



苜蓿干草与青贮的调制技术及其在反刍动物日粮中的应用进展

郭文亮 李科南 杜海东 娜仁花

Research progress on the preparation of alfalfa hay and silage and their applications in the ruminant diet

GUO Wenliang, LI Ke'nan, DU Haidong, Narenhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0796>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

幼龄反刍动物瘤胃菌群研究进展

Research progress concerning the rumen microflora of juvenile ruminants

草业科学. 2020, 37(2): 363 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0278>

日粮uNDF对反刍动物生长和代谢的作用

Nutritional function of undigested neutral detergent fiber in ruminant

草业科学. 2018, 12(5): 1247 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0587>

反刍动物亚急性瘤胃酸中毒的易感性因素及生物标记物研究进展

Research advances on susceptibility factors and biomarkers of subacute ruminal acidosis in ruminants

草业科学. 2019, 36(8): 2142 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0192>

反刍动物纤维酶制剂作用机理及其应用效果

Exogenous fibrolytic enzymes: Mechanism and its application in ruminants

草业科学. 2019, 36(9): 2395 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0724>

反刍动物食糜肽氮含量测定方法

Determination of peptide nitrogen in ruminant digesta

草业科学. 2020, 37(4): 784 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0284>

日粮粗蛋白质水平对育肥湖羊瘤胃微生物组成和发酵参数的影响

Effects of dietary crude protein level on rumen microbial composition and the fermentation parameters of finishing *Hu* lambs

草业科学. 2020, 37(5): 975 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0439>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0796

郭文亮, 李科南, 杜海东, 娜仁花. 苜蓿干草与青贮的调制技术及其在反刍动物日粮中的应用进展. 草业科学, 2024, 41(1): 218-231.

GUO W L, LI K N, DU H D, Narenhua. Research progress on the preparation of alfalfa hay and silage and their applications in the ruminant diet. Pratacultural Science, 2024, 41(1): 218-231.



苜蓿干草与青贮的调制技术及其在反刍动物日粮中的应用进展

郭文亮, 李科南, 杜海东, 娜仁花

(内蒙古农业大学动物科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 苜蓿 (*Medicago sativa*) 干草和青贮均是可长期保存的优质粗饲料, 但两者氮组分和乳酸菌发酵产物的不同使其部分营养价值存在差异。本文总结了国内外苜蓿干草和青贮在动物饲养中的研究, 发现其对反刍动物生产性能、瘤胃发酵特性、乳肉品质和甲烷排放的影响主要取决于三点: 1) 其本身质量的高低。苜蓿调制后的优劣会影响其采食量及肠道消化率; 2) 与其他饲料的组合效应。瘤胃可降解能氮平衡可改善瘤胃发酵参数; 3) 替换饲喂比例。低比例同质量替换饲喂对机体影响甚微; 并列部分苜蓿干草(收割、干燥及饲喂)和青贮(添加剂、菌剂及打包)的调制进展, 旨在为苜蓿的高效利用提供理论依据。

关键词: 苜蓿; 氮组分; 瘤胃可降解蛋白; 反刍动物; 乳肉品质; 瘤胃发酵; 调制进展

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)01-0218-14

Research progress on the preparation of alfalfa hay and silage and their applications in the ruminant diet

GUO Wenliang, LI Ke'nan, DU Haidong, Narenhua

(College of Animal Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: Alfalfa hay and silage are high-quality forages that can be stored for a long time. However, the difference in nitrogen composition and lactic acid bacteria fermentation products between them leads to differences in nutritional value. This review summarizes the research on alfalfa hay and silage in animal feeding, and finds that the effects of alfalfa hay or silage on ruminants production performance, rumen fermentation characteristics, meat or milk quality and methane emission mainly depend on three points: 1) The quality of alfalfa hay or silage. The feed intake and intestinal digestibility of alfalfa were affected by its preparation quality. 2) Combination effect with other feed materials. Rumen degradable energy nitrogen balance can improve rumen fermentation parameters. 3) Replacement feeding ratio. Low proportion of the same mass replacement feeding has little effect on the ruminants. The research progress in the preparation of some alfalfa hay (harvesting, drying and feeding) and silage (additives, bactericides and packaging) is also presented in order to provide theoretical basis for the efficient utilization of alfalfa.

Keywords: alfalfa; nitrogen composition; rumen degradable protein; ruminants; milk and meat quality; rumen fermentation; preparation progress

收稿日期: 2022-10-12 接受日期: 2023-03-30

基金项目: 内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划项目 (NMGIRT2322); 内蒙古自然科学基金项目 (2021MS03009)

第一作者: 郭文亮 (1999-), 男, 内蒙古商都人, 博士, 主要从事动物环境与营养研究。E-mail: 18686197338@163.com

通信作者: 娜仁花 (1969-), 女 (蒙古族), 内蒙古呼和浩特人, 教授, 博导, 主要从事动物环境与营养研究。E-mail: nrh0123456@hotmail.com

Corresponding author: Narenhua E-mail: nrh0123456@hotmail.com

苜蓿 (*Medicago sativa*) 是多年生豆科植物, 营养全面, 适口性好, 氨基酸组成平衡, 富含维生素和矿物质^[1], 其根、茎、叶含有丰富的生物活性物质, 具有抗病毒, 抗氧化, 提高免疫功能等功效^[2-3], 是世界公认的“牧草之王”^[4]。苜蓿生长速度快, 根系发达, 与根瘤菌共生具有固氮能力, 可改良土壤、防治杂草、优化生态环境, 是全球种植面积最大的优质牧草^[5]。苜蓿的最适收割期为现蕾期至初花期, 所以调制干草和青贮是最常用的长期贮藏方式, 可解决规模化牧场饲草四季和区域性不足问题。2017 至 2020 年, 中国的苜蓿产量逐年提高, 从 355 万 t 增至 400 万 t, 其中为规模化养牛场提供优质苜蓿干草 120 万 t, 青贮 60 万 t, 其他 220 万 t, 二级及以下的苜蓿则饲喂其他家畜^[6]。优质苜蓿干草仍然存在不足, 2020 年苜蓿干草进口量达 124 万 t, 2021 年末进口量增至 159.61 万 t, 美国仍为最大进口国^[7-8]。由于进口苜蓿干草价格昂贵, 国内优质干草供应不足, 大多数牧场使用苜蓿青贮替代干草饲喂, 但两者是否可完全替换饲喂, 需了解苜蓿不同调制方式下的营养成分变化。

苜蓿干草是传统的保存方式, 未经微生物发酵, 真蛋白含量高, 氨基酸种类齐全^[9], 含有较多的物理有效纤维 (physically effective neutral detergent fiber, peNDF)^[10], 可刺激咀嚼、唾液分泌和反刍, 对瘤胃微生物生存, 预防酸中毒有重要作用^[11]。但潮湿易发霉, 且干燥后的叶片产量和营养损失率平均可达 24.95% 和 16% 左右^[12], 田间制作苜蓿干草的

不当操作可使干物质损失达 30.93%^[13]。苜蓿青贮适口性和饲喂价值较高, 青绿多汁, 营养保存完整, 在实际生产中可更有效的与其他饲料进行混合, 避免饲喂时的叶片脱落和粉尘问题^[14]。但大量食用具有腹泻、酸中毒和胃胀的风险^[15], 操作不当、过久储存会使有害菌发酵, 粗蛋白 (crude protein, CP) 水解产生非蛋白氮 (non-protein nitrogen, NPN), 降低苜蓿青贮质量^[9, 16-17]。

干草制作和青贮均为苜蓿常用的保存方法, 不同调制方式对营养物质损失不一 (干草制作平均损失在 30%~50%, 苜蓿青贮为 5%~20%)^[18], 虽然青贮对营养物质损失较小, 但苜蓿青贮氮组分的改变和微生物发酵物质对机体的影响导致其始终无法完全替代干草。基于此, 本文综述了苜蓿干草和青贮两种调制方式的营养价值差异, 比较两者饲喂对反刍动物瘤胃发酵特性、生长性能、乳肉品质和甲烷排放的影响, 并提供部分调制进展以供生产参考。

1 苜蓿干草和青贮营养价值比较

苜蓿调制干草或青贮后营养物质成分表明, 苜蓿干草主要为机械损失, 而苜蓿青贮主要为微生物发酵产热使部分有机物损失, 进而导致其他营养物质水平相对比例提高 (表 1)。青贮后 CP、NDF 和酸性洗涤纤维 (acid detergent fiber, ADF) 的可溶成分增加, 提高其适口性与消化率^[16]。电镜观察发现, 苜蓿青贮后叶纤维结构混乱, 细胞轮廓基本消失, 可被部分降解, 更易于家畜消化利用^[10]。苜蓿相较其

表 1 苜蓿干草和青贮营养价值比较
Table 1 Comparison of the nutritional value of alfalfa hay and silage

调制方式 Forage finishing method	样本量 Sample size	营养成分 Nutrition fact									
		干物质 Dry matter/ % FM	粗蛋白 Crude protein/ % DM	水溶氮 Water soluble nitrogen/ % CP	瘤胃可 降解蛋白 Rumen degradable protein/% CP	中性洗 涤纤维 Neutral detergent fiber/% DM	酸性洗 涤纤维 Acid detergent fiber/% DM	糖 Sugar/ % DM	淀粉 Starch/ % DM	粗脂肪 Ether extract/ % DM	灰分 Ash/ % DM
苜蓿干草 Alfalfa hay	5 925	91.7 ± 2.3	19.5 ± 3.5	40.5 ± 9.2	13.7 ± 2.4	40.5 ± 6.9	33.8 ± 5.8	6.67 ± 2.13	2.00 ± 1.11	2.56 ± 0.62	11.0 ± 1.6
苜蓿青贮 Alfalfa silage	1 453	38.1 ± 8.5	19.5 ± 2.6	61.7 ± 9.7	15.8 ± 2.5	41.7 ± 5.2	36.3 ± 4.5	2.45 ± 1.62	1.18 ± 0.81	3.27 ± 0.44	13.9 ± 2.7

数据由唐山科博兰谷饲料检测技术服务有限公司提供。FM: 鲜物质基础; DM: 干物质基础; CP: 粗蛋白含量; 下表同。
The data were provided by Cumberland Valley Analytical Service, located in Tangshan. FM: fresh material basis; DM: dry material basis; CP: crude protein content. This is applicbale for the following tables as well.

表 2 苜蓿干草和青贮氮组分比较
Table 2 Comparison of nitrogen composition between alfalfa hay and silage

调制方式 Forage finishing methods	干物质 Dry matter/ (g·kg ⁻¹)	粗蛋白 Crude protein/ (g·kg ⁻¹) DM	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/ (g·kg ⁻¹) DM	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/ (g·kg ⁻¹) DM	氨氮 NH ₃ -N/ %Total N	游离氨基酸 Free amino acid A/ %Total N	水溶氮 Water soluble nitrogen/ %Total N	非蛋白氮 Non-protein nitrogen/ %Total N	参考文献 Reference
苜蓿干草 Alfalfa hay	862.0	183.0	479.0		1.3	8.0		14.00	[19]
苜蓿青贮 Alfalfa silage	388.0	209.0	449.0		7.8	29.2		47.00	
苜蓿干草 Alfalfa hay	875.0	226.0	461.0	350.0	0.8	5.9		20.60	[20]
苜蓿青贮 Alfalfa silage	265.0	185.0	434.0	331.0	10.9	44.4		61.90	
苜蓿干草 Alfalfa hay	853.2	181.9	383.4	286.1			24.83	22.73	[21]
苜蓿青贮 Alfalfa silage	405.3	201.2	377.4	290.3			42.78	42.28	

他牧草的 CP 含量更高,青贮后 CP 降解为多肽、氨基酸和氨氮(NH₃-N)等 NPN 比例更高,通常比同干物质质量的干草高 2~3 倍,进而提高了瘤胃水溶 N 和瘤胃可降解蛋白(2% CP),氮组分不同是苜蓿青贮和干草的主要区别^[19-21](原料均为现蕾期—初花期间收割,无添加剂)(表 2)。通常苜蓿干草或青贮的质量与其 CP 水平正相关,大多数研究中苜蓿干草和青贮营养成分存在部分差异,但均在合理范围内。

2 苜蓿干草和青贮饲喂对反刍动物生产性能的影响

目前关于苜蓿干草和青贮饲喂反刍动物对其生产性能的研究结果尚不统一。与相同干物质质量苜蓿

干草相比,苜蓿青贮中的干物质能量和脂质含量更多,纤维减少,更易消化,估算每克干物质苜蓿青贮是苜蓿干草可消化能量值的 1.24 倍^[22]。使用苜蓿青贮代替 7.75% DM 苜蓿干草饲喂奶牛 30 d 发现,青贮组奶牛干物质采食量(dry matter intake, DMI)提高了 8.2%^[23]。Beaychemin 等^[24]使用 10% DM 苜蓿干草替代苜蓿青贮饲喂奶牛 21 d 后发现,奶牛 DMI 下降 3 kg·d⁻¹,末体重降低 15 kg。用 25% DM 苜蓿干草替代苜蓿青贮饲喂奶牛发现,饲喂苜蓿干草的奶牛 DMI 提高 2.5 kg·d⁻¹,但 DM、有机物质(organic matter, OM)和 NDF 表观消化率低于饲喂苜蓿青贮的奶牛(表 3)^[25]。以上研究结果表明,10%~25% 的苜蓿青贮替代苜蓿干草饲喂可提高奶牛采食量、营养物质

表 3 苜蓿干草和青贮饲喂对奶牛总表观消化率的影响
Table 3 Effects of alfalfa hay and silage feeding on total apparent digestibility of dairy

调制方式与饲喂量 Forage finishing methods and the ratio of feeds	总表观消化率 Total apparent digestibility/(g·kg ⁻¹) DM					参考文献 Reference
	干物质 Dry matter	有机物 Organic matter	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	粗蛋白 Crude protein	
100%苜蓿干草 100% alfalfa hay	548	553	408	430	665	[19]
100%苜蓿青贮 100% alfalfa silage	564	566	417	451	667	
25%苜蓿干草 25% alfalfa hay	645	671	385	318	556	[25]
25%苜蓿青贮 25% alfalfa silage	714*	747*	474*	292	584	

*, P<0.05。下表同。
*, P<0.05. This is applicable for the following tables as well.

消化率和生长性能。

也有研究表明苜蓿青贮对营养物质消化率无影响。Hristov 和 Broderick^[19] 使用全饲草日粮苜蓿青贮或干草饲喂奶牛发现, 苜蓿青贮饲喂使奶牛 DMI 提高 $2 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 但是 DM、OM、NDF、ADF 和 CP 的表观消化率无差异(表 3)。Grant 和 Ferraretto^[26]、Vagnoni 和 Broderick^[27]、Holden 等^[28] 发现苜蓿的饲喂方式不影响 DMI 和营养物质表观消化率, 青贮饲喂可降低奶牛采食时间^[29]。苜蓿青贮饲料品质的提升主要是乳酸菌发酵, Oliveirv 等^[30] 对 31 篇奶牛试验文章进行 Meta 分析发现, 苜蓿青贮接种乳酸菌发酵可提高其的 DM 含量, 降低梭杆菌和霉菌生长、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度, 但对饲料效率和营养物质消化率无影响。以上结果可能是动物的肠道补偿消化所致。Merchen 和 Satter^[31] 使用苜蓿干草或低水分青贮饲喂十二指肠和回肠插管羔羊发现, 饲喂苜蓿青贮的羔羊瘤胃 OM 降解率较高, 但饲喂干草的羔羊小肠消化率较高, 总营养物质消化率无差异, 表明苜蓿干草和青贮的瘤胃降解差异会在肠道部分进行补偿消化。

苜蓿青贮会使 CP 水解, 降低其优质蛋白水平。朱晓艳等^[32] 使用 14.5% 苜蓿青贮替代苜蓿干草饲喂奶牛发现, 两组奶牛 DMI 无差异, 但苜蓿青贮 NDF 表观消化率提高, CP 表观消化率下降, 说明苜蓿干草的可消化 CP 含量高于苜蓿青贮^[33]。有研究指出, 苜蓿干草的适口性更好, 可提升采食量, 进而改善其生长性能。Beauchemin 等^[34] 使用 45% DM 的苜蓿干草或青贮饲喂奶牛 21 d 发现, 苜蓿干草组的奶牛 DMI 提高 $2.8 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 末体重提高 12 kg。Lafereniere 等^[35] 使用 100% DM 苜蓿干草或青贮饲喂育肥肉牛两年发现, 与饲喂苜蓿青贮的肉牛相比, 饲喂干草的肉牛 DMI、日增重、肉料比和末体重分别提高了 $2.43 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 、0.02 和 49.3 kg。使用 N^{15} 同位素标记法进一步测定饲喂苜蓿奶牛的氮代谢发现, 苜蓿青贮组的奶牛 DM、N、NDF 和 ADF 摄入量均高于干草组奶牛, 但干草组奶牛瘤胃容积、瘤胃总氮量和瘤胃氮流出率高于青贮组, 说明 45% DM 以上饲喂苜蓿青贮使瘤胃内 NPN 较多, 瘤胃壁吸收入血转化为尿氮、粪氮, 体内沉积量下降^[9, 34]。

以上研究结果存在差异可能由两方面原因造成。一方面是动物机体对营养物质的吸收与转化有

限, 苜蓿干草和青贮均提供了较高的营养物质含量, 部分替换饲喂对动物生产性能和营养物质消化率影响较小。另一方面则是饲草对动物的影响程度取决于饲草本身的质量, 同一试验下苜蓿干草或青贮蛋白含量虽相似(部分差异已由其他原料调整为等能等氮), 但其氮组分不同。发酵良好的青贮 DM 含量较高, CP 水解量少, 会散发香气, 提高适口性和消化率, 而发酵不好的青贮 pH 降低, 产生大量的发酵终产物(乳酸、短链脂肪酸、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、脂类和生物胺类)影响采食量, 且动物生产性能的提高主要是 CP 和碳水化合物供能, 青贮发酵使其转化为 NPN、乳酸和其他挥发性脂肪酸流失, 降低其真蛋白和能量水平, 进而影响蛋白消化吸收效率^[26, 29, 36]。

3 苜蓿青贮和干草饲喂对瘤胃降解和发酵参数的影响

反刍动物饲料的营养价值可由其在瘤胃内的消化速度和程度反映。体外消化试验经济便捷, 具有一定的参考价值。蔺芳^[10] 进行体外瘤胃试验发现苜蓿青贮叶片被瘤胃微生物降解的程度更高, DM、NDF 和 ADF 降解率高于苜蓿干草^[37](表 4)。李菲菲^[38] 体外试验有同样发现, 但干草 CP 有效降解率高于青贮。说明苜蓿青贮可提高瘤胃 DM 和纤维的降解率, 但对 CP 存在不利影响。挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFA)是反刍动物的主要能量来源。Getachew 等^[33] 体外发酵试验发现, 苜蓿干草的代谢能较苜蓿青贮提高了 $1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ DM, DM 消化率高于苜蓿青贮, 苜蓿干草组的 VFA 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度有高于青贮的趋势, 异戊酸盐含量和乙酸/丙酸比例大于青贮(表 5), 但此研究苜蓿干草较苜蓿青贮 CP 含量更高。微生物嘌呤可体现微生物蛋白含量。田雨佳^[14] 体外法测定发酵 24 h 后的苜蓿干草和青贮, 与苜蓿青贮组相较, 苜蓿干草组 CP 有效降解率较高, 发酵液 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度降低, 总嘌呤含量和菌体蛋白均有提高^[37], 表明苜蓿青贮对 CP 的预消化作用会影响瘤胃菌体蛋白的合成。比起体外试验, 体内消化试验具有真实消化吸收状态。王吉东等^[39] 使用原位培养在瘰管奶牛上评定了苜蓿干草和青贮的降解率, 瘤胃降解 72 h 后, 苜蓿干草 CP、NDF 和 ADF 有效降解率均高于苜蓿青贮。Calberry 等^[11] 用 10%DM 苜蓿青贮替代苜蓿干草饲喂奶牛后, 瘤胃

表 4 苜蓿干草和青贮的营养物质瘤胃降解率
Table 4 Rumen degradation rate of nutrients in alfalfa hay and silage

研究方法 Condition	调制方式 Forage finishing method	瘤胃降解率 Rumen digestibility/(g·kg ⁻¹) DM				参考文献 Reference
		干物质 Dry matter	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	粗蛋白 Crude protein	
体外24 h In vitro 24 h	苜蓿干草 Alfalfa hay	825.0 [*]	495.0			[33]
	苜蓿青贮 Alfalfa silage	785.0	490.0			
体外48 h In vitro 48 h	苜蓿干草 Alfalfa hay	692.0	513.0	496.00		[37]
	苜蓿青贮 Alfalfa silage	709.0	551.0	513.00		
体外72 h In vitro 72 h	苜蓿干草 Alfalfa hay	665.6	433.6	511.70	855.8	[38]
	苜蓿青贮 Alfalfa silage	712.8	439.1	523.80	847.8	
原位培养72 h In situ cultivation 72 h	苜蓿干草 Alfalfa hay	656.4	561.8 [*]	55.41 [*]	833.0 [*]	[39]
	苜蓿青贮 Alfalfa silage	623.5	462.6	450.5	702.8	

表 5 苜蓿干草和青贮饲喂对反刍动物瘤胃发酵参数的影响
Table 5 Effects of alfalfa hay and silage feeding on ruminant fermentation parameters

研究方法 Condition	调制方式与饲喂量 Forage finishing methods and the ratio of feeds	瘤胃发酵参数 Fermentation in rumen				参考文献 Reference
		pH	氨气NH ₃ / (mL·h ⁻¹)	挥发性脂肪酸 Volatile fatty acids/(mmol·L ⁻¹)	氨氮NH ₃ -N/ (mg·dL ⁻¹)	
体外24 h In vitro 24 h	苜蓿干草 Alfalfa hay			34.80	23.40	[33]
	苜蓿青贮 Alfalfa silage			30.40	21.50	
体外24 h In vitro 24 h	苜蓿干草 Alfalfa hay			30.04	26.51	[14]
	苜蓿青贮 Alfalfa silage			28.52	27.59	
体外48h In vitro 48 h	苜蓿干草 Alfalfa hay			120.00	21.50	[37]
	苜蓿青贮 Alfalfa silage			119.00	21.80	
饲喂 Feeds	100%苜蓿干草 100% alfalfa hay	6.44	12.5 [*]	127.00a		[19]
	100%苜蓿青贮 100% alfalfa silage	6.65 [*]	11.7	117.70b		
饲喂 Feeds	10%苜蓿干草 10% alfalfa hay	6.27b	6.57	97.10a		[11]
	10%苜蓿青贮 10% alfalfa silage	6.47 [*]	5.56	79.80b		
饲喂 Feeds	75%苜蓿干草 75% alfalfa hay	6.12	10.3b	137.00		[27]
	75%苜蓿青贮 75% alfalfa silage	6.14	13.8 [*]	147.00		
饲喂 Feeds	10%苜蓿干草 10% alfalfa hay	5.97		143.40	3.23b	[24]
	10%苜蓿青贮 10% alfalfa silage	6.18		133.30	4.80 [*]	
饲喂 Feeds	25%苜蓿干草 25% alfalfa hay	6.60		100.00		[25]
	25%苜蓿青贮 25% alfalfa silage	6.47		109.00		
饲喂 Feeds	23%苜蓿干草 23% alfalfa hay	6.30	12.6	128.71		[29]
	26%苜蓿青贮 26% alfalfa silage	6.36	10.7	125.04		

pH 提高 0.2, 总 VFA 下降, 乙酸、丙酸和丁酸浓度分别降低 8.8、5.0 和 3.2 mmol·L⁻¹。以上研究结果表明, 苜蓿青贮的预消化作用提高了其 CP 的水溶 N 和难消化 N, 苜蓿干草的优质蛋白较多, 在胃肠道滞留时间长, 可产生更多可吸收的氨基酸和多肽, 营养物质的充分发酵提高了瘤胃内 VFA 浓度。

但 Beaychemin 等^[24]发现苜蓿青贮的瘤胃 CP 降解状态更好, 增加 10% 苜蓿干草饲喂比例后, 奶牛瘤胃 pH 提高, 总 VFA 趋于下降, NH₃-N 含量趋于提高, 这是由于 peNDF 的降低减少了进食时间和唾液分泌, 进而降低了瘤胃 pH, 且苜蓿青贮适量的 NPN 为瘤胃微生物提供了氮源, 产生更多的 VFA 和菌体蛋白。还有研究发现, 25% 苜蓿干草或青贮替换饲喂对瘤胃降解特性并无影响^[25, 29]。

综上所述, 苜蓿青贮发酵可提升苜蓿 CP、NDF 与 ADF 的可溶成分, 改善适口性, 但部分 CP 在微生物的作用转化为 NPN 和非氨 NPN (non-ammonia NPN) 等水溶 N (表 6)^[9], 过瘤胃蛋白转为瘤胃可降解蛋白, 升幅为 2%~3% CP (表 1)。日粮 70% DM 苜蓿干草或青贮饲喂奶牛后, 饲喂苜蓿青贮奶牛瘤胃内的 NH₃-N、非氨 NPN 和非菌体蛋白 N 均显著高于苜蓿干草组, 这说明青贮过程中微生物产热会形成美拉德复合物, 瘤胃微生物难以消化利用。Peltekova 和 Broderick^[21]利用体外发酵法测定苜蓿干草和苜蓿青贮发酵液中的 NH₃、总氨基酸和菌体蛋白发现, 虽然苜蓿青贮的 NPN 含量较高, 但两者的菌体蛋白合成量相似, 表明苜蓿青贮后增加的 NPN 会降低 CP 利用率。因此, 氮组分分布决定了苜蓿青贮质量,

进而影响瘤胃能氮平衡。Lüscher 等^[40]指出, 豆科牧草 CP 含量较高, 青贮过程的 CP 水解会导致瘤胃能量与蛋白吸收不同步, 适量替换可提高瘤胃菌体蛋白流量, 大量饲喂导致尿氮排泄增加。黄品等^[41]体外发酵试验表明, 苜蓿干草与青贮饲喂比例为 1:1 时, 瘤胃发酵指数最佳。但最佳饲喂量需考虑与能量饲料配比的组合效应, 当高湿玉米 (*Zea mays*) 与苜蓿的饲喂比例从 2.4:7.5 提高至 4:5 时, 与苜蓿干草相较, 饲喂苜蓿青贮的奶牛瘤胃菌体蛋白流量更高, 说明提高瘤胃能量供应可提升苜蓿青贮的氮利用率^[27], 这也是造成上述研究结果不一的原因。通过体外发酵结果表明, 瘤胃可降解淀粉和可降解蛋白比为 2.3 时, 干物质降解率、VFA 和菌体蛋白合成量最大^[42], 苜蓿青贮的可降解蛋白比苜蓿干草高 2%, 替换饲喂可配比 4.6% 的瘤胃可降解淀粉, 其具体饲喂量需根据原料测定结果调整。因此, 苜蓿干草与青贮替换饲喂量取决于其原料氮组分分布, 当苜蓿青贮中 NPN 含量较高时, 适当加大能量饲料比例可与水溶 N 共同促进瘤胃菌体蛋白合成, 改善瘤胃发酵^[24], 但提高能量饲料比例会增加蛋白流失和亚急性酸中毒的风险^[11], 适宜的饲喂比例需保证饲料中的 peNDF 水平和瘤胃能氮平衡^[25]。

表 6 N¹⁵ 标记下的苜蓿干草和青贮氮组分分布
Table 6 Comparison of nitrogen composition between alfalfa hay and silage

调制方式 Forage finishing method	(g·kg ⁻¹) DM										
	总氮 Total nitrogen	氨氮 NH ₃ - Nitrogen	非氨非 蛋白氮 Non-ammonia Non-Protein nitrogen	固相氮 Solid-phase nitrogen	固相非 纤维氮 Solid nonfiber nitrogen	中性洗涤 不溶氮 Neutral detergent insoluble protein	酸性洗涤 不溶氮 Acid detergent insoluble protein	有效纤维 结合氮 Available fiber-bound nitrogen	总游离 氨基酸 Total free amino acid	还原糖 Reducing sugars	参考 文献 Reference
苜蓿干草 Alfalfa hay	40.2	0.17	14.1	25.0	19.1	4.5	1.4	3.1	6.7	17.2	[9]
苜蓿青贮 Alfalfa silage	42.4	4.73	23.5	13.1	8.6	2.8	1.7	1.1	67.2	32.1	

4 苜蓿青贮和干草饲喂对乳肉品质及产量的影响

优质牧草饲喂的牛肉含有的不饱和脂肪酸具有降血脂和抗癌等作用^[43]。Ciftci 等^[44]研究发现, 与麦秸饲喂的羔羊相比, 70% DM 苜蓿饲喂的羔羊肌肉和脂肪中的饱和脂肪酸 (saturated fatty acid, SFA) 和多不饱和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acid, PUFA) 含量更高, 而苜蓿干草或青贮处理对其含量影响不

显著。Lafereniere 等^[35]使用全饲草苜蓿干草或苜蓿青贮饲喂肉牛发现, 与苜蓿青贮相比, 饲喂苜蓿干草的肉牛屠宰胴体重更高, 背部皮下脂肪更厚, PUFA: 单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acid, MUFA) 值趋于增加, 对牛肉风味无影响, 但青贮饲喂的牛肉更多汁, 嫩度和口感更好。Pordomingo 等^[45]也发现, 随着苜蓿干草的饲喂比例提高 (40%、70% 和 100%), 牛肉营养成分、肉色、pH 和剪切力均不

受苜蓿干草饲喂量影响,但牛肉肌肉脂肪含量降低,嫩度和口感均有所下降。综上所述,苜蓿干草或青贮均可提高肉品质,且 70% DM 以下替换饲喂影响较小,70% DM 以上苜蓿干草饲喂的牛肉虽然口感有所降低,但对人体更健康,这可能是青贮发酵使苜蓿中的不饱和脂肪酸氢化饱和,进而减少了肌肉不饱和脂肪酸沉积前体物质造成的。

苜蓿青贮发酵产物会对乳产量和营养成分造成影响^[30]。Beaychemin 等^[34]使用 45% DM 苜蓿青贮替换苜蓿干草时,奶牛乳产量提高 11.2%,乳脂标准乳提高 9.8%,但乳糖、乳脂、乳蛋白含量差异不显著。范金星等^[23]使用裹包苜蓿青贮代替 7.5% DM 苜蓿干草饲喂奶牛 30 d 发现,苜蓿青贮组奶牛 DMI 提高了 8.2%,产奶量差异不显著,乳脂和乳蛋白分别提高了 7.2% 和 9.3%。Maulfair 和 Heinrichs^[29]使用 26.3% 的苜蓿青贮替代苜蓿干草饲喂奶牛同样发现,DMI、饲料效率和产奶量无差异,但乳脂率提高了 0.19%。Calberry 等^[11]研究发现,饲喂 10% DM 苜蓿干草或苜蓿青贮对奶牛瘤胃的氨浓度、采食量和产奶量无影响,但苜蓿青贮的奶牛瘤胃 pH 提高 0.2,乳脂和乳蛋白有提高的趋势。以上结果表明,适量饲喂苜蓿青贮可提高奶牛的乳脂率,可能是青贮产生的水溶性纤维物质瘤胃降解生成大量乳脂前体物质—乙酸,进而提高了乳脂率。

但也有人提出苜蓿干草的水溶性碳水化合物(water soluble carbohydrates, WSC)和 CP 比青贮高,等量饲喂具有更高的产奶效率^[36, 46]。Gislon 等^[25]研究发现,奶牛使用 25% 苜蓿干草替代苜蓿青贮时,饲喂苜蓿干草的奶牛($29.3 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$)产奶量有提高的趋势($27 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$),但对乳成分无影响。还有研究发现,在奶牛 40% DM 粗饲料中苜蓿干草可完全替代 TMR 中的苜蓿青贮,对奶牛采食量,瘤胃发酵参数,产奶量和乳成分均无影响^[47]。Beaychemin 等^[24]发现增加奶牛饲粮 10% 苜蓿干草饲喂比例后,对产奶量和乳脂含量无影响。以上矛盾的研究结果可能与其他的饲料原料配比有关,如使用 25% 的大麦(*Hordeum vulgare*)^[34]、31% 玉米青贮^[23]、50% 的玉米青贮^[29]、30% 玉米青贮^[11]等瘤胃降解较快的能量饲料可与水溶 N 含量多的苜蓿青贮共同促进瘤胃能氮平衡,提高菌体蛋白含量,进而改善乳脂、乳蛋白含量。虽提高瘤胃能量可改善苜蓿青贮的水溶

N 利用率,但会降低过瘤胃蛋白水平, Peltekova 和 Broderick^[21]利用二室模型计算得出,苜蓿干草的估计过瘤胃蛋白量为 34.6% CP,苜蓿青贮为 29.8% CP,相差 4.8% CP,每 10% DM 苜蓿青贮替换苜蓿干草饲喂应补充优质过瘤胃蛋白 0.48% CP。奶牛饲喂 44% DM 高湿玉米和 50% DM 苜蓿干草或青贮对产奶量和乳成分影响较小,但将 3% 高湿玉米替换为鱼粉(过瘤胃蛋白含量较高)后,两者乳产量和乳蛋白均显著提高,且苜蓿青贮提升较干草更大,表明过瘤胃蛋白不足是苜蓿青贮影响产奶量和乳品质的主要因素之一^[27]。因此,适宜的苜蓿青贮替换苜蓿干草饲喂需考虑能量饲料的瘤胃降解率和过瘤胃蛋白水平。

牛奶中的共轭亚油酸和 PUFA 具有抗癌、预防心血管疾病的作用,青贮或干草的饲喂会影响乳中脂肪酸比例、乳颜色和感官特性^[48]。Claudia 等^[49]研究发现,较干草饲喂,青贮饲喂奶牛产出的牛奶 SFA 含量更高,PUFA 和 MUFA 含量下降,或趋于降低^[50],说明青贮发酵使牧草中的不饱和脂肪酸氢化饱和,进而改变乳中脂肪酸组成。Kilcawley 等^[51]提出,青贮发酵产生的一些醇和酸可能会通过瘤胃直接转移到乳产品中,进而导致青贮饲养奶牛生产的乳产品口感和感官特性下降,而且质量较差青贮可能会导致牛奶被梭状芽胞杆菌内的孢子污染,影响乳制品的风味和质量^[36, 52]。因此,近年来欧盟已经将“干草牛奶”注册为“传统特产保证”,奶牛场有逐渐回归到无青贮饲喂的传统畜牧业的趋势^[48, 36]。目前,奥地利大约 15% 的牛奶是在符合干草牛奶标准的农场生产的^[53]。但也有研究表明同种牧草的青贮或干草脂肪酸浓度相似,饲喂对乳产品脂肪酸组成没有影响,这可能与饲喂量和日粮中的其他原料组成相关^[54-55]。综上所述,青贮发酵会改变饲草原料中的脂肪酸组成,增加微生物代谢产物,通过瘤胃壁吸收入血,进而影响乳肉产品质量,但其风味影响物质、转运机制及如何去除仍需进一步研究。

5 苜蓿青贮和干草饲喂对甲烷排放的影响

反刍动物胃肠道甲烷(CH_4)排放占畜牧业 CH_4 排放总量的 40%, CH_4 产量随粗饲料消化率的提高而降低,粗饲料加工具有 CH_4 减排的潜力。苜蓿作为牧草之王,相较其他粗饲料, CH_4 减排潜力

更高,主要包括三方面:一是使用豆科牧草的固氮作用(可降低大气中的 N_2O ,碳氮循环降低 CO_2 ,改善全球温室效应)可增加土壤肥力,增加其他轮作农作物产量,降低有机肥使用和肥堆中 CH_4 的排放量^[41]。二是 CH_4 产量通常与牧草的纤维含量呈正相关关系,与CP含量呈负相关关系,因此与纤维含量高的牧草相比,饲喂苜蓿可显著降低 CH_4 产量^[56]。三是饲喂优质牧草可提高动物生产力,进而降低单位动物产品的 CH_4 产量^[4]。Getachew等^[33]进行不同粗饲料的体外发酵试验发现,苜蓿干草和青贮的产气量与其他牧草相比较少,两者无差异。Xue等^[37]体外发酵发现,苜蓿青贮的48 h累计产气量和 CH_4 产量比苜蓿干草分别高 $3\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DM}$ 和 $2.1\text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,苜蓿干草的氢气产量比苜蓿青贮高 $1.11\text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,说明苜蓿青贮的可降解OM更多,进而提高了其 CH_4 产量,以上研究结果的差异可能是青贮质量差异所致。Gislon等^[25]研究发现,使用25%苜蓿干草替代苜蓿青贮饲喂奶牛时,饲喂苜蓿干草的奶牛($413\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$)有提高 CH_4 排放的趋势($396\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$),但同时提高了产奶量,因此单位乳产品的 CH_4 排放量并无差异。Fernandez等^[57]有同样发现,与饲喂苜蓿青贮的奶山羊相较,饲喂苜蓿干草的奶山羊代谢产热和采食量均提高,为瘤胃微生物提供的底物更多, CH_4 产量更高,但同时增加了体重和产奶量,因此单位采食量和单位产奶量下 CH_4 产量无差异。以上试验结果表明,苜蓿干草或青贮饲喂反刍动物均有 CH_4 减排的潜力,苜蓿干草的纤维含量较苜蓿青贮高,纤维分解菌发酵后 CH_4 产量有所更高^[20],但苜蓿的不同调制方式对单位动物产品 CH_4 排放影响较小。

6 苜蓿干草与青贮的调制进展

苜蓿干草的损失主要是每次收割,干燥翻面和饲喂过程。在新鲜时剪到合适长度(50 cm)、晒制厚度12~15 cm、2~3 h翻面一次、存储于干燥无风的室内,均可降低干草调制和发霉变质损失^[58]。在田间晒制苜蓿干草时,苜蓿收割与打捆方向一致,翻面方向与其相反可降低田间晒制损失,在晨露时打捆可加大干草湿度,减少叶片脱落,也可使用蒸汽露水机模拟露水,脱离气候限制^[13]。根据捆包大小加入不同剂量的干草剂可加快其干燥过程,提高打捆湿度^[59],但打包直径不可过大,避免干草产生热

损失^[12]。近年来的工业技术发展允许种植户在室内调制干草,使用大功率的通风设备、空气除湿机和热泵干燥技术等可降低田间干燥打捆损失和气候影响,扩大其商业化发展^[58,60]。西班牙70%的苜蓿只作为脱水苜蓿,是美国之后的世界第二大苜蓿出口国,脱水苜蓿不受气候影响,具有干燥速度快、霉变少、色泽鲜绿和营养物质损失少等优点,在国内的市场逐渐扩大,但能源需求也较高^[61]。除优化干草制作过程外,还可在苜蓿干草饲喂前进行加湿和制粒处理,以降低饲喂损耗和粉尘,提高适口性。研究发现,苜蓿干草水分重建对犊牛的DMI、生长性能、瘤胃发育和血液代谢均无不良影响,还可增加断奶后NDF的消化率^[62]。苜蓿干草制粒后运输体积降低75%,羔羊的DMI、平均日增重(average daily gain, ADG)和胴体重均有提高^[63],但也有研究表明,苜蓿的不同物理形态对犊牛的生产性能没有影响^[64]。因此,优化苜蓿从田间到干燥饲喂等措施可减少其机械和气候损失,苜蓿干草饲喂前加湿和制粒无任何不良影响。

苜蓿青贮主要问题为质量难以控制,易造成固相蛋白水解和流失。由于苜蓿CP含量较高,WSC含量低,单独青贮存在一定困难,随着青贮技术的成熟,国内外均使用添加剂、菌株移植和混合青贮来提高其质量。常见的苜蓿青贮添加剂包括糖蜜、氨水、甲酸、苹果酸和柠檬酸等,可快速降低pH,减少腐败菌发酵。靳超戈^[65]发现,在玉米和苜蓿混合青贮中加入 $10\text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}$ 甲酸和 $10\sim40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 蔗糖的青贮综合性能最佳。苜蓿青贮中加入0.5%苹果酸、柠檬酸和焦硫酸钠可提高青贮的好氧稳定性、DM含量、肠道消化率和PUFA比例,降低CP水解和DM损失,提高青贮质量^[20,66]。

植物乳杆菌和枯草芽孢杆菌是苜蓿青贮常用的菌株。植物乳杆菌属于乳酸菌属,接种于苜蓿青贮可加速青贮酸化,降低纤维含量、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度、 α 生育酚和 β -胡萝卜素的损失和有害菌数量,提高青贮的乳酸和总黄酮浓度、多不饱和脂肪酸比例、抗氧化酶活性、CP和有机酸含量来改善青贮质量^[67-69]。枯草芽孢杆菌接种也具有同样的效果^[70-71]。植物乳杆菌与添加剂组合添加可有更好的发酵效果。植物乳杆菌和糖蜜^[72]、五倍子单宁^[73]、产阿魏酰酯酶^[74]、纤维溶解酶^[75]和湿沙棘果渣^[76]组合添加均可提高苜

苜蓿青贮的 DM 含量,降低 pH 和 CP 水解,改善青贮质量,进而提高动物采食量、营养物质消化率、瘤胃 VFA 浓度和免疫抗氧化功能,还能降低瘤胃 CH₄ 产量。

与苜蓿混合青贮最为常见的为糖含量较高的全株玉米^[11],具有较高的能量和适口性,其他混合青贮原料还包括高粱 (*Sorghum bicolor*)、燕麦草 (*Arrhenatherum elatius*)^[19]、果园草 (orchard grass)^[37] 和红三叶 (*Trifolium pratense*)^[77]等,均可提升原料的饲喂价值。工业副产物中含有较高的营养物质含量和活性物质,与苜蓿混合青贮可实现循环利用。在苜蓿青贮中添加黄芪 (*Astragalus membranaceus*) 和山楂 (*Crataegus pinnatifida*) 残渣可降低有害菌的数量^[78],添加乳酪制作后产生的乳清可以提高采食

量^[79],柠檬酸渣和乳酸菌组合添加也可提高苜蓿青贮质量,增加好氧稳定性^[80]。且在全混合日粮中苜蓿青贮添加量不宜超过 40% DM 水平,过高会降低好氧稳定性,过低易出现梭菌变质的风险^[81]。

近年来裹包青贮独立包装的优势使商业化青贮饲料厂逐渐成熟,规范化流程也可解决操作不当造成的损失,解决全国各地青贮质量不一的问题^[82-83]。半干青贮的低水分性质对苜蓿青贮保存效果较好,Cismileanu^[84]对 6 个品种苜蓿进行半干青贮发现,苜蓿半干青贮 DM 含量较高,营养物质保存完整,可微量提高粗蛋白,降低粗纤维和糖含量,这可能是乳酸菌利用纤维等碳水化合物生长提高了微生物蛋白,且高 DM 含量减少 N 流失的结果(表 7)。

表 7 苜蓿干草和半干青贮营养价值比较
Table 7 Comparison of the nutritional value of alfalfa hay and semi-silage

调制方式 Forage finishing method	营养成分 Nutrition facts/(g·kg ⁻¹) DM						参考文献 Reference
	干物质 Dry matter	粗蛋白 Crude protein	粗纤维 Crude fibre	粗脂肪 Ether extract	灰分 Ash	无氮浸出物 Nitrogen-free extract	
苜蓿干草 Alfalfa hay	905.7	212.6	342.5	8.0	83	344.2	[84]
苜蓿青贮 Alfalfa silage	405.0	225.0	329.0	16.5	83	345.6	

综上所述,苜蓿青贮添加剂、菌株移植、混合青贮和新型青贮方式等均可不同程度地提升其质量,但不同原料的添加量、适宜生产的添加剂及更多的农业副产物与苜蓿混合青贮的效果仍需探究。

7 展望

苜蓿作为营养价值丰富的全价牧草,干草或青贮均为反刍动物的优质粗饲料,苜蓿干草制作对营养物质损失较大,苜蓿青贮的氮组分改变和微生物发酵产物会对动物瘤胃能氮平衡和产品质量造成一定影响,两者混合具有较好的饲喂效果,但其适宜的替换比例取决于两点,一为苜蓿干草和青贮本身的

质量,由于苜蓿青贮质量难以控制,替换饲喂前要保证其无变质,营养物质保存较好,否则会对动物生产性能和乳肉品质造成负面影响。二为与饲料中其他原料的组合效应,苜蓿青贮在中氮成分大多为水溶氮,瘤胃降解率高,过瘤胃蛋白不足,可根据原料氮组分分布适当加大瘤胃能量和过瘤胃蛋白供应,降低青贮饲料的氮排泄。目前需要解决的问题为控制苜蓿干草的制作损失和苜蓿青贮的质量,保证瘤胃能氮平衡及动物产品质量下与其他能量饲料最佳组合效应,青贮发酵的哪些产物会通过瘤胃转移到血液循环中,进而影响动物乳肉产品,以及制作苜蓿青贮时的添加剂和菌剂是否会在动物产品中残留等问题。

参考文献 References:

[1] ZENG F Q, QIU J Y, WEI J Y, YAO N, HUANG Y L. Comparison test on adaptability of six *Medicago sativa* (alfalfa) varieties in Guangxi. *Agricultural Biotechnology*, 2020, 9(4): 49-52.

[2] WANG L X, XIE Y H, YANG Z B, JIANG S Z, ZHANG C Y, ZHANG G G. Alfalfa polysaccharide prevents H₂O₂-induced oxidative damage in MEFs by activating MAPK/Nrf2 signaling pathways and suppressing NF-κB signaling pathways. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-11.

- [3] RAEESZADEH M, MORTAZAVIP P, ATASHIN-SADAFI R. The antioxidant, anti-inflammatory, pathological, and behavioural effects of *Medicago sativa* L. (alfalfa) extract on brain injury caused by nicotine in male rats. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, 2021(36): 1-9.
- [4] WANG C M, ZHANG C, YAN T H, CHANG S H, ZHU W H, WANAPAT M, HOU F J. Increasing roughage quality by using alfalfa hay as a substitute for concentrate mitigates CH₄ emissions and urinary N and ammonia excretion from dry ewes. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2020, 104(1): 22-31.
- [5] SINGER S D, WESELAKE R J, SURYA A. Molecular enhancement of alfalfa: Improving quality traits for superior livestock performance and reduced environmental impact. *Crop Science*, 2017, 58(1): 55-71.
- [6] 卢欣石. 2020我国饲草商品生产形势分析与2021年展望. *畜牧产业*, 2021(3): 31-36.
LU X S. Analysis of the forage commodity production situation in 2020 and prospects in 2021. *Animal Agriculture*, 2021(3): 31-36.
- [7] WANG W, XIN X. Improving China's alfalfa industry development: An economic analysis. *China Agricultural Economic Review*, 2021, 13(1): 123-140.
- [8] 高菲, 王铁梅, 卢欣石. 2021年我国商品饲草生产形势分析与2022年趋势展. *畜牧产业*, 2022, 408(3): 32-37.
GAO F, WANG T M, LU X S. Analysis of the production situation of commercial forage grass in 2021 and trend in 2022. *Animal Agriculture*, 2022, 408(3): 32-37.
- [9] HRISTOV A N, HUHTANEN P, RODE L M, ACHARYA S N, MCALLISTER T A. Comparison of the ruminal metabolism of nitrogen from ¹⁵N-labeled alfalfa preserved as hay or as silage. *Journal of Dairy Science*, 2001, 84(12): 2738-2750.
- [10] 蔺芳. 紫花苜蓿/禾本科牧草间作提高其生产潜力和营养品质机理及家畜对其利用效果研究. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文, 2019.
LIN F. Study on the mechanism of improvement of production potential and nutrient quality of alfalfa/gramineae grasses intercropping and the utilization effect of livestock. PhD Thesis. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.
- [11] CALBERRY J M, PLAIZIER J C, EINARSON M S, MCBRIDE B W. Effects of replacing chopped alfalfa hay with alfalfa silage in a total mixed ration on production and rumen conditions of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(11): 3611-3619.
- [12] WAYNE K C, MATTHEW S A, BURNEY A K. Storage characteristics and nutritive value of moist large-round bales of alfalfa or alfalfa-grass hay treated with a propionic acid based preservative. *Applied Animal Science*, 2020, 36(4): 455-470.
- [13] AIGAADI K A. Impact of raking and baling patterns on alfalfa hay dry matter and quality losses. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2018, 25(6): 1040-1048.
- [14] 田雨佳. 苜蓿干草与苜蓿青贮对奶牛瘤胃蛋白质利用的影响及作用机制的研究. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2014.
TIAN Y J. Study on mechanism of nitrogen utilization in rumen of dairy cows with alfalfa as hay or silage. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [15] MALGORZATA S S, ANNA S, ADAM C, MARTYNA K, DAWID K, MARIUSZ K, WIESLAW O. Structural and quantitative changes of saponins in fresh alfalfa compared to alfalfa silage. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2019, 99(5): 2243-2250.
- [16] KALSCHUR K F. Impact of long-term storage on alfalfa leaf and stem silage characteristics. *Agronomy*, 2021, 11(12): 2505-2516.
- [17] KE W, ZHANG H, LI S, XUE Y, WANG Y, DONG W, CAI Y, ZHANG G. Influence of condensed and hydrolysable tannins on the bacterial community, protein degradation, and fermentation quality of alfalfa silage. *Animals (Basel)*, 2022, 12(7): 831-842.
- [18] RADOVIC J, SOKOLOVIC D, MARKOVIC J. Alfalfa-most important perennial forage legume in animal husbandry. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 2009, 25(5): 465-475.
- [19] HRISTOV A N, BRODERICK G A. Synthesis of microbial protein in ruminally cannulated cows fed alfalfa silage, alfalfa hay, or corn silage. *Journal of Dairy Science*, 1996, 79(9): 1627-1637.
- [20] HRISTOV A N, SANDEV S G. Proteolysis and rumen degradability of protein in alfalfa preserved as silage, wilted silage or hay.

- Animal Feed Science & Technology, 1998, 72(1-2): 175-181.
- [21] PELTEKOVA V D, BRODERICK G A. In vitro ruminal protein degradation and microbial protein synthesis on nitrogen fractions extracted from alfalfa hay and silage. *Journal of Dairy Science*, 1996, 79(4): 612-619.
- [22] THOMAS J W, BROWN L D, EMERY R S, HUBER J T. Comparisons between alfalfa silage and hay. *Journal of Dairy Science*, 1969, 52(2): 195-204.
- [23] 范金星, 张涛, 徐平珠, 王德泽, 王新峰, 张伶俐. 裹包青贮苜蓿替代苜蓿干草对奶牛奶产量及乳成分的影响. *家畜生态学报*, 2019, 40(11): 79-82.
- FAN J X, ZHANG T, XU P Z, WANG D Z, WANG X F, ZHANG L L. Effect to wrapped silage alfalfa replacing alfalfa hay on milk yield and milk composition of cows. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2019, 40(11): 79-82.
- [24] BEAYCHEMIN K A, YANG W Z, RODE L M. Effects of particle size of alfalfa-based dairy cow diets on chewing activity, ruminal fermentation, and milk production. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(2): 630-643.
- [25] GISLON G, COLOMBINI S, BORREANI G, CROVETTO M G, SANDRUCCI A, GALASSI G, TABACCO E, RAPETTI L. Milk production, methane emissions, nitrogen, and energy balance of cows fed diets based on different forage systems. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(9): 8048-8061.
- [26] GRANT R J, FERRARETTO L F. Silage review, silage feeding management, silage characteristics and dairy cow feeding behavior. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5): 4111-4121.
- [27] VAGNONI D B, BRODERICK G A. Effects of supplementation of energy or ruminally undegraded protein to lactating cows fed alfalfa hay or silage. *Journal of Dairy Science*, 1997, 80 (8): 1703-1712.
- [28] HOLDEN L A, MULLER L D, VAEGA G A, HILLARD P J. Ruminal digestion and duodenal nutrient flows in dairy cows consuming grass as pasture, hay, or silage. *Journal of Dairy Science*, 1994, 77(10): 3034-3042.
- [29] MAULFAIR D D, HEINRICHS A J. Eating behavior, ruminal fermentation, and milk production in lactating dairy cows fed rations that varied in dry alfalfa hay and alfalfa silage content. *Livestock Science*, 2013, 151(2-3): 179-187.
- [30] OLIVEIRA A S, WEINBERG Z G, OGUNADE I M, CERVANTES A P, ARRIOLA K G, JIANG Y, KIM D, LI X J, GONCALVES M C, VYAS D, ADESOGAN A T. Meta-analysis of effects of inoculation with homofermentative and facultative heterofermentative lactic acid bacteria on silage fermentation, aerobic stability, and the performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(6): 4587-4603.
- [31] MERCHEN N R, SATTER L D. Digestion of nitrogen by lambs fed alfalfa conserved as baled hay or as low moisture silage. *Journal of Animal Science*, 1983, 56(4): 943-951.
- [32] 朱晓艳, 赵诚, 史莹华, 王成章, 姚国磊, 吕先召, 韩康康, 李栋栋. 苜蓿青贮料替代苜蓿青干草对奶牛生产性能及乳品质的影响. *草业学报*, 2016, 25(5): 156-164.
- ZHU X Y, ZHAO C, SHI Y H, WANG C Z, YAO G L, LYU X Z, HAN K K, LI D D. Effect of replacing alfalfa hay with alfalfa silage on production performance and milk quality in dairy cows. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(5): 156-164.
- [33] GETACHEW G, ROBINSON P H, DEPETERS E J, TAYLOR S J. Relationships between chemical composition, dry matter degradation and in vitro gas production of several ruminant feeds. *Animal Feed Science & Technology*, 2004, 111(1-4): 57-71.
- [34] BEAYCHEMIN K A, RODE L M, ELIASON M V. Chewing activities and milk production of dairy cows fed alfalfa as hay, silage, or dried cubes of hay or silage. *Journal of Dairy Science*, 1997, 80(2): 324-333.
- [35] LAFERENIERE C, BERTHIAUME R, GIESEN L, CAMPBELL C, PIVOTTO L, MANDELL I B. Effects of methods of forage finishing with alfalfa on cattle growth performance and beef carcass characteristics, eating quality, and nutrient composition. *Canadian Journal of Animal Science*, 2020, 101(1): 30-48.
- [36] SABRINA V D O, ANDREAS H, MATTHIAS S, BIRGIT F W, QENDRIM Z, MAYER H K, WILHELM K. Hay versus silage: Does hay feeding positively affect milk composition. *International Dairy Journal*, 2021, 118: 1-10.
- [37] XUE Z L, LIU N, WANG Y L, YANG H J, WEI Y Q, MORIEL P, PALMER E, ZHANG Y J. Combining orchardgrass and alfalfa: Effects of forage ratios on in vitro rumen degradation and fermentation characteristics of silage compared with hay. *Animals*, 2020,

- 10(1): 59-74.
- [38] 李菲菲. 不同茬次、刈割期对苜蓿干草/青贮CNCPS蛋白组分和品质的影响. 石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2019.
LI F F. Study on CNCPS protein composition and feeding value of hay and silage in different haze/probiotic period. Master Thesis. Shihezi: Shihezi University, 2019.
- [39] 王吉东, 周春元, 吕佳颖, 姚琨, 李胜利. 奶牛常用蛋白质饲料和粗饲料的瘤胃降解特性研究. *动物营养学报*, 2022, 34(2): 1000-1013.
WANG J D, ZHOU C Y, LYU J Y, YAO K, LI S L. Rumen degradation characteristics of common protein feeds and roughages of dairy cows. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(2): 1000-1013.
- [40] LUSCHER A, MUELLER-HARVER I, SOUSSANA J F, REES R M, PEYRAUD J L. Potential of legume-based grassland-livestock systems in Europe: A review. *Grass and Forage Science*, 2014, 69(2): 206-228.
- [41] 黄品, 雷景然, 纪守坤, 夏文欣, 栗金丽, 高立杰. 苜蓿青贮替代苜蓿干草对瘤胃体外发酵参数的影响. *饲料研究*, 2022, 45(18): 1-4.
HUANG P, LEI J R, JI S K, XIA W X, LI J L, GAO L J. Effect of alfalfa silage replacing alfalfa hay on rumen fermentation parameters in vitro. *Feed Research*, 2022, 45(18): 1-4.
- [42] CHEN P, LI Y, SHEN Y, CAO Y, LI Q, WANG M, LIU M, WANG Z, HUO Z, REN S, GAO Y, LI J. Effect of dietary rumen-degradable starch to rumen-degradable protein ratio on in vitro rumen fermentation characteristics and microbial protein synthesis. *Animals (Basel)*, 2022, 12(19): 2633.
- [43] PROVENZA F D, KRONBERG S L, GREGORINI P. Is grassfed meat and dairy better for human and environmental health. *Frontiers in Nutrition*, 2019, 1(6): 26-39.
- [44] CIFTCI M, ERCI I H, KILINC U. Effects of alfalfa (fresh, silage, hay) on the fatty acid and conjugated linoleic acid amounts in lamb muscles and fats. *Revue de Medecine Veterinaire*, 2010, 161(10): 432-437.
- [45] PORDOMINGO A J, GRIGIONI G, GARDUZA F, VOLPI LAGRECA G. Effect of feeding treatment during the backgrounding phase of beef production from pasture on: I. Animal performance, carcass and meat quality. *Meat Science*, 2011, 90(4): 939-946.
- [46] RICHARD A M, GERVAIS R, TREMBLAY G, BELANGER G, CHARBONNEAU E. Tall fescue as an alternative to timothy fed with or without alfalfa to dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(9): 8062-8073.
- [47] NABI A A, HAMIN A, MOSTAFA T A. Effect of replacing alfalfa hay with alfalfa silage in high performance dairy cattle diets. *Pizhūhishhā-yi 'ulum-i dāmī-i Īrān*, 2014, 5(4): 1-11.
- [48] MICHELE W, SANJA M S, MARIA F, RALF H. Variations in the milk lipidomes of two dairy cow herds fed hay- or silage-based diets over a full year. *Food Chemistry*, 2022, 10(390): 91-102.
- [49] CLAUDIA L, LAGUNA2 P, MANFRED W, BIRGIT R, JULIA K, ISABEL L, MATTHIAS S. Discrimination of haymilk and conventional milk via fatty acid profiles. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(2): 1391-1398.
- [50] PENCHEV I P, YORDANKA I, TATYANA I, RUMEN K. Fatty acid composition of buffalo and bovine milk as affected by roughage source-silage versus hay. *Emirates Journal of Food & Agriculture*, 2016, 28(4): 264-270.
- [51] KILCAWLEY K N, FAULKNER H, CLARKE H J, SULLIVAN M G O, KERRY J P. Factors Influencing the flavour of bovine milk and cheese from grass based versus non-grass based milk production systems. *Foods*, 2018, 7(3): 1-43.
- [52] PAVEL K. The effects of silage feeding on some sensory and health attributes of cow's milk: A review. *Food Chemistry*, 2011, 125 (2): 307-317.
- [53] HASELMANN A, WENTER M, FUERST W B, ZOLLITSCH W, ZENELI Q, KNAUS W. Comparing the effects of silage and hay from similar parent grass forages on organic dairy cows' feeding behavior, feed intake and performance. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 267(12): 1-43.
- [54] MANZOCCHI E, MARTIN B, BORD C, VERDIER M, BOUCHON M, CONSTANT I, GILLER K, KREUZER M, BERARD J, MUSCI M, COPPA M. Feeding cows with hay, silage, or fresh herbage on pasture or indoors affects sensory properties and chemical composition of milk and cheese. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(5): 5285-5302.

- [55] CALLAGHAN T F, HENNESSY D, MCAULIFFE S, KILCAWIEY N K, DONOVAN M O, DILLON P, ROSS P R, STANTON C. Effect of pasture versus indoor feeding systems on raw milk composition and quality over an entire lactation. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(12): 9424-9440.
- [56] MAGUY E, KATJA K, DANIEL S. Methane mitigating options with forages fed to ruminants. *Grass and Forage Science*. 2021, 76(2): 196-204.
- [57] FERNANDEZ C, GOMIS-TENA J, HERNANDEZ A, SAIZ J. An open-circuit indirect calorimetry head hood system for measuring methane emission and energy metabolism in small ruminants. *Animals (Basel)*, 2019, 21(6): 380.
- [58] MAZARE R, NEAGA B, TIMARIU R. Behavior of alfalfa (*Medicago sativa*) for hay under conditions in Romania. *Research Journal of Agricultural Science*, 2019, 51(4): 273-281.
- [59] 张勃, 柯文灿, 李福厚, 郭旭生. 干草防腐剂在不同规格苜蓿干草捆中的应用效果研究. *草地学报*, 2022, 30(6): 1569-1575.
ZHANG B, KE W C, LI F H, GUO X S. Effects of hay preservatives on different sizes of alfalfa hay bales. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6): 1569-1575.
- [60] 中国科学院. 理化所在牧草热泵干燥技术方面取得进展. https://www.cas.cn/syky/202212/t20221212_4857839.shtml?from=singlemessage.
Chinese Academy of Science. Technical Institute of Physics and Chemistry has made progress in heat pump drying technology of herbage. https://www.cas.cn/syky/202212/t20221212_4857839.shtml?from=singlemessage.
- [61] 艾琳, 王铁梅. 欧洲草业考察情况. *中国畜牧业*, 2018(19): 42-45.
AI L, WANG T M. Investigation on grass industry in Europe. *China Animal Industry*, 2018(19): 42-45.
- [62] KARGAR S, KANANI M. Reconstituted versus dry alfalfa hay in starter feed diets of Holstein dairy calves: Effects on growth performance, nutrient digestibility, and metabolic indications of rumen development. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(5): 4051-4060.
- [63] ALEXANDRA E, MARTIN J, TEREAS D, ANA P, JOAO M, SUANA P, LETICIA F, ELIALHO J, RUI J B, JOSE S. Effects of alfalfa particle size and starch content in diets on feeding behaviour, intake, rumen parameters, animal performance and meat quality of growing lambs. *Meat Science*, 2022, 19(161): 107964-108028.
- [64] MOLAEI M, KAZEMI B M, MIRZAEI M, MIRZAEI M, ESMAEILI H. The physical form of starter (finely ground versus pelleted) and alfalfa hay (chopped versus pelleted) in holstein dairy calves: Effects on growth performance, feeding behaviour, ruminal fermentation, and urinary purine derivatives. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 279(9): 115031-115049.
- [65] 靳超戈. 不同添加剂对玉米和苜蓿混合青贮效果的影响. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2021.
JIN C G. Effect of different additives on mixed silage of corn and alfalfa. Master Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [66] GUO X S, BAI J, LI F H, XU D M, ZHANG Y X, BU D P, ZHAO L S. Effects of malate, citrate, succinate and fumarate on fermentation, chemical composition, aerobic stability and digestibility of alfalfa silage. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 268(6): 114604-114614.
- [67] ZHAO S S, WANG Y P, YAN F Y, WANG Y, ZHANG H. Screening a *Lactobacillus plantarum* strain for good adaption in alfalfa ensiling and demonstrating its improvement of alfalfa silage quality. *Journal of Applied Microbiology*, 2020, 129(2): 233-242.
- [68] ZHANG X, GUO X, LI F, USMAN S, ZHANG Y X, DING Z T. Antioxidant, flavonoid, α -tocopherol, β -carotene, fatty acids, and fermentation profiles of alfalfa silage inoculated with novel *Lactiplantibacillus plantarum* and *Pediococcus acidilactici* strains with high-antioxidant activity. *Animal Feed Science & Technology*, 2022, 288(7): 301-312.
- [69] CAO C X, BAO W C, LI W C, ZHAO F Y, KWOK L Y, ZHANG W Y, ZHANG H P. Changes in physico-chemical characteristics and viable bacterial communities during fermentation of alfalfa silages inoculated with *Lactobacillus plantarum*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2021, 37(7): 1-14.
- [70] BAI J, FRANCO M, DING Z, HAO L, KE W, WANG W, XIE D, LI Z Q, ZHANG Y X, AI L, GUO X S. Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus subtilis* on fermentation, dynamics of bacterial community and their functional shifts of whole-plant

- corn silage. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2022, 13(1): 1-7.
- [71] BAI J, XU D M, XIE D M, WANG M LI Z Q, GUO X S. Effects of antibacterial peptide-producing *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus buchneri* on fermentation, aerobic stability, and microbial community of alfalfa silage. *Bioresource Technology*, 2020, 315(7): 123881-123914.
- [72] XIE Y X, BAO J Z, LI W Q, SUN Z Q, GAO R, WU Z, YU Z. Effects of applying lactic acid bacteria and molasses on the fermentation quality, protein fractions and in vitro digestibility of baled alfalfa silage. *Agronomy*, 2021, 11(1): 91-101.
- [73] LEI C, BAO X Y, GUO G, HUO W J, LI Q H, XU Q F, WANG C, LIU Q. Evaluation of gallnut tannin and *Lactobacillus plantarum* as natural modifiers for alfalfa silage: Ensiling characteristics, in vitro ruminal methane production, fermentation profile and microbiota. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 132(2): 907-918.
- [74] LI F H, ZHANG B B, ZHANG Y X, ZHANG X, USMAN S, DING Z T, HAO L Z, GUO X S. Probiotic effect of feruloyl esterase-producing *Lactobacillus plantarum* inoculated alfalfa silage on digestion, antioxidant, and immunity status of lactating dairy goats. *Animal Nutrition*, 2022, 22(11): 38-47.
- [75] CHEN L, LI J F, DONG Z H, SHAO T. Effects of lactic acid bacteria inoculants and fibrolytic enzymes on the fermentation quality, in vitro degradability, ruminal variables and microbial communities of high-moisture alfalfa silage. *Grassland Science*. 2019, 65(4): 216-225.
- [76] CHEN L Y, HUI Q, BAI S Q, YAN L J, YOU M H, GOU W L, GAO F Q. Effect of wet sea buckthorn pomace utilized as an additive on silage fermentation profile and bacterial community composition of alfalfa. *Bioresource Technology*, 2020, 10(314): 123773-123885.
- [77] DONG Z H, CHEN L, LI J F, YUAN X J, TAO S. Characterization of nitrogen transformation dynamics in alfalfa and red clover and their mixture silages. *Grassland Science*, 2019, 65(2): 109-115.
- [78] NI K K, WANG X K, LU Y, GUO L N, LI X M, YANG F Y. Exploring the silage quality of alfalfa ensiled with the residues of astragalus and hawthorn. *Bioresource Technology*, 2020, 2(297): 12249-12263.
- [79] MARCO M, FILIPPO F, DOMENICO C, VICTORIA A, ROBERTA G, FRANCESCO A, TURCHI B. Use of fresh scotta whey as an additive for alfalfa silage. *Agronomy*, 2020, 10(3): 365-379.
- [80] TAO X X, CHEN S F, ZHAO J, WANG S R, DONG Z H, LI J F, SUN F X, SHAO T. Effects of citric acid residue and lactic acid bacteria on fermentation quality and aerobic stability of alfalfa silage. *Italian Journal of Animal Science*, 2020, 19(1): 744-752.
- [81] XIE Y, WANG L, LI W, XU S, BAO J, DENG J, WU Z, YU Z. Fermentation quality, in vitro digestibility, and aerobic stability of total mixed ration silage in response to varying proportion alfalfa silage. *Animals (Basel)*, 2022 12(8): 1039-1052.
- [82] MUCK R E, NADEAU E M, MCALLISTER T, CONTRERAS-GOVEA F E, SANTOS M C, KUNG L. Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5): 3980-4000.
- [83] THARANGANI R M H, CHAO Y K, ZHAO L S, SHEN Y F, MA L, BU D P. Proposal and validation of integrated alfalfa silage quality index (ASQI) method for the quality assessment of alfalfa silage for lactating dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 2022, 289(7): 115339-115353.
- [84] CISMILEANU A E. Nutritive value of six romanian cultivars of alfalfa as hay and semi-silage for ruminants. *Animal Science & Biotechnologies*, 2017, 50(1): 6-10.

(责任编辑 苟燕妮)