

低蛋白日粮在反刍动物生产中的应用研究进展

贺江林,任丽萍,陈雪晴,张李文,许庆彪*

华中农业大学动物科学技术学院、动物医学院,武汉 430070

摘要 低蛋白日粮技术具有应对当前蛋白质饲料资源短缺、畜禽饲料利用率偏低及养殖废弃物环境污染等行业挑战的潜力。本文基于国内外相关研究文献,着重从生长性能、泌乳性能、血液生化指标及氮排放等四方面探讨低蛋白日粮在反刍动物生产中的应用效果。多项研究结果表明,低蛋白质日粮在保障反刍动物生长与产品品质的前提下,可有效降低饲料成本并显著减少氮排放,兼具经济与生态双重效益。低蛋白日粮技术是现代畜牧业中实现可持续发展和提质增效的重要技术,未来研究应聚焦于不同生理阶段反刍动物的精准氨基酸需要,构建更为完善的低蛋白日粮技术体系,驱动畜牧业绿色、健康与可持续发展,为低蛋白日粮在反刍动物生产中的应用提供科学的理论依据。

关键词 低蛋白日粮;反刍动物;氨基酸平衡;多层次调控

Application of low-protein diets in the production of ruminants

HE Jianglin, REN Liping, CHEN Xueqing, ZHANG Liwen, XU Qingbiao*

College of Animal Science and Technology, College of Veterinary Medicine, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The technology of low-protein diets has the potential to address challenges in industry including the current shortage of protein feed resources, low utilization efficiency of feed in livestock and poultry, and environmental pollution caused by animal waste. This article studied the effects of applying low-protein diets in ruminant production from four aspects, including the growth performance, lactation performance, blood biochemical indicators, and nitrogen emissions based on reviewing domestic and international relevant literature. Results of many studies showed that low-protein diets can effectively reduce feed cost and significantly reduce nitrogen emissions while ensuring ruminant growth and product quality, achieving both economic and ecological benefits. The technology of low-protein diets is important for achieving sustainable development and improving quality and efficiency in modern animal husbandry. Future research should focus on the precise amino acid requirements for ruminants at different physiological stages and establishing a more comprehensive technology system of low-protein diets to drive the green, healthy, and sustainable development of animal husbandry, and to provide a scientific and theoretical basis for the application of low-protein diets in ruminant production.

Keywords low-protein diets; ruminant; amino acid balance; multi-level regulation

收稿日期:2025-11-30

基金项目:“十四五”国家重点研发计划(2022YFD1300705);内蒙古自治区青年科技英才项目(NJYT22053;NJYT23095)

作者简介:贺江林,男,2003年生,硕士研究生。*通信作者:许庆彪,男,1987年生,博士,副研究员。

畜牧业是维系国计民生的基础性产业^[1],现阶段,我国畜牧业稳步发展,但也面临一系列严峻挑战。一方面,我国大豆进口依赖度超过 80%,国内使用的豆粕绝大部分来源于进口大豆,使饲料成本易受国际市场和贸易政策波动的影响,进而对国家粮食安全战略构成了长期挑战^[2]。另一方面,我国作为全球最大养殖业国家,大型养殖场产生的温室气体、恶臭、污水等环境负效应显著,使畜牧业的环保问题成为公众关注的焦点^[3]。受制于“以量取胜”的传统生产观念,不少养殖场为追求更高的日增重,会在日粮中使用过量的蛋白质类原料。这不仅会引发动物代谢负担加重、健康水平下降等负面效应,而且大量未被消化利用的氮也会加剧环境污染^[4]。低蛋白质日粮技术作为一种具有潜力的营养策略,在保障反刍动物生长与产品品质的前提下,可有效降低饲料成本并显著减少氮排放,兼具经济与生态双重效益,是现代畜牧业中实现可持续发展和高效生产的重要手段之一^[5]。目前,低蛋白质日粮技术在单胃动物中已得到广泛应用,但其在反刍动物中的报道尚不多见。本文将从反刍动物的生长性能、泌乳性能、血液生化指标及氮排放等四个方面展开综合探讨,系统评估低蛋白质日粮在反刍动物生产中的应用可行性,旨在为该技术在反刍动物生产中的应用提供理论依据。

1 低蛋白质日粮技术

低蛋白质日粮技术通常是指根据美国国家科学研究委员会 NRC(1988)推荐标准,将日粮粗蛋白质(CP)水平下调 2%~4%,同时通过添加工业合成氨基酸来弥补动物营养需求,并相应减少蛋白质原料用量的精准饲料配制技术^[6],其核心在于通过科学的配方调整,在不损害动物生产性能与健康的前提下,实现日粮 CP 水平的降低^[7]。

2 低蛋白质日粮在反刍动物中的独特性

蛋白质是氨基酸的主要来源^[8],普遍认为其营养本质就是氨基酸营养,且蛋白质的品质与其氨基酸组成的平衡程度直接相关^[9]。反刍动物的氨基酸营养平衡因其独特的瘤胃机制被分为多种层次,其中包含“日粮氨基酸营养平衡、小肠可吸收氨基酸营养平衡、肝脏门静脉排流组织氨基酸营养平衡及肝脏外静脉氨基酸营养平衡”^[10]。鉴于反刍动物消

化系统的独特性,对氨基酸营养平衡的评估需分层次进行,低蛋白质日粮技术也需要相应地分层次调控氨基酸平衡。

首先就饲料氨基酸营养平衡而言,其核心在于优化蛋白质的组成与结构以维持瘤胃稳态。在日粮调配中,不仅需依据动物生产水平与目的确定日粮的蛋白质总水平,还必须充分考虑不同蛋白质组分之间的协调,即瘤胃降解蛋白(RDP)、可溶性蛋白(SP)和瘤胃非降解蛋白(RUP)之间的合理比例与平衡,最终应参照 NRC(2001)为特定动物给出的各组分蛋白平衡比例完成科学调配^[11-12]。其次,在肠道层次,营养调控的目标在于塑造理想的氨基酸吸收模式。由于反刍动物小肠氨基酸源自瘤胃微生物蛋白(BCP)、饲料过瘤胃蛋白及少量内源性氨基酸^[10],故小肠可吸收氨基酸营养平衡与饲料氨基酸营养平衡存在差异,而如何达成小肠理想氨基酸营养平衡模式,关键在于预测与调控进入小肠的各种氨基酸的流量与组成模式^[12-13]。实际生产中则可通过调控过瘤胃氨基酸以调控 BCP,亦可通过改变饲料原料以调整 RUP。最后,在组织利用层次,面临着最为复杂的代谢分配问题。经胃肠道吸收的氨基酸首先通过门静脉转运至肝脏进行处理,随后由肝静脉进入体循环,最终由肺携氧后输至外周组织以供利用^[10]。因此,组织氨基酸营养平衡受肝脏的利用与氧化影响,进而与小肠氨基酸营养平衡存在差异,且不同组织对氨基酸的需求存在差异,在优先满足特定组织的代谢需求时,也会相应减少对其他组织的资源供应,二者间存在制约关系^[14]。

反刍动物独特的消化系统决定了其低蛋白质日粮技术绝非简单的降低蛋白水平,而是一项需要贯穿多个层次,并对氨基酸流动进行高精度预测与动态调控的系统工程。在实际生产中,低蛋白质日粮的应用应始终从瘤胃发酵、肠道消化与组织利用三方面综合考虑。

3 低蛋白质日粮在反刍动物生产中的应用

3.1 低蛋白质日粮对反刍动物生长性能的影响

精准调控日粮蛋白水平是优化反刍动物生长发育及生产效益的重要手段,而简单地降低蛋白水平效果不一,甚至会抑制动物生长。祁敏丽^[15]发现降低日粮蛋白质水平会显著降低 0~2 月龄羔羊的体重和日增重。而 Zhu 等^[16]的研究发现,采用

13.4%的粗蛋白质日粮(低于NRC推荐值)可显著改善羔羊的氮利用,且不影响生产性能。关于降低日粮蛋白水平的影响,研究结论不尽相同,Chen等^[17]对这一矛盾作出解答:对于富含必需氨基酸的日粮,适当降低蛋白质水平,能够显著促进宿主的免疫功能,优化肠道微生态平衡,改善肠道健康状况,并提升氮素利用效率。

日粮蛋白水平的调整关系到对不同生理状态下不同反刍动物氨基酸需要的精准预测。周鹏宇等^[18]的试验结果表明,相较于低蛋白质组(15.09% CP)与高蛋白组(18.98% CP),蛋白质水平为17.00%的日粮有助于促进牦牛的能量代谢,实现更佳的生长效益;Wang等^[19]给藏羊饲喂不同蛋白质水平的日粮(10.1%, 12.1%, 14.1%),结果表明,饲喂12.1%和14.1%蛋白水平日粮的藏羊获得了较好的生产性能。因此,在实际生产过程中需要精准预测不同环境、不同生理状态下反刍动物的蛋白质需求,将资源利用最大化。此外,在使用蛋白质水平较低的日粮时,可能导致机体必需氨基酸摄入不足,如蛋氨酸(Met)和赖氨酸(Lys)被认为是幼龄反刍动物的最高限制性氨基酸^[20],实际生产过程中可以运用过瘤胃氨基酸技术缓解部分日粮蛋白水平降低带来的影响^[21]。云强^[22]研究发现,在玉米—豆粕型断奶犊牛开食料中,蛋白水平降低4.4个百分点,同时添加过瘤胃赖氨酸(RPLys)和过瘤胃蛋氨酸(RPMet),可以取得与原开食料相似的增重效果。单一的日粮蛋白水平降低往往给反刍动物生长带来负面影响,而在适度降低日粮粗蛋白水平的基础上补充过瘤胃保护氨基酸,便能够有效改善反刍动物的生长性能^[23]。需要强调的是,日粮蛋白质水平是影响过瘤胃氨基酸补充效果的关键因素,适量补充过瘤胃氨基酸则是提高反刍动物生产性能的有效手段^[24],若日粮已能满足反刍动物小肠对氨基酸的需求,补充过量的过瘤胃氨基酸将无法被有效利用。

总而言之,将“降低日粮蛋白水平”与“精准补充过瘤胃限制性氨基酸”相结合,满足不同生产条件、不同生理状态下反刍动物对蛋白质和氨基酸的特定需要是实现资源最大化利用的关键,未来的研究应致力于开发更精准的氨基酸需要量预测模型,并优化过瘤胃氨基酸在不同日粮背景下的应用方案。

3.2 低蛋白日粮对反刍动物泌乳性能的影响

过瘤胃氨基酸在奶牛低蛋白日粮技术的应用中

引起了学者的广泛关注^[25]。有研究发现,通过RPLys和RPMet保持氨基酸平衡,那么饲喂15% CP日粮的奶牛产奶性能与饲喂16.4% CP日粮的奶牛维持在同一水平^[26]。赵凯^[27]研究发现低蛋白日粮通过添加RPMet、过瘤胃亮氨酸(RPLeu)和过瘤胃异亮氨酸(RPIle)会增加产乳量,且氨基酸之间存在加性效应,从而指出传统的“单一限制性氨基酸理论”可能不适用于解释泌乳反刍动物的乳蛋白合成调控。有研究^[28]表明,氨基酸供给对乳蛋白合成的影响不仅仅在于底物作用(即因限制性氨基酸供应不足直接制约蛋白质合成)。Berthiaume等^[29]向奶牛颈静脉灌注混合氨基酸,肝脏增加的氨基酸提取速度超过了灌注速度,但乳蛋白的产量仍然增加,说明氨基酸在体内被优先用于其他代谢途径(如肝脏提取),但乳蛋白合成仍能增加,说明其作用不全是直接作为的合成底物。氨基酸可作为信号因子影响激素的分泌从而调节乳蛋白合成。吕佳栋^[30]发现,日粮中补充过瘤胃氨基酸,可通过调控氨基酸转运载体和葡萄糖转运载体的表达水平,影响胰岛素信号通路,从而整体调节乳腺的生理功能。某些特定氨基酸也可能通过影响多个代谢途径来改善蛋白质合成与能氮平衡,Appuhamy等^[31]研究表明,在乳腺组织中异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、蛋氨酸(Met)和苏氨酸(Thr)会影响酪蛋白的合成,而且Ile和Leu对雷帕霉素(mTOR)磷酸化具有促进作用。

目前评价泌乳奶牛氨基酸需要量普遍采用代谢蛋白(MP)或小肠可消化蛋白为基础的氨基酸需要量体系(如NRC模型),其既将氨基酸视为一个整体,无法灵活调整单一氨基酸的供给,又假定固定的转化效率,无法反映生物学系统的动态变化。未来的发展方向应着眼于建立一个能整合氨基酸、能量与激素三者信号,并汇聚于mTOR等通路的动态营养需要量模型。

3.3 低蛋白日粮对反刍动物血液生化指标的影响

血液生化指标是评估动物对日粮营养物质利用与代谢状况的关键依据^[32]。通过检测血液中的总蛋白(TP)、白蛋白(Alb)、总氨基酸(TAA)和血尿素氮(BUN)等参数能够有效反映机体对蛋白质的消化吸收效率以及氨基酸的平衡状态^[33]。有研究表明,饲喂12%低蛋白水平日粮的羔羊,其BUN含量下降,而TP、Alb水平未受显著影响,说明蛋白质摄取与利用未受抑制,且不会影响羔羊的免疫力与

生产需求^[32]。

谷丙转氨酶与谷草转氨酶是评估肝脏功能与健康状态的关键指标,二者在氨基酸的降解代谢中发挥着重要作用^[34]。易琼等^[33]试验表明,将山羊日粮粗蛋白质水平降至 10% 并补饲 RPLys 后,其血液中的 AST、ALT 的水平与对照组(12% CP)相比无显著差异,说明低蛋白日粮不会对山羊的肝脏造成负面影响。

葡萄糖是动物体内重要的能源物质,在反刍动物中主要由肝脏通过糖异生途径合成,并受肝脏调节以维持稳态。刘进亿^[35]在研究日粮蛋白质水平对羔羊的影响时发现,血液葡萄糖浓度随日粮蛋白质水平增加呈先升后降趋势,其原因可能在于过高蛋白质水平下,氨基酸经糖异生转化为葡萄糖的效率受限。因此,保持适宜的低蛋白水平对机体葡萄糖稳态的维持具有重要影响。

总抗氧化能力(T-AOC)是评估机体整体抗氧化状态的指标,谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和超氧化物歧化酶(SOD)是其中两种清除自由基的关键酶,与之相对,丙二醛(MDA)则是脂质过氧化的终产物,其水平升高标志着氧化损伤加剧。李峰^[36]报道,饲喂蛋白质水平分别为 15.2%、16.9%、18.7% 的日粮,对萨能奶山羊血清中 SOD、GSH-Px 及 MDA 含量均未产生显著影响;但马丽娜等^[37]在犊牛试验中发现,22% 的高蛋白质组动物的 SOD、GSH-Px 与 T-AOC 均显著优于其他水平组。这两者的差异可能与物种特性有关,犊牛在生长期对蛋白质需求更高,适宜的高蛋白摄入有利于支持其抗氧化防御系统的正常功能。需要补充的是,有研究表明在日粮中添加 RPMet 和 RPLeu 能够增强机体的抗氧化能力。Wang 等^[38]指出,在蛋白质水平为 15.05% 和 16.51% 的条件下,RPMet 和 RPLeu 的添加可提高牦牛的 T-AOC;在低蛋白日粮饲养的牦牛中,添加 RPMet 和 RPLeu 还可显著提升 GSH-Px 活性,但在高蛋白日粮条件下该效应不显著。究其原因,细胞可利用 RPML 中的 Lys 进行代谢重构,将还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸导向谷胱甘肽代谢以清除活性氧,进而提高机体的应激耐受性。因此,补充 RPML 有望作为增强牦牛抗氧化的有效策略,尤其适用于低蛋白日粮。

血液中免疫球蛋白含量反映机体体液免疫的功能状态,其中,IgG、IgA 和 IgM 是介导体液免疫的关键抗体。作为促炎细胞因子,白细胞介素-1(IL-1)

和肿瘤坏死因子- α (TNF- α)在对抗感染中发挥核心作用。研究表明,在低蛋白日粮中补充反刍动物限制性氨基酸或支链氨基酸可维持氨基酸平衡和提高氨基酸利用率,从而改善动物的整体健康、生理及代谢状态。Lu 等^[39]研究发现,在低蛋白日粮中添加限制性氨基酸色氨酸(Trp)和支链氨基酸亮氨酸(Leu)能够降低犊牛炎症因子 IL-1 和 TNF- α 的水平,同时提高免疫球蛋白 IgG、IgA、IgM 含量,揭示了低蛋白日粮中补充特定氨基酸有助于增强犊牛的免疫抗病能力,达到与高蛋白日粮相同的效果。

低蛋白日粮对反刍动物的血液代谢物、抗氧化功能及免疫状态均具有多方面的调控作用,适当降低日粮的蛋白质水平能够满足反刍动物的营养需求,但在实际应用中仍需结合物种差异进行综合评估,以此为基础优化日粮配方。

3.4 低蛋白日粮对反刍动物氮排放的影响

反刍动物日粮 CP 水平与氮排出量有直接关系。姚喜喜等^[32]研究发现,给小尾寒羊羔羊饲喂不同水平蛋白质的日粮,羔羊的氮摄入与氮排出量均随蛋白水平的增加而显著增高。赵鹏^[40]研究发现,日粮 CP 水平从 14.5% 降到 12.5% 可显著降低奶牛的粪尿氮排泄量。樊艳华^[41]在山羊上的研究同样得出,在保障动物微生物蛋白供给和维持氮代谢平衡的前提下,适度控制日粮氮水平可有效降低山羊养殖过程中的氮排放,同时提升机体对氮素的利用效率。此外,低蛋白日粮中添加过瘤胃氨基酸能够有效地降低氮或氨损失。Kamiya 等^[42]研究表明,在育肥荷斯坦奶牛日粮中适当降低 CP 水平并同步添加 RPLys 和 RPMet,可在确保生产力不受影响的前提下,实现总氮排泄量的显著降低。综上所述,合理调配日粮蛋白质水平并调控氨基酸平衡有利于提高反刍动物的氮利用效率,从而减少氮排放。

RUP 在反刍动物的氮利用上也具有重要意义。赵鹏^[40]研究发现,日粮 CP 的 RUP 比例由 35% 增加至 40%,能够增强氮的利用与代谢效率,进而降低奶牛体内的氮排泄量。Kim 等^[43]研究发现,与低 RUP/RDP 比例浓缩日粮相比,饲喂高 RUP/RDP 比例浓缩日粮可显著提高韩牛的体重增长,同时降低瘤胃氨氮及血浆尿素氮浓度,减少尿氮排泄量,表现出更高的氮沉积趋势。总而言之,适当提高日粮中 RUP 的比例,有助于提高氮的利用率和沉积率,减少尿氮排泄和瘤胃氨氮浓度,从而在不影响生产

性能的同时降低氮排放。

上述策略的成功实施在很大程度上受日粮能量与氮平衡状态的制约。桂瑞麒^[44]强调,基于能氮平衡原则饲喂低蛋白日粮,是提升滩羊营养物质表观消化率并显著减少氮排放的前提。反之,若在能量供应不足时补充氨基酸,会促使更多氨基酸参与到糖异生过程中,从而使反刍动物对氮的利用效率下降。Wilkinson 等^[45]研究指出,反刍动物的氮利用效率受瘤胃内可发酵能量与可降解蛋白质间平衡关系的调控。不少研究也表明在反刍动物日粮中添加复合碳水化合物可有效降低瘤胃氨态氮浓度,减少尿氮排泄量,提高氮的利用效率^[46-47]。鉴于反刍动物个体及种类的差异性,其日粮中能量与蛋白质的适宜配比尚需进一步探讨^[48]。

4 结语与展望

低蛋白日粮技术是一种以蛋白质代谢规律与氨基酸平衡理论为指导的精准营养策略,由于反刍动物独特的消化系统,本文从多层次氨基酸平衡的调控出发,论述了该技术具有显著的经济效益与环保效益。目前反刍动物尚未大规模普及低蛋白日粮,本文建议未来可以从以下几个方面进行推进:一是积极探索新的优质饲料蛋白源,如芝麻粕、亚麻籽粕等^[49-50],其氨基酸种类和组成与等蛋白豆粕相当,为豆粕的减量替代提供了现实基础。二是将低蛋白日粮技术与增喂非蛋白氮有机结合,该方案能提高育肥猪的生长性能和肉质^[51],可借鉴用于反刍动物的生产。三是科研机构与饲料企业加强协作,积极推动低蛋白日粮技术的研发与应用推广,针对不同环境与生理状况的反刍动物精准制定蛋白需求与能氮比标准,将代谢层面的氨基酸平衡理论应用于实践。这些挑战需要各方紧密合作,加快构建出适合我国反刍动物养殖实际情况的低蛋白日粮技术,推动畜牧业健康、可持续发展。

参 考 文 献

[1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于促进畜牧业高质量发展的意见[J]. 湖南畜牧兽医, 2020(6):44-46.
 [2] 浦华, 杨静, 王永伟, 等. 保障国家粮食安全的蛋白替代战略构想[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4):149-157.
 [3] 尹靖东. 畜牧业减少氮排放的营养策略与需要解决的问题[J]. 中国畜牧杂志, 2017, 53(2):1-3.
 [4] 李国栋. 低蛋白日粮补饲过瘤胃蛋氨酸、亮氨酸、异亮氨酸对后

备牛生长及消化性能的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
 [5] 桂红兵, 张建丽, 李隐侠, 等. 添加包被赖氨酸和蛋氨酸低蛋白日粮对西门塔尔牛生产性能及氮排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6):1586-1593.
 [6] 王超. 低蛋白日粮对浏阳黑山羊生长性能和瘤胃发酵功能影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
 [7] 杨潇青, 陈宁, 聂存喜, 等. 低蛋白日粮技术在反刍动物生产应用中的研究进展[J]. 饲料工业, 2024, 45(18):20-24.
 [8] EUGENIO F A, VAN MILGEN J, DUPERRAY J, et al. Feeding intact proteins, peptides, or free amino acids to monogastric farm animals[J]. *Amino acids*, 2022, 54(2):157-168.
 [9] CAO Y C, YAO J H, SUN X T, et al. Amino acids in the nutrition and production of sheep and goats[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2021, 1285:63-79.
 [10] 王洪荣. 反刍动物氨基酸营养平衡理论及其应用[J]. 动物营养学报, 2013, 25(4):669-676.
 [11] 高民, 王丽芳, 卢德勋, 等. 奶牛精饲料和日粮营养品质的整体评价技术及其应用[J]. 中国畜牧杂志, 2013, 49(4):41-44.
 [12] GILBREATH K R, BAZER F W, SATTERFIELD M C, et al. Amino acid nutrition and reproductive performance in ruminants[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2021, 1285:43-61.
 [13] CAMARGO K D V, MESSANA J D, SILVA L G, et al. Intake, metabolism parameters, and performance of growing beef cattle on pasture supplemented with different rumen undegradable protein with different amino acid profile[J/OL]. *Animal feed science and technology*, 2022, 286: 115258[2025-11-30]. <https://doi.org/10.1016/j.ani-feedsci.2022.115258>.
 [14] 李录明, 张恩平, 李碧波. HMBi 对绒山羊绒毛品质及氨基酸转运载体基因表达的影响[J]. 家畜生态学报, 2019, 40(8):14-19, 47.
 [15] 祁敏丽. 日粮能量和蛋白质水平对羔羊生长性能和胃肠道发育的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
 [16] ZHU W, XU W, WEI C C, et al. Effects of decreasing dietary crude protein level on growth performance, digestion nutrient, metabolites, and nitrogen utilization in growing goat kids (*Capra hircus*) [J/OL]. *Animals*, 2020, 10(1): 151[2025-11-30]. <https://doi.org/10.3390/ani10010151>.
 [17] CHEN X Y, SONG P X, FAN P X, et al. Moderate dietary protein restriction optimized gut microbiota and mucosal barrier in growing pig model[J/OL]. *Front Cell Infect Microbiol*, 2018, 8:246[2025-11-30]. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00246>.
 [18] 周鹏宇, 胡博, 崔占鸿, 等. 暖季补饲不同蛋白质水平饲料对放牧牦牛生长性能及肠道微生物的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(6):3889-3902.
 [19] WANG X G, XU T W, ZHANG X L, et al. Effects of dietary protein levels on growth performance, carcass traits, serum metabolites, and meat composition of Tibetan sheep during the cold season on the Qinghai-Tibetan Plateau[J/OL]. *Animals*, 2020, 10(5): 801[2025-11-30]. <https://doi.org/10.3390/ani10050801>.
 [20] TORRENTERA N, CARRASCO R, SALINAS-CHAVIRA J, et al. Influence of methionine supplementation of growing diets enriched with

- lysine on feedlot performance and characteristics of digestion in Holstein steer calves[J]. *Asian-Australas J Anim Sci*, 2017, 30(1):42-50.
- [21] 李雪梅, 马小俊, 田晓雨, 等. 低蛋白日粮对羊消化代谢、瘤胃发酵参数及其微生物影响的研究进展[J]. *中国饲料*, 2024(15):1-6.
- [22] 云强. 蛋白水平及 Lys/Met 对断奶犊牛生长、消化代谢及瘤胃发育的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [23] CABEZAS A, DE LA FUENTE J, DÍAZ M T, et al. Effect of the inclusion of rumen-protected amino acids in the diet of growing beef cattle on animal performance and meat quality[J/OL]. *Frontiers in animal science*, 2023, 4: 1269775[2025-11-30]. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1269775>.
- [24] 郭伟, 李文娟, 呼秀智, 等. 反刍动物低蛋白日粮应用的研究进展[J]. *饲料工业*, 2020, 41(1):47-51.
- [25] 张鑫玥, 李胜利, 魏勇, 等. 低蛋白日粮对奶牛泌乳性能和养分利用的影响研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2024, 60(2):12-18.
- [26] SELEEM M S, WU Z H, XING C Q, et al. Effects of rumen-encapsulated methionine and lysine supplementation and low dietary protein on nitrogen efficiency and lactation performance of dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2024, 107(4):2087-2098.
- [27] 赵凯. 低蛋白日粮添加过瘤胃 Met、Thr、Ile 和 Leu 对泌乳奶牛乳蛋白合成的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [28] 秦肖莉. 低蛋白日粮补瘤胃保护蛋氨酸, 亮氨酸, 异亮氨酸, 苏氨酸对泌乳奶牛氮利用和生产性能的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [29] BERTHIAUME R, THIVIERGE M C, PATTON R A, et al. Effect of ruminally protected methionine on splanchnic metabolism of amino acids in lactating dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2006, 89(5):1621-1634.
- [30] 吕佳栋. 低蛋白过瘤胃氨基酸补饲日粮对奶牛乳腺组织氨基酸和葡萄糖转运载体的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [31] APPUHAMY J A D R N, KNOEBEL N A, DEEPTHI NAYANANJALIE W A, et al. Isoleucine and leucine independently regulate mTOR signaling and protein synthesis in MAC-T cells and bovine mammary tissue slices[J]. *J Nutr*, 2012, 142(3):484-491.
- [32] 姚喜喜, 刘皓栋. 日粮蛋白水平对小尾寒羊羔羊生长性能、营养物质表观消化率、氮排放和血清生化指标的影响[J]. *草业科学*, 2022, 39(2):362-370.
- [33] 易琼, 韩娥, 马政发, 等. 低蛋白补饲过瘤胃赖氨酸对山羊生长性能与血液生化指标的影响[J]. *中国饲料*, 2021(7):82-86.
- [34] 占今舜, 刘远, 占咏平, 等. 饲料蛋白质水平对广丰山羊肉品质、血清酶活性、瘤胃发酵和肠道发育的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(3):1493-1502.
- [35] 刘进亿. 不同蛋白水平代乳粉对羔羊肉用性能及血清生化指标的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- [36] 李峰. 不同能量和蛋白水平对泌乳奶山羊生长性能、泌乳性能、血液生理及瘤胃内环境的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [37] 马丽娜, 李蕾蕾, 康晓冬, 等. 饲料蛋白质水平对哺乳期犊牛生长性能、血清生化、免疫和抗氧化指标以及血清代谢物的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(9):5776-5792.
- [38] WANG H B, FU J H, WU X, et al. Effects of dietary protein level and rumen-protected methionine and lysine on growth performance, rumen fermentation and serum indexes for yaks[J/OL]. *Animals*, 2024, 14(12):1751[2025-11-30]. <https://doi.org/10.3390/ani14121751>.
- [39] LU J Y, ZOU S Y, XU H J, et al. Effects of low-protein diet supplemented with tryptophan and leucine on growth performance, digestibility, blood metabolites of Holstein calves[J/OL]. *Animal feed science and technology*, 2025, 327: 116421[2025-11-30]. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116421>.
- [40] 赵鹏. 日粮蛋白及瘤胃非降解蛋白水平对产奶性能及氮排泄的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [41] 樊艳华. 日粮和瘤胃调控对绒山羊氮代谢、尿素氮循环及微生物蛋白合成的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [42] KAMIYA M, YAMADA T, HIGUCHI M. Effects of low-crude protein diets supplemented with rumen-protected lysine and methionine on fattening performance and nitrogen excretion of Holstein steers[J/OL]. *Animal science journal*, 2021, 92(1): e13562[2025-11-30]. <https://doi.org/10.1111/asj.13562>.
- [43] KIM S Y, BHARANIDHARAN R, IM S, et al. Effects of dietary rumen undegradable protein:rumen degradable protein ratio on nitrogen metabolism in Hanwoo steers[J]. *Anim Biosci*, 2025, 38(6):1182-1193.
- [44] 桂瑞麒. 能氮平衡的低蛋白日粮对滩羊生产性能、消化代谢及肉品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [45] WILKINSON J M, LEE M R F. Review: Use of human-edible animal feeds by ruminant livestock[J]. *Animal*, 2018, 12(8):1735-1743.
- [46] RECKTENWALD E B, ROSS D A, FESSENDEN S W, et al. Urea-N recycling in lactating dairy cows fed diets with 2 different levels of dietary crude protein and starch with or without monensin[J]. *J Dairy Sci*, 2014, 97(3):1611-1622.
- [47] ELLIS J L, DIJKSTRA J, BANNINK A, et al. The effect of high-sugar grass on predicted nitrogen excretion and milk yield simulated using a dynamic model[J]. *J Dairy Sci*, 2011, 94(6):3105-3118.
- [48] 易思宇, 张洁, 林波, 等. 反刍动物瘤胃氮代谢及其与瘤胃微生物相关性的研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2021, 57(4):11-16.
- [49] TADAYON Z, ROUZBEHAN Y, ABARGHUEI M J, et al. The effects of feeding increasing levels of camelina meal as a protein supplement on the performance of Holstein dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2025, 108(9):9579-9594.
- [50] 和俊龙, 潘朝阳, 张宏福, 等. 芝麻粕型低蛋白质饲料对育肥猪生长性能、养分表观消化率及血清生化和抗氧化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(10):6256-6269.
- [51] LI P L, WU F, WANG Y M, et al. Combination of non-protein nitrogen and N-carbamylglutamate supplementation improves growth performance, nutrient digestibility and carcass characteristics in finishing pigs fed low protein diets[J/OL]. *Animal feed science and technology*, 2021, 273: 114753[2025-11-30]. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114753>.

【责任编辑: 赵琳琳】