,42].

在优质牧草评价标准上, 目前国内外牧草质量评

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

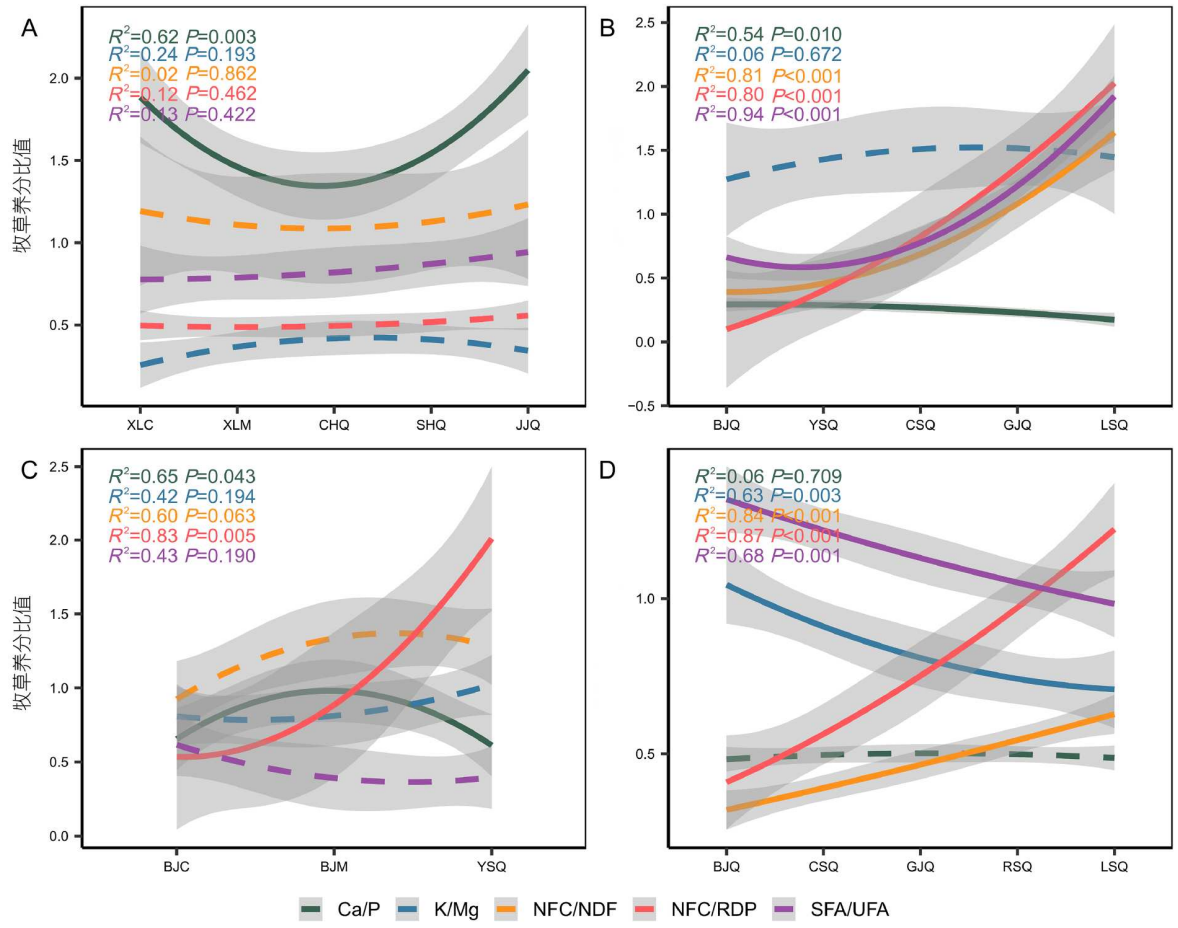


图 2 四种牧草重要养分计量比值全生育期二次项拟合曲线. 图A~D分别为紫花苜蓿、燕麦、甜高粱、羊草, 反映不同比值在生育期内的变化趋势, 其中各比值在拟合前进行了标准化处理, 实线表示相应比值在不同生育期内存在显著差异, 虚线则表示相应比值在各生育期内差异不显著. 图中横坐标表示牧草生育期, XLC为现蕾初期、XLM为现蕾末期、CHQ为初花期、SHQ为盛花期、JJQ为结荚期、BJQ为拔节期、BJC为拔节初期、BJM为拔节末期、YSQ为孕穗期、CSQ为抽穗期、GJQ为灌浆期、RSQ为乳熟期、LSQ为蜡熟期

Figure 2 Quadratic fitting curves of the ratios of key nutrients in the four forages across the entire growth period. A–D: The variation trend of the key nutrient ratio of the four forage species—alfalfa, oat, sweet sorghum, and sheep grass during different growth stages. All ratios were standardized prior to fitting, for each ratio, solid and dashed lines denote the presence or absence of significant differences among different growth stages, respectively. The *x*-axis represents the developmental stages of the forage grasses. XLC: early bud stage; XLM: end of bud stage; CHQ: early flowering stage; SHQ: full flowering stage; JJQ: seed bearing stage; BJQ: Jointing stage; BJC: early Jointing stage; BJM: end of Jointing stage; YSQ: booting stage; CSQ: heading stage; GJQ: grain filling stage; RSQ: milk stage; LSQ: waxy stage

价标准主要集中于CP, ADF, NDF等传统指标. 传统的评价体系很难全面反映家畜摄入饲草后的养分吸收效率, 对于产奶当量及泌乳净能等能量指标也缺乏考量, 且我国对于类似于甜高粱这样极具发展潜力的优质饲草仍缺乏独立的评价标准(网络版附表3), 因此对于优质牧草的评判标准仍需进一步完善. 虽然目前许多国内外评价标准将TDN及RFV等较为综合性的指标纳入评价体系中, 但仍需建立并完善针对不同物种的配套评价标准, 使优质牧草评判有据可依, 更好地服务于优质牧草生产, 并确立“标准草”典范, 为我国草牧业高质量发展提供重要参考. 本研究通过主成分分析构建的牧草品质评价指标体系, 在涵盖CP, ash及EE等常规养分核心指标的基础上, 进一步引入了RDP, NFC, TFA, Ca等指标, 从反刍动物营养消化的视角, 强调了关键养分间的计量关系, 扩宽了牧草评价思路. 这为从“种草”到“用草”的产业链高效耦合、家畜日粮的精准配制及饲养实践的优化提供了更为全面的理论依据.

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

3.3 牧草养分指标间的计量关系可纳入“标准草”的质量评价指标体系

本研究揭示了牧草NFC:RDP, NFC:NDF, SFA:UFA, Ca:P, K:Mg等养分计量比值在牧草生育期内的动态变化规律. 上述养分计量比值的平衡直接影响到家畜对于饲粮养分的吸收利用效率及其生长. 因此, 将养分计量比值作为核心定量指标整合进“标准草”评价体系, 将为下游的草产品优化加工与精准饲养实践提供关键理论支撑.

一般粗蛋白大致可分为瘤胃未降解饲料蛋白质(RUP)和饲料降解蛋白(RDP)两部分, RDP进入瘤胃后降解并合成微生物蛋白质(MCP), 与RUP及少量内源性粗蛋白(ECP)共同构成了可代谢蛋白质(MP), 为反刍动物重要的蛋白质来源[43], 其中, MCP约占总可吸收蛋白质的50%~80%[44]. 能量和氮是最常限制微生物生长和家畜生产的营养因素[45], 应关注氮和能量的供应比例及其同步性[46], 否则易造成氮损耗[47]. Hoover和Stokes[48]在pH控制的连续培养发酵罐中, 发现实现瘤胃微生物最大生长量所对应的NFC:RDP比例为2:1[46], 但Calsamiglia等人[49]基于Stokes等人[50]提供的数据, 从氮利用效率(ENU)角度认为比例接近4:1更优. Seo等人[51]通过开展体外试验, 发现当奶牛日粮中NFC:RDP大于3时, 可实现最大的发酵和泌乳性能. 就本实验确定的最佳刈割期来看, 甜高粱NFC:RDP比值达到4:1, 表现较优, 而紫花苜蓿及羊草偏低, 燕麦则偏高, 在日粮配置阶段可依据基础饲草的能氮结构进行针对性调整. 对于紫花苜蓿、羊草等NFC:RDP比值较低的牧草, 在后续日粮配置阶段可适量补充玉米、糖蜜等非纤维性碳水化合物源; 反之, 对于比值较高的饲草, 则可添加豆粕等优质降解蛋白源.

NFC:NDF比值是决定日粮能量结构的关键, 其平衡对维持瘤胃健康与提升养分利用率至关重要, 维持在适宜水平能促进瘤胃发酵并提高微生物多样性[52,53], 但过高的NFC:NDF比值会降低生长速度, 不利于瘤胃健康. Song等人[54]研究发现高水平NFC:NDF (1.66)能提升黑山羊的养分利用效率; Guo等人[55]通过开展饲喂实验, 认为NFC:NDF维持在1.5~2.0间羊肉育肥效果最佳. 本研究的紫花苜蓿、燕麦、甜高粱在最适刈割期的NFC:NDF都约为0.6(网络版附表5), 羊草则更低(约为0.2), 展现出高纤维、低能量特性, NDF水平过高会提升瘤胃排空速率, 进而降低氮等养分的表观消化率[56]. 因此, 日粮配置过程中应提高NFC水平, 从而提升家畜的生产性能.

粗脂肪(EE)含量及脂肪酸组分是牧草品质及营养价值评价的重要指标[57]. EE富含脂肪酸, 脂肪酸主要分为饱和脂肪酸(SFA)和不饱和脂肪酸(UFA), SFA与UFA的比例是评价脂肪酸营养价值的重要依据[58]. 多不饱和脂肪酸尤其是亚油酸(C18:2)具有促进家畜生长发育、改善肉质等较强的生理功能[57,59], 许多家畜生长所必需的脂肪酸, 尤其是亚油酸等不饱和脂肪酸不能够在动物体内合成, 因此牧草便成为家畜获取脂肪酸的主要来源[60]. 一般而言, SFA:UFA比值越小, 脂肪酸营养价值越高[61], 关注该比值可以反映优质脂肪酸的供给情况.

生态化学计量学为理解动物营养平衡提供了关键理论框架[62,63]. 在矿物元素平衡中, K与Mg的比值尤为重要. 过量摄入K会竞争性抑制Mg在瘤胃的吸收, 进而引发低血镁症(俗称“青草抽搐症”), 对放牧牲畜构成严重威胁[64]. 因此, 维持日粮中适宜的K:Mg比值是重要的健康管理策略. 与此类似, Ca与P的平衡则直接关乎骨骼发育与机体健康. Ca缺乏可导致佝偻病[65], 而P过量则会引发继发性甲状旁腺功能亢进[66]. 为此, 反刍动物日粮的Ca:P比值通常建议维持在2:1左右[67]. 一般而言, 较低的Ca:P比值与较高的K:Mg比值通常预示着牧草品质不佳[68]. 在后续日粮配制过程中, 可通过添加相应的矿物质补充剂对这些关键比值进行精准调控, 以优化动物健康与生产性能.

总体而言, 将关键养分计量比值纳入牧草品质评价体系, 有助于从家畜养分吸收平衡角度完善现有评价框架, 并为后续日粮调配及品质改良提供基础数据参考, 由此实现日粮的精细配比, 促进牧草生产与家畜饲养的高效衔接, 进而提升草牧业全产业链生产效能. 本研究采用的研究方法聚焦于解析多维养分指标间的内在关联与数值特征, 初步阐释了上述指标及比值在牧草品质评价中的重要性, 为拓展评价思路提供了依据. 然而, 牧草养分比值具有动态演变的特征, 同时家畜对养分的需求也随生理阶段而变化. 因此未来研究还应通过开展饲喂实验、加强建模分析等方法, 深入探究指标比值分级区间的划分依据及其生物学含义, 以期构建量化的评价标准, 为我国“标准草”评定体系建立与生产提供科学支撑.

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

4 总结与展望

本研究结合产量及养分状况确定了呼伦贝尔地区紫花苜蓿最适收获期为盛花期, 甜高粱为拔节末期, 燕麦与羊草则为抽穗期. 将最适收获期进行收获的牧草品质与国内外优质牧草进行比较, 明确了我国北方重要牧草燕麦、甜高粱及羊草等禾本科牧草与国内外优质牧草仍存在差距. 为了更综合地评价牧草质量, 基于主成分分析确定了RDP, NSC, NFC, TFA及UFA为我国北方4种重要牧草品质评价中除了常规养分核心指标外需重点关注的指标. 相较于单一指标评价, NFC:RDP, NFC:NDF等指标间计量关系有望成为解析家畜瘤胃降解效率与养分吸收利用效率的关键. 总之, 本研究通过对呼伦贝尔地区优势牧草养分品质进行系统分析, 为发展“标准草”的概念、完善牧草养分评价体系、进一步丰富养分计量理论提供了新思路.

致谢 感谢北京林业大学朱玺和郭策升在野外实验与采样工作中的帮助.

参考文献

1 Jing H C, Wang T, Lin R C, et al. Strengthen the research of forage basic biology to ensure forage seed industry and national food security (in Chinese). Acta Bot Sin, 2022, 57: 719–724 [景海春, 王台, 林荣呈, 等. 加强饲草基础生物学研究, 保障饲草种业与国家大粮食安全. 植物学报, 2022, 57: 719–724]

2 Diao C, Wang W X. The trade pattern of alfalfa importation into China and its influencing factors (in Chinese). Pratac Sci, 2023, 40: 2424–2434 [刁婵, 王文信. 中国苜蓿草进口贸易格局及其影响因素. 草业科学, 2023, 40: 2424–2434]

3 Li C J, Guo Q, Wang Z X. Study on the demand of alfalfa grass import in China (in Chinese). Chin Feed, 2025, 3: 145–150 [李翠锦, 郭琦, 王姿璇. 我国苜蓿草进口需求研究. 中国饲料, 2025, 3: 145–150]

4 Feng L W. Forecasting supply and demand of feed grains and adjustment strategies for industrial structure under the background of food security (in Chinese). Chin Feed, 2025, 10: 153–156 [冯力婉. 粮食安全背景下饲料粮的供需预测及产业结构调整策略. 中国饲料, 2025, 10: 153–156]

5 Fang J Y, Pan Q M, Gao S Q, et al. “Small *vs*. large area” principle: protecting and restoring a large area of natural grassland by establishing a small area of cultivated pasture (in Chinese). Pratac Sci, 2016, 33: 1913–1916 [方精云, 潘庆民, 高树琴, 等. “以小保大”原理: 用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复. 草业科学, 2016, 33: 1913–1916]

6 Fang J Y, Jing H C, Zhang W H, et al. The concept of “Grass-based Livestock Husbandry” and its practice in Hulun Buir, Inner Mongolia (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1619–1631 [方精云, 景海春, 张文浩, 等. 论草牧业的理论体系及其实践. 科学通报, 2018, 63: 1619–1631]

7 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. NY/T 4469-2025 quality evaluation of whole-plant corn silage—integrated index method (in Chinese). 2025. Available from URL: https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=350FE9C4CFE390D2E06397BE0A0A963B [中国农业农村部. NY/T 4469-2025全株玉米青贮质量评定 综合指数法. 2025. https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=350FE9C4CFE390D2E06397BE0A0A963B]

8 Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. NY/T 4673-2025 Quality evaluation of alfalfa silage-Integrated index method (in Chinese). 2025. Available from URL: https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=350FE9C4D0B090D2E06397BE0A0A963B [中国农业农村部. NY/T 4673-2025苜蓿青贮质量评定 综合指数法. 2025. https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=350FE9C4D0B090D2E06397BE0A0A963B]

9 Zhong J, Ni K K, Yang J X, et al. The present situation and prospect of the processing technology of forage grass in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1677–1685 [钟瑾, 倪奎奎, 杨军香, 等. 我国饲用草产品加工技术的现状及展望. 科学通报, 2018, 63: 1677–1685]

10 Sun S H, Zhu B B, Li Y H, et al. Investigation on main association of Hulun Buir grassland (in Chinese). J Grassl Forage Sci, 2020, (1): 42–48 [孙双红, 朱宾宾, 李艳红, 等. 呼伦贝尔草原主要群丛的调查研究. 草学, 2020, (1): 42–48]

11 Xu D W. Distribution change and analysis of different grassland types in Hulunber grassland (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019 [徐大伟. 呼伦贝尔草原区不同草地类型分布变化及分析. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院, 2019]

12 Zhang Y J, Ren J Z, Wang M L, et al. Discussion on the position and development distribution of forage industry in China’s agricultural industry

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

structure (in Chinese). J Agric Sci Technol, 2013, 15: 61–71 [张英俊, 任继周, 王明利, 等. 论牧草产业在我国农业产业结构中的地位和发展布局. 中国农业科技导报, 2013, 15: 61–71]

13 Hao H Q, Zhang R, Lu C, et al. Research progress and future perspective of sweet sorghum breeding (in Chinese). Acta Bot Sin, 2022, 57: 774–784 [郝怀庆, 张汝, 卢呈, 等. 甜高粱育种研究进展及未来展望. 植物学报, 2022, 57: 774–784]

14 Xiao Y Z, Xin X P, Xu L J, et al. Effect of different additives on the quality of oat silage in Hulunbuir area (in Chinese). Pratac Sci, 2022, 39: 1487–1493 [肖燕子, 辛晓平, 徐丽君, 等. 呼伦贝尔地区不同添加剂对燕麦青贮品质的影响. 草业科学, 2022, 39: 1487–1493]

15 Yuan B, Xu L J, Zhao Y R, et al. Selection and evaluation of multiple cropping oats for suitable varieties in a farming-pastoral ecotone in northern China (in Chinese). Pratac Sci, 2024, 41: 652–663 [袁波, 徐丽君, 赵雅茹, 等. 北方农牧交错区复种燕麦品种的筛选与评价. 草业科学, 2024, 41: 652–663]

16 Wang J, Liu X J, Hao F, et al. Study on nitrogen utilization characteristics of alfalfa with different nitrogen efficiency in different growth periods (in Chinese). Acta Agrestia Sin, 2021, 29: 2461–2469 [王静, 刘晓静, 郝凤, 等. 不同氮效率紫花苜蓿各生育期氮利用特征研究. 草地学报, 2021, 29: 2461–2469]

17 Hao Y, Liang Q, Xu Q F, et al. Evaluation of nutritional value of forage in different growth stages (in Chinese). J Grassl Forage Sci, 2022, 2: 40–48 [郝悦, 梁琪, 许庆方, 等. 不同生育时期紫花苜蓿和燕麦营养价值评价. 草学, 2022, 2: 40–48]

18 Zhang C J, Ren S L, Bian F, et al. Study on the grain yield and nutritional value of nine oat varieties in the semi-arid area of the Loess Plateau in central Gansu (in Chinese). Acta Agrestia Sin, 2022, 30: 3082–3089 [张成君, 任生兰, 边芳, 等. 陇中黄土高原半干旱区9个燕麦品种籽粒产量及其营养价值研究. 草地学报, 2022, 30: 3082–3089]

19 Wang H L, Wang R F, Liu B, et al. Effects of harvesting at different growth stage on agronomic and nutritional quality related traits of sweet sorghum (in Chinese). Sci Agric Sin, 2020, 53: 2804–2813 [王海莲, 王润丰, 刘宾, 等. 不同生长时期收获对甜高粱农艺性状及营养品质的影响. 中国农业科学, 2020, 53: 2804–2813]

20 Kuerban Z T N G L, Tuerhong T E X, Shan Q M K, et al. Study on the change of soil nutrient content in the growth period of sweet sorghum under different fertilization (in Chinese). Acta Agrestia Sin, 2021, 29: 103–113 [再吐尼古丽·库尔班, 吐尔逊·吐尔洪, 山其米克, 等. 施肥对不同生育期甜高粱土壤养分含量的影响. 草地学报, 2021, 29: 103–113]

21 Tian Y, Zhang S, Liu J, et al. Effects of different cutting times and heights on the yield and quality of *Leymus chinensis* grassland (in Chinese). Grassl Pratac, 2020, 32: 35–40 [田野, 张爽, 刘佳, 等. 不同收获时期和留茬高度对羊草割草地产量和品质的影响. 草原与草业, 2020, 32: 35–40]

22 Wu R N, Zhang X D, Wang Y, et al. Response of three dominant forages to drought stress at different growth stages (in Chinese). Pratac Sci, 2021, 38: 2210–2220 [乌日娜, 张兴东, 王妍, 等. 3种优势牧草在不同生育期对干旱胁迫的响应. 草业科学, 2021, 38: 2210–2220]

23 Van Soest P J. Nutritional Ecology of The Ruminant. Ithaca: Cornell University Press, 1982

24 Na Y, Tao Y, Li F, et al. Effects of growth period and variety on whole plant yield andnutritional value of *Avena sativa* (in Chinese). Pratac Sci, 2024, 41: 1720–1728 [那亚, 陶雅, 李峰, 等. 生育期对燕麦全株产量和营养价值的影响. 草业科学, 2024, 41: 1720–1728]

25 Tian Y M, He L T. Effect of cutting time on the nutritional contents of alfalfa leaf meal (in Chinese). Pratac Sci, 2007, 1: 38–40 [田玉民, 何丽涛. 收获期对紫花苜蓿叶粉营养成分的影响. 草业科学, 2007, 1: 38–40]

26 Chang C, Yin Q, Liu H L. Study on cutting periods and cutting times of alfalfa (in Chinese). Chin J Grassl Sci, 2013, 35: 53–56 [常春, 尹强, 刘洪林. 苜蓿适宜收获期及收获次数的研究. 中国草地学报, 2013, 35: 53–56]

27 Chen Y L, Cheng Q M, Liu L Y, et al. Study on the optimum harvest period of alfalfa in Baotou (in Chinese). Chin Feed, 2022, 5: 117–121 [陈玉连, 成启明, 刘丽英, 等. 包头地区紫花苜蓿最适收获期研究. 中国饲料, 2022, 5: 117–121]

28 Lorenzo C D, García-Gagliardi P, Antonietti M S, et al. Improvement of alfalfa forage quality and management through the down-regulation of *MsFTa1*. Plant Biotechnol J, 2020, 18: 944–954

29 Zhang L L, Jiang X, Cui J, et al. Cloning and functional verification of flowering regulation gene *MsCIB2* in alfalfa (in Chinese). Acta Agrestia Sin, 2025, 33: 335–350 [张丽丽, 蒋旭, 崔婧, 等. 紫花苜蓿开花调控基因MsCIB2的克隆及功能验证. 草地学报, 2025, 33: 335–350]

30 Li G Y, Zhang L J, Sun Q Z, et al. Comparison of the nutrition character of alfalfa in different growth stages (in Chinese). Cereal Feed Ind, 2014, 5: 44–46+50 [李光耀, 张力君, 孙启忠, 等. 苜蓿不同生育期营养特性的对比分析研究. 粮食与饲料工业, 2014, 5: 44–46+50]

31 Wang H B, Guo X, Zhu M, et al. Cornell net carbohydrate and protein system to evaluate the nutritional value of sweet sorghum and corn stover (in Chinese). Jiangsu Agric Sci, 2017, 45: 165–168 [王宏博, 郭宪, 褚敏, 等. 应用康奈尔净碳水化合物/蛋白质体系评价甜高粱、玉米秸秆的营养价值. 江苏农业科学, 2017, 45: 165–168]

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

32 Ji F C, Wang Y F, Zhang H R, et al. Effect of harvest periods on field productive performance and *in vitro* digestibility of beef of sweet sorghum (in Chinese). Pratac Sci, 2025, 42: 661–668 [吉方财, 王一凡, 张洪瑞, 等. 收获期对甜高粱田间生产性能及肉牛瘤胃体外消化性能的影响. 草业科学, 2025, 42: 661–668]
33 Ji Q W, Han R D, Dong K H, et al. Nutrient contents and rumen degradability characteristics of *Bothriochloa ischaemum* at different growth stages (in Chinese). Acta Agrestia Sin, 2015, 23: 1295–1302 [姬奇武, 韩汝旦, 董宽虎, 等. 不同生长期白羊草的营养成分及绵羊瘤胃降解特性. 草地学报, 2015, 23: 1295–1302]
34 Nan M, Li J, Wang C, et al. Comparative study on yield and quality of spring sowing oat at different mowing stages in northwest arid region (in Chinese). Acta Agrestia Sin, 2023, 31: 1878–1885 [南铭, 李晶, 王昶, 等. 甘肃中部春播燕麦不同收获期产量和品质比较研究. 草地学报, 2023, 31: 1878–1885]
35 Shi Z Z, Wang M L, Liu Y Z. Strategic choice of China’s forage industry development under reverse globalization (in Chinese). J Agric Sci Technol, 2019, 21: 1–8 [石自忠, 王明利, 刘亚钊. 逆全球化背景下我国牧草产业发展的战略选择. 中国农业科技导报, 2019, 21: 1–8]
36 Pei C X, Dong K H, Fan H. Effect of different harvest time and drying methods on nutrient as water soluble carbonhydrates of herbage (in Chinese). Chin J Grassl Sci, 2002, 1: 33–38 [裴彩霞, 董宽虎, 范华. 不同收获期和干燥方法对牧草营养成分含量的影响. 中国草地学报, 2002, 1: 33–38]
37 Liu Z K, Wang Y F, Wang S P, et al. Drying method effects on forage nutritive quality (in Chinese). Acta Pratac Sin, 2004, 3: 47–51 [刘忠宽, 王艳芬, 汪诗平, 等. 不同干燥失水方式对牧草营养品质影响的研究. 草业学报, 2004, 3: 47–51]
38 Sun X F, Wei Y M, Zhang G Q, et al. Feeding value of oat and wheat silage (in Chinese). Cereal Feed Ind, 2003, 4: 27–29 [孙小凡, 魏益民, 张国权, 等. 麦类作物青贮饲料营养价值分析. 粮食与饲料工业, 2003, 4: 27–29]
39 Ferraretto L F, Shaver R D, Luck B D. Silage review: recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting. J Dairy Sci, 2018, 101: 3937–3951
40 Liu Y, Zi X J, Chen T, et al. Research progress and countermeasure on microbial diversity of forage silage (in Chinese). Chin J Anim Nutr, 2021, 33: 6084–6092 [刘悦, 字学娟, 陈婷, 等. 饲草青贮微生物多样性研究进展及对策. 动物营养学报, 2021, 33: 6084–6092]
41 Wang Y, Yu Z. Effect of different additives on quality of *Medicago sativa* silage (in Chinese). Chin J Grassl Sci, 2010, 32: 80–84 [王莹, 玉柱. 不同添加剂对紫花苜蓿青贮发酵品质的影响. 中国草地学报, 2010, 32: 80–84]
42 Wang T W, Cao Y H, Yang G, et al. Effects of lactic acid bacteria on the quality of silage and health of ruminants (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2020, 50: 927–938 [王天威, 曹艳红, 杨果, 等. 乳酸菌对青贮品质及草食家畜健康的影响. 中国科学:生命科学, 2020, 50: 927–938]
43 National Research Council. Nutrient Requirements of Dairy Cattle, 7th revised edition. Washington: National Academy Press, 2001
44 Storm E, Ørskov E R. The nutritive value of rumen micro-organisms in ruminants. Br J Nutr, 1983, 50: 463–470
45 Clark J H, Klusmeyer T H, Cameron M R. Microbial protein synthesis and flows of nitrogen fractions to the duodenum of dairy cows. J Dairy Sci, 1992, 75: 2304–2323
46 Cabrita A R J, Dewhurst R J, Abreu J M F, et al. Evaluation of the effects of synchronising the availability of N and energy on rumen function and production responses of dairy cows—a review. Anim Res, 2006, 55: 1–24
47 Bach A, Calsamiglia S, Stern M D. Nitrogen metabolism in the rumen. J Dairy Sci, 2005, 88: E9–E21
48 Hoover W H, Stokes S R. Balancing carbohydrates and proteins for optimum rumen microbial yield. J Dairy Sci, 1991, 74: 3630–3644
49 Calsamiglia S, Ferret A, Reynolds C K, et al. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants. Animal, 2010, 4: 1184–1196
50 Stokes S R, Hoover W H, Miller T K, et al. Impact of carbohydrate and protein levels on bacterial metabolism in continuous culture. J Dairy Sci, 1991, 74: 860–870
51 Seo I J, Lee D H, Lee S H. Effects of different ratios of nonfibrous carbohydrate to ruminally degradable protein on *in vitro* fermentation and lactation performance of dairy cows. J Anim Sci Technol, 2005, 47: 625–636
52 Li J W, Gui L S, Zhou L, et al. Effects of dietary different non-fibrous carbohydrate/neutral detergent fiber on growth performance,rumen fermentation and microbial diversity of plateau-type fattening tibetan sheep (in Chinese). Chin J Anim Nutr, 2021, 33: 7180–7191 [李蒋伟, 桂林生, 周力, 等. 饲粮不同非纤维性碳水化合物/中性洗涤纤维对高原型育肥藏羊生长性能、瘤胃发酵及微生物多样性的影响. 动物营养学报, 2021, 33: 7180–7191]
53 Chen Q, Cui Y, Zhang Z, et al. Effect of alfalfa supplementary change dietary non-fibrous carbohydrate (NFC) to neutral detergent fiber (NDF) ratio on rumen fermentation and microbial function in Gansu alpine fine wool sheep (*Ovis aries*). Anim Biotechnol, 2024, 35: 2262539
54 Song S D, Chen G J, Guo C H, et al. Effects of exogenous fibrolytic enzyme supplementation to diets with different NFC/NDF ratios on the

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

growth performance, nutrient digestibility and ruminal fermentation in Chinese domesticated black goats. Anim Feed Sci Tech, 2018, 236: 170–177
55 Guo X, Sun L, Zheng Z, et al. Study on rumen degradability and intestinal digestibility of mutton sheep diets with different concentrate-to-forage ratios and nonfiber carbohydrates/neutral detergent fiber ratios. Animals, 2024, 14: 2816
56 Zhu Y, Sun Y, Zhang N, et al. Effects of dietary-fiber levels on RANK/RANKL/OPG expression in the appendix of weanling rabbits. J Microbiol Immunol Infect, 2020, 53: 696–704
57 Fu Y P, Li A H, Kang Y M, et al. Components and contents of fatty acids of four grasslands in Yanchi, Ningxia (in Chinese). Pratac Sci, 2013, 30: 2024–2028 [伏映萍, 李爱华, 康艳梅, 等. 宁夏盐池天然草地牧草脂肪酸的组成及含量. 草业科学, 2013, 30: 2024–2028]
58 Sugano M, Hirahara F. Polyunsaturated fatty acids in the food chain in Japan. Am J Clin Nutr, 2000, 71: 189S–196S
59 Na Y, Sun Q Z, Wang H M. Fatty acid characteristics of forage silages from the Hulunbeir Meadow Steppe (in Chinese). Acta Pratac Sin, 2017, 26: 215–223 [那亚, 孙启忠, 王红梅. 呼伦贝尔草甸草原牧草青贮饲料脂肪酸成分研究. 草业学报, 2017, 26: 215–223]
60 Sun X Q, Mao Z X, Fu H, et al. Fatty acid characteristics of forage and its influence factors (in Chinese). Pratac Sci, 2014, 31: 1774–1780 [孙晓青, 毛祝新, 傅华, 等. 牧草中脂肪酸及其影响因素. 草业科学, 2014, 31: 1774–1780]
61 Chilliard Y, Ferlay A, Rouel J, et al. A review of nutritional and physiological factors affecting goat milk lipid synthesis and lipolysis. J Dairy Sci, 2003, 86: 1751–1770
62 Kaspari M, Chase J. The seventh macronutrient: how sodium shortfall ramifies through populations, food webs and ecosystems. Ecol Lett, 2020, 23: 1153–1168
63 Li Y, Piek S, Mayemba E P, et al. Unraveling the drivers of forage quality variation in the Serengeti. Ecology, 2025, 106: e70168
64 Leonhard-Marek S, Martens H. Effects of potassium on magnesium transport across rumen epithelium. Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol, 1996, 271: G1034–G1038
65 Taylor T C. The availability of the calcium and phosphorus of plant materials for animals. Proc Nutr Soc, 1965, 24: 105–112
66 Smart M, Cymbaluk N F. Role of nutritional supplements in bovine Lameness—review of nutritional toxicities. In: Lameness In Cattle, 1997. Philadelphia: WB Saunders Company. 145–161
67 Manston R. The influence of dietary calcium and phosphorus concentration on their absorption in the cow. J Agric Sci, 1967, 68: 263–268
68 Baligar V C, Grunes D L, Belesky D P, et al. Mineral composition of forage legumes as influenced by aluminum. J Plant Nutr, 2001, 24: 215–227

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108

A preliminary study on the evaluation index system of forage nutrients for the concept of “Standard Forage”

LI NiNi[1], TIAN Di[1*], CHEN BingRui[1], XU LongChao[2], LIU ZhiQuan[3], HE ZhiXiong[4], ZHONG Jin[5], JING HaiChun[3] & FANG JingYun[6]

[1] *State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*
[2] *College of Environmental Science and Ecology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China*
[3] *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Forage Breeding-by-Design and Utilization, Beijing 100093, China*
[4] *Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*
[5] *Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[6] *Institute of Ecology, Peking University, Beijing 100871, China*
* *Corresponding author, E-mail: tiandi@bjfu.edu.cn*

Leymus chinensis (sheep grass), *Medicago sativa* (alfalfa), *Avena sativa* (oats), and *Sorghum bicolor* (sweet sorghum) are four dominant forage species in northern China. This study reviewed forage quality standards from seven domestic and international institutions. Through field experiments conducted at the Xiertala Farm in Inner Mongolia, the dynamics of nutrient content throughout the entire growth period of these four forages were analyzed, and their harvest-stage quality was compared with national and international standards. The key findings are as follows: (i) the optimal harvesting periods for hay production were determined as follows: alfalfa at full bloom, oats at the waxy stage, sweet sorghum at the end of jointing, and sheep grass at the heading stage. Comparing the nutrient contents of the four forages with domestic and international premium quality standards revealed that only alfalfa approached supreme-grade standards (China/U.S.). (ii) Comprehensive analysis identified crude protein (CP), rumen degradable protein (RDP), non-fiber carbohydrate (NFC), and non-structural carbohydrate (NSC), etc., as key indicators influencing forage quality. (iii) Changes in ratios such as RDP:NFC, NFC:NDF, and SFA:UFA during the growth period were also examined, aiming to extend the evaluation perspective to the level of nutrient absorption and utilization by livestock. The exploration of these forage quality indicators lays a scientific foundation for establishing a standardized evaluation system for high-quality forage in northern China and facilitates the transition of the “Standard Forage” initiative from concept to practice.

ecological grass-based livestock husbandry, dominant forage species, nutrient metrics, stoichiometry, standard forage

doi: 10.1360/SSV-2025-0108

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSV-2025-0108