



过瘤胃蛋氨酸在反刍动物生产中应用研究进展

崔俊伟^{1,2}, 张炯奇¹, 赵玉龙¹, 徐晓锋², 侯宇³, 屠焰¹, 刁其玉¹, 毕研亮^{1*}

(1. 中国农业科学院饲料研究所 农业农村部饲料生物技术重点实验室 奶牛营养学北京市重点实验室, 北京 100081;

2. 宁夏大学动物科技学院, 银川 750021; 3. 浙江新和成股份有限公司, 绍兴 312500)

摘要: 蛋氨酸(Met)作为反刍动物的必需氨基酸, 对生产性能、繁殖效率、免疫功能和瘤胃环境调控具有重要作用。但日粮Met易被瘤胃微生物降解, 导致其小肠吸收不足, 因此将蛋氨酸通过包被技术或化学修饰形成过瘤胃蛋氨酸(RPM)可降低瘤胃降解率, 有效提高小肠利用率。补充RPM可提升反刍动物生产性能、优化瘤胃微生物区系、改善氮平衡、改善繁殖性能、调节免疫基因表达及增强抗氧化能力。本文系统综述了RPM的技术原理及其在反刍动物生产中的应用进展, 为RPM的实际应用提供理论依据。

关键词: 反刍动物; 生产性能; 免疫调控; 过瘤胃蛋氨酸

中图分类号: S816.7

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)03-1227-12

Advances in the Application of Rumen-Protected Methionine in Ruminant Production

CUI Junwei^{1,2}, ZHANG Jiongqi¹, ZHAO Yulong¹, XU Xiaofeng², HOU Yu³, TU Yan¹,

DIAO Qiyu¹, BI Yanliang^{1*}

(1. *Beijing Key Laboratory of Dairy Cattle Nutrition, Key Laboratory of Feed Biotechnology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Feed Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *College of Animal Science and Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*; 3. *Zhejiang NHU Co., Ltd., Shaoxing 312500, China*)

Abstract: Methionine (Met), as an essential amino acid for ruminants, plays a critical role in production performance, reproductive efficiency, immune function, and regulation of the rumen environment. However, dietary Met is susceptible to degradation by rumen microbes, leading to insufficient absorption in the small intestine. To address this, rumen-protected methionine (RPM) is developed through coating technology or chemical modification, effectively reducing rumen degradation rates and enhancing its utilization in the small intestine. Supplementation with RPM improves ruminant production performance, optimizes rumen microbial flora, enhances nitrogen balance, boosts reproductive performance, regulates immune gene expression, and strengthens antioxidant capacity. This article systematically reviews the technological principles of RPM and its application progress in ruminant production, providing a theoretical foundation for the practical implementation of RPM.

Keywords: ruminants; production performance; immune regulation; rumen-protected methionine

* **Corresponding author:** BI Yanliang, E-mail: biyanliang@caas.cn

收稿日期: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(32222081); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024BBF01006)

作者简介: 崔俊伟, 硕士生, 主要从事反刍动物营养研究, E-mail: cjw57310222@163.com

* 通信作者: 毕研亮, 主要从事反刍动物营养与饲料科学研究, E-mail: biyanliang@caas.cn

蛋白质是重要的营养物质,动物的各项生理过程及生长发育均离不开蛋白质的参与。日粮中的蛋白水平对反刍动物的生长和生产起着决定性作用,过低的蛋白水平会影响动物生长和生产性能的发挥,但过高的蛋白水平会带来高成本及碳、氮排放的增加,因此生产中降低日粮蛋白水平,同时补充限制性氨基酸,成为降低成本、节能减排的一项有效措施^[1]。蛋氨酸是反刍动物重要的必需氨基酸,研究表明,在低蛋白日粮中补充RPM可以改善低蛋白日粮对奶牛生产性能的负面影响^[2]。RPM应用于不同生产阶段均可以对反刍动物带来良好的效果, Toledo等^[3]研究发现,给经产奶牛补充RPM经同期发情处理后可以改善胚胎发育并降低流产率。因此,本文综述近年来RPM在反刍动物生产中的应用研究进展,总结RPM对反刍动物生产性能、繁殖性能、免疫性能、瘤胃微生物和养分消化等方面的影响,为RPM在反刍动物中的应用提供参考。

1 蛋氨酸代谢及过瘤胃保护技术

1.1 蛋氨酸的代谢

蛋氨酸(methionine)也被称为甲硫氨酸,其分子式为 $C_5H_{11}O_2NS$,是必需氨基酸中唯一的含硫氨基酸。蛋氨酸是动物的必需氨基酸,在动物体内无法合成必须从饮食中获取。蛋氨酸不仅对机体合成蛋白质至关重要,同时其代谢产物对机体同样不可或缺^[4]。蛋氨酸代谢的主要场所是肝,转甲基和再甲基过程发生在肝和体细胞中,转硫基过程只发生在肝、肾等组织器官内。摄入的蛋氨酸首先经过蛋氨酸腺苷转移酶作用转化成S-腺苷蛋氨酸,后经过甲基转移酶的作用将本身的甲基转移出去后形成S-腺苷同型半胱氨酸,再进一步水解成腺苷和同型半胱氨酸(Hcy),产生的Hcy一部分可利用胆碱代谢或叶酸循环产生的甲基进行再甲基化过程,形成蛋氨酸,该过程被称为蛋氨酸循环过程^[5]。S-腺苷蛋氨酸为机体内各种反应的关键甲基供体,参与动物体内DNA、RNA、组蛋白、磷脂、胆碱、鞘磷脂、乙酰胆碱和其他神经递质的甲基化^[6]。另外一部分Hcy则经转硫途径在胱硫氨酸 β 合酶和胱硫氨酸 γ 裂解酶的帮助下转化为半胱氨酸,最后进一步形成谷胱甘肽、胱氨酸和牛磺酸等^[7]。蛋氨酸在机体内的代谢过程如图1所示。

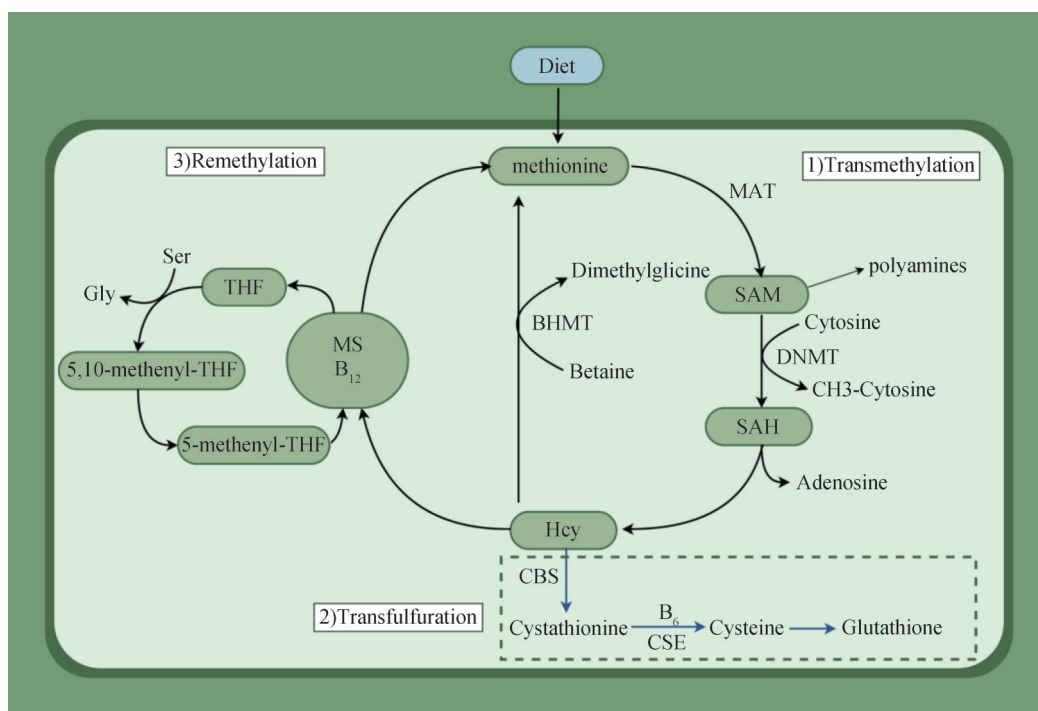
1.2 蛋氨酸过瘤胃保护技术

日粮蛋氨酸在反刍动物瘤胃内易被瘤胃微生物降解,从而导致反刍动物自身吸收利用的氨基酸不足,因此可以借助蛋氨酸过瘤胃技术保证足够的氨基酸到达小肠被吸收^[8]。过瘤胃蛋氨酸又称瘤胃保护蛋氨酸或瘤胃旁路蛋氨酸,根据处理方式不同大致分为以下两类:第一类为蛋氨酸类似物、衍生物、金属螯合物等,其原理是通过被瘤胃壁吸收,经转化成为可被反刍动物直接利用的蛋氨酸,如蛋氨酸羧基类似物^[9]、蛋氨酸-锌^[10]和蛋氨酸-铬^[11]等;第二类为包被氨基酸,其保护原理是选择对pH敏感的材料(如脂肪酸及其钙盐,纤维素及其衍生物或聚合物与共聚物)包裹蛋氨酸^[12],因瘤胃与真胃内pH存在差异,被特殊材料包裹的蛋氨酸在瘤胃内稳定,在真胃内被分解,使蛋氨酸游离出来被小肠吸收,以达到保护的目的,如乙基纤维素包被蛋氨酸^[13]和微胶囊技术包被蛋氨酸^[14]等。与直接在日粮中添加蛋氨酸相比,氨基酸经过瘤胃保护可以更好地平衡摄入的营养,改善反刍动物的生产性能^[15]。

2 过瘤胃蛋氨酸对反刍动物的影响

2.1 过瘤胃蛋氨酸对反刍动物生产性能的影响

RPM在以往的研究中已经被证实对反刍动物生产性能存在积极影响,对提升产奶量、改善乳成分以及提升日增重等均有不错的效果,如表1所示。蛋氨酸在奶牛日粮中通常被认定为限制性氨基酸,其供应不足会影响氨基酸的平衡,降低奶牛的泌乳性能^[16]。Junior等^[17]的研究表明,试验组产奶量、能量校正乳、乳蛋白率、乳蛋白产量、酪蛋白百分比以及乳脂产量均显著提升,且试验组奶牛的体况评分有升高的趋势。Melendez等^[18]研究发现,在春季放牧条件下,给产后奶牛补充 $30\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ RPM,经产奶牛在产后4~9周产奶量和乳脂产量均有提升,乳蛋白产量在1~6周有提升,初产奶牛的能量校正乳得到显著提升,此外RPM组奶牛在产后体重高于对照组。Melendez等^[19]进一步研究表明,在秋季放牧条件下,经产荷斯坦奶牛产后2~70 d按照 $20\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 的剂量补充RPM可以提升产奶量、乳蛋白产量和乳脂产量,且与过瘤胃赖氨酸(RPL)共同使用时还可以减少奶牛产后体重降低的趋势,该研究为放牧奶牛提升泌乳性能提供了有效策略。裴明财等^[20]的研究表明,在产前21 d至产后80 d持续给奶牛补充 $25\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 的RPM可以显著提升产奶量、乳中尿素氮和乳糖



1) Transmethylation: 转甲基反应; MAT: 蛋氨酸腺苷转移酶; SAM: S-腺苷蛋氨酸; polyamines: 多胺类; cytosine: 甲基受体; DNMT: 甲基转移; SAH: S-腺苷同型半胱氨酸; adenosine: 腺苷。2) Transsulfuration: 转硫基反应; CBS: 胱硫醚 β 合酶; Cystathionine: 胱硫醚; B₆: 维生素 B₆; CSE: 胱硫醚 γ 裂解酶; cysteine: 半胱氨酸; Glutathione: 谷胱甘肽。3) Remethylation: 再甲基反应; Betaine: 甜菜碱; Dimethylglycine: 二甲基甘氨酸; BHMT: 甜菜碱同型半胱氨酸甲基转移酶; MS: 蛋氨酸合成酶; B₁₂: 维生素 B₁₂; THF: 四氢叶酸; Ser: 丝氨酸; Gly: 甘氨酸; 5,10-methenyl-THF: 5,10-亚甲基四氢叶酸; 5-methenyl-THF: 5-亚甲基四氢叶酸

图1 蛋氨酸代谢过程图(由 Figdraw 绘制)

Fig. 1 Methionine metabolic process diagram (drawn by Figdraw)

率并显著降低乳中体细胞数。King 等^[14]研究发现,通过给泌乳中期日粮中可代谢蛋氨酸不足 $10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 的荷斯坦奶牛补充微胶囊包被的蛋氨酸,在不影响奶牛 DMI 的前提下,产奶量、乳蛋白产量和能量校正乳呈线性增加,当补充剂量超过 $19.3 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,其增加速率开始下降。刘德强^[21]通过给泌乳高峰期的经产奶牛按日粮的 0.127% DM 补充 RPM,发现试验组 60 d 的平均产奶量显著高于对照组,乳脂率显著提升。梁树林^[22]研究发现,泌乳中期荷斯坦奶牛补充 RPM $30 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 时能量校正乳和 3.5% 标准乳会升高。

Mohamed 等^[23]研究发现,日粮 CP 水平为 14% 和 16% 的条件下补充 $15 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 或 $25 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 后,在两种 CP 水平下补充 $25 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 均会提升奶牛 4% 标准乳、能量校正乳、乳脂和乳蛋白产量,CP 水平为 16% 条件下补充 $25 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 奶牛产奶量和乳脂产量显著高于其他处理组。Pereira 等^[24]在荷斯坦奶牛日粮(CP 水平为 17.2%)中补充 $35 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$

的 RPM 后,试验组奶牛乳蛋白率得到提升,乳蛋白产量较对照组平均提升了 $47 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,而对产奶量和乳脂率等没有显著影响。Gu 等^[25]通过多组学揭示了 RPM 对乳成分的影响,发现补充 RPM 组奶样共鉴定出 15 类 443 个化合物,其中 15 个代谢物发生显著变化,并发现了 48 个显著不同的菌属,功能营养素 α -酮戊二酸浓度显著得到提升,多组学综合分析显示,醋酸杆菌属、未分类毛螺菌科和酵母菌属的丰度的升高是提升乳脂的关键因素。徐蔚等^[26]通过 Meta 分析评价 RPM 对奶产量和乳成分的影响,筛选出了 12 项关于 RPM 的研究,发现在日粮中添加 RPM 可显著提高奶牛的产奶量、乳蛋白率和乳脂率和乳糖率。研究表明,并非在任何情况下补充 RPM 都会影响奶牛的泌乳性能,如 Tamura 等^[27]研究并未发现补充 RPM 显著改变了产奶量以及乳成分等指标,主要原因是日粮中的总代谢蛋氨酸并没有因为补充 RPM 而改变。简而言之,RPM 的补充使得进入血浆的循环 Met 增加,因此流向乳腺用于

乳蛋白合成的 Met 增加,且 Met 的补充会促进乳腺细胞摄取利用血浆中其他必需氨基酸用以乳蛋白的合成,这最终将导致乳蛋白率得到改善^[28]。此外,蛋氨酸还可通过激活哺乳动物 mTOR 信号通路,增强乳蛋白合成相关基因的表达,这也是 Met 的补充可以改善乳蛋白率的重要原因之一^[29-30]。而对于乳脂率的改善有两个主要的原因,一方面通过增加极低密度脂蛋白的合成加快甘油三酯向乳腺的输出,另一方面是通过甲基化过程促进乳腺中脂肪酸的合成^[31-32]。而对于产奶量的影响多数研究结果并不相同,推测主要原因可能是 DMI 的改变,或是乳成分组成的显著变化间接对产奶量造成了影响^[33]。

RPM 除了会对奶畜泌乳性能产生影响外,也对肉用反刍动物的日增重、料重比和肉品质产生有利影响,对反刍动物的产毛性能也有促进作用。罗志斌等^[34]研究发现,低蛋白日粮(CP 为 7.84%)同时补充 $10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 和 $15 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPL 在不影响养分消化率和屠宰性能的情况下有助于提升羊肉风味和营养价值。左子珍等^[35]的研究显示,不同剂量 RPM 的补充对牦牛半腱肌肉品质、挥发性风味物质及脂肪酸组成均会产生有益影响。曹广等^[36]在肉羊的玉米-棉籽粕型饲料中添加 RPM,试验组体重及平均日增重得到显著提升,同时胴体重、净肉重、净肉率和肉品质也显著提高。苟红晶和高宪儒^[37]研究发现,55 日龄的滩羊补充 $8 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 可以显著增加滩羊平均日增重,显著降低料重比。van Enolte 等^[38]研究发现,当绵羊饲喂以豆粕为主的日粮时,蛋氨酸是第一限制性氨基酸,主要原因是绵羊产毛所需的硫元素更多,而蛋氨酸可以提供部分硫元素用于毛发生长。高晔等^[39]在妊娠期绒山羊日粮中添加 RPM,发现在母羊妊娠初期时以基础日粮 2% 的剂量补充 RPM,与对照组相比,试验组妊娠期母羊的羊毛和羊绒伸直长度显著增长、羊绒细度显著增粗、绒毛重量比显著增大,显著促进了胎儿期羔羊的羊毛与羊绒的生长,且初生羔羊的绒毛重量比和初生重显著增大。

很多研究在确定 RPM 添加剂量时往往通过评估日粮中可代谢蛋氨酸的水平来决定,以此来满足动物的蛋氨酸需求量而达到高效生产的目的,而日粮中其他可代谢必需氨基酸水平通常容易被忽略,导致添加单一氨基酸后并不一定达到预期的效果,因此,根据氨基酸平衡理论考虑所有必需氨基酸对

于改善动物生产性能十分重要^[40]。若日粮中其他必需氨基酸水平不足,需结合 RPM 与其他过瘤胃氨基酸产品协同补充,将有利于提升动物的生产性能^[41]。RPM 的作用效果因产品类型而异,不同 RPM 产品的瘤胃降解率、小肠释放率及作用机制均不相同^[42]。动物自身的健康状态以及不同个体间存在着响应机制的差异,也是 RPM 在反刍动物上效果不同的主要原因^[23]。此外,降低日粮蛋白水平 1%~2% 的情况下补充 RPM 对反刍动物的生产性能没有负面影响,但同样面对着低蛋白日粮的成本核算问题,主要原因是国内 RPM 产品价格和效果不一,且实施需要一定的门槛^[43]。简单来说,补充 RPM 的有益作用主要体现在对反刍动物泌乳性能提升、肉品质改善及产毛性能提升等方面,但当结合低蛋白日粮使用时准确的成本节省计算还需进一步完善相应计算方法。

2.2 过瘤胃蛋氨酸对反刍动物养分消化及氮平衡的影响

促进反刍动物对日粮中营养物质的消化吸收是提升生产效率的有效途径之一,近年来人们也十分关注 RPM 的添加对日粮中各养分消化率的改善。刘德强^[21]研究发现,泌乳期奶牛补充 RPM,试验第 30 天、第 60 天和整个试验期,试验组 CP 和 NDF 的表观消化率显著提升。苟红晶和高宪儒^[37]研究发现,对滩羊补充 $8 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM,与对照组相比,CP 和 NDF 的消化率显著提升。在西门塔尔公牛日粮中每千克 DM 添加 0.66 g RPM 可以增加 DM、OM、NDF 和 ADF 的消化率^[44]。日粮中 CP 水平是影响各养分表观消化率的重要因素,Li 等^[45]研究发现,试验组奶牛(CP 水平为 16.4%)补充 $15 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 后,DM、CP、NDF、ADF 和灰分(Ash)的总表观消化率与对照组(CP 水平为 17.3%)相比无显著差异。综上所述,补充 RPM 可以改善反刍动物日粮部分营养物质的消化率。

反刍动物的氮排泄对生态环境会带来一定影响,研究人员在 RPM 促进体内氮平衡、减少氮排放方面开展了多项研究。Zhao 等^[46]研究发现,与对照组相比,补充 RPM 的试验组西门塔尔公牛总尿氮显著降低,并且极显著地降低了尿氮的排泄量。Kamiya 等^[47]研究发现,在低蛋白日粮中补充 RPM 会减少育肥荷斯坦牛的氮排泄同时不影响其生长性能。Zou 等^[48]研究显示,在荷斯坦公牛低蛋白日粮(CP 水平为 11%)中同时补充 RPM 和 RPL 可以

表 1 过瘤胃蛋氨酸对反刍动物生产性能影响相关研究

Table 1 Relative researches of the effect of rumen-protected methionine on production performance of ruminants

过瘤胃蛋氨酸类型 Type of RPM	试验动物及数量 Experimental animals and amounts	添加剂量 Additive dose	添加效果 Effect	文献来源 Source
特殊材料包被蛋氨酸 Specially coated methionine	76头泌乳中期的经产荷斯坦奶牛	23 g·d ⁻¹	泌乳性能得到提升,且体况评分有升高的趋势	Junior等 ^[17]
微胶囊包被蛋氨酸 Microencapsulated methionine	48头泌乳中期的经产荷斯坦奶牛	11.0、19.3、27.5 g·d ⁻¹	产奶量、乳蛋白产量和能量校正产奶量线性增加	King等 ^[14]
微胶囊包被蛋氨酸 Microencapsulated methionine	52头泌乳初期的荷斯坦奶牛(18头初产和33头经产)	30 g·d ⁻¹	产奶量、乳蛋白产量、乳脂产量和能量校正产奶量提升	Melendez ^[18]
微胶囊包被蛋氨酸 Microencapsulated methionine	52头泌乳初期的经产荷斯坦奶牛	20 g·d ⁻¹	产奶量、乳蛋白产量和乳脂产量提升	Melendez等 ^[19]
蛋氨酸羟基异丙酯 Methionine hydroxy analogue isopropyl ester	40头泌乳中期的经产荷斯坦奶牛	0.127% DM	产奶量和乳脂率提升	刘德强 ^[21]
蛋氨酸衍生物 N-acetyl-L-methionine	60头泌乳中期的经产荷斯坦奶牛	15、30、60 g·d ⁻¹	能量校正乳和3.5%标准乳提升	梁树林 ^[22]
蛋氨酸羟基异丙酯 Methionine hydroxy analogue isopropyl ester	40头产前21d的经产荷斯坦奶牛	25 g·d ⁻¹	产奶量、乳中尿素氮、乳糖率显著提升,乳中体细胞数显著降低	裴明财等 ^[20]
微胶囊包被蛋氨酸 Microencapsulated methionine	36头泌乳初期的初产荷斯坦奶牛	15、25 g·d ⁻¹	产奶量、4%标准乳、能量校正乳、乳脂和乳蛋白产量得到提升	Mohamed等 ^[23]
蛋氨酸羟基异丙酯 Methionine hydroxy analogue isopropyl ester	234头泌乳高峰期的荷斯坦奶牛(96头初产和138头经产)	35 g·d ⁻¹	乳蛋白率和乳脂率提升	Pereira等 ^[24]
蛋氨酸羟基异丙酯 Methionine hydroxy analogue isopropyl ester	24头康麦洼公牦牛	5、10、15 g·d ⁻¹	改善半腱肌肉品质、挥发性风味物质及脂肪酸组成	左子珍等 ^[35]
特殊材料包被蛋氨酸 Specially coated methionine	80只5月龄的湖羊公羊	2 g·kg ⁻¹ 基础日粮	提升平均日增重、胴体重、净肉重和净肉率显著提高,肉质改善	曹广等 ^[36]
特殊材料包被蛋氨酸 Specially coated methionine	60只55日龄的滩羊	4、8、12 g·d ⁻¹	提升平均日增重,降低料重比	苟红晶和高宪儒 ^[37]
蛋氨酸羟基异丙酯 Methionine hydroxy analogue isopropyl ester	27只妊娠初期的经产陕北白绒山羊	基础日粮的2%、4%	促进母羊与胎儿期羔羊的羊绒生长,对羔羊的出生重也有促进作用	高晔等 ^[39]

减少氮排泄并提升肝中氮的利用效率并对生产性能产生有益的影响。Wang 等^[49]研究发现,绒山羊每千克日粮中补充 2 g RPM 可以增加氮的表观消化率并降低粪氮水平,降低了血液尿素氮浓度,提升了氮的利用率。King 等^[14]研究发现,泌乳期奶牛补充 RPM 可显著降低粪氮排泄量,并提高日粮 CP 表观消化率,当 RPM 添加量为 $19.3 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,试验组氮平衡显著优于对照组。

补充 RPM 对养分消化率的影响可能和瘤胃微生物区系改变导致瘤胃发酵功能变化有关。以上研究说明,RPM 对 DM、ADF 和 NDF 的消化率存在积极的影响,对提升养分表观消化率存在一定的作用。补充 RPM 对氮平衡也存在有利的影响,可以促进氨基酸平衡,使动物机体充分利用日粮中各种氨基酸,减少粪氮排放。

2.3 过瘤胃蛋氨酸对反刍动物瘤胃发酵及瘤胃微生物区系的影响

包被型 RPM 在瘤胃中部分降解,会使瘤胃微生物群落和瘤胃发酵功能发生改变,而衍生物、类似物型的 RPM 则可以直接在瘤胃内消化吸收。Li 等^[50]在湖羊体外发酵试验中添加 2% 的 RPM(蛋氨酸羟基类似物异丙酯)发现,试验组与对照组相比,拟杆菌门、厚壁菌门和增殖菌门的相对丰度较高,而变形菌门的相对丰度较低,在属水平上普氏菌丰度较高,瘤胃杆菌的丰度较低,此外总挥发性脂肪酸(TVFA)、微生物蛋白(MCP)浓度均显著提升。

Zhao 等^[51]在牦牛日粮中补充 $50 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 后发现,在门水平上,变形菌门的相对丰度显著高于对照组,同时瘤胃中戊酸浓度显著低于对照组,说明补充 RPM 可以影响牦牛的瘤胃微生物种群,进而影响瘤胃发酵。Zhang 等^[52]给雄性牦牛补充 $5 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 后发现,试验组晶球菌门相对丰度显著提升,放线菌属和丁酸弧菌属的相对丰度随补充剂量的增加呈现线性下降,而普雷沃氏菌属的相对丰度则呈现线性增加。刘垚^[53]给牦牛补充不同剂量 RPM 发现,瘤胃 MCP 浓度随过瘤胃蛋氨酸添加量增加呈线性提高,添加量为 $15 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 组显著高于其他组,此外在属水平上,普雷沃氏菌属相对丰度随 RPM 添加量的增加呈线性上升。Zhang 等^[54]在牦牛上的研究也发现,补充 $10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $15 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ RPM 均会增加瘤胃 MCP 的浓度。

Zheng 等^[55]研究发现,每千克干物质中添加 0.6 mg 羟基蛋氨酸可改变普雷沃氏菌属、普雷

沃氏菌-UCG-003、瘤胃球菌 UCG-005 和瘤胃球菌属-1 的相对丰度,提高累积产气量、丙酸和 TVFA 产量。Guo 等^[56]研究发现,给泌乳中期经产穆拉水牛补充 $15 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 棕榈酸酯包被的 L-蛋氨酸,与对照组相比,乙酸、丙酸、戊酸和挥发性脂肪酸(VFA)的浓度均降低,瘤胃细菌中螺旋体门、丁酸弧菌属相对丰度升高,此结果说明 RPM 可以改变水牛瘤胃菌群并减少瘤胃挥发性脂肪酸的产生。在奶牛围产后期补充蛋氨酸羟基类似物异丙酯 $30 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,与对照组相比,显著提高了奶牛产前瘤胃 *Kiritimatiellaeota*、解琥珀酸弧菌科 UCG-001 和互营球菌属的相对丰度,显著提高了奶牛产后瘤胃纤维杆菌门、瘤胃球菌科 UCG-005、瘤胃球菌属 1、厌氧弧菌属的相对丰度,极显著降低了试验组奶牛胃瘤变形菌门的相对丰度,此外还显著降低了奶牛产后瘤胃氨态氮的浓度,以上研究说明补充蛋氨酸羟基类似物异丙酯有助于优化围产期奶牛瘤胃菌群结构,改善瘤胃发酵能力^[9]。孔凡林等^[57]通过给 84 日龄的荷斯坦母犊牛扣除日粮 30% 的蛋氨酸探究其对瘤胃发酵和微生物的影响,发现试验组蛋氨酸的减少导致挥发酸中乙酸的摩尔百分比和 MCP 浓度显著降低,对其他瘤胃发酵指标没有产生显著影响;对微生物区系进行分析后发现,在门水平上,试验组厚壁菌门的相对丰度显著降低,而拟杆菌门的相对丰度显著升高,在属水平上,斯莱克氏菌属、瘤胃球菌属、聚乙酸菌属、真杆菌属和粪球菌属的相对丰度均显著降低。

研究表明 RPM 主要是为了使蛋氨酸到达小肠后发挥作用,但在瘤胃内部分降解会对瘤胃微生物产生影响,有研究显示,未受保护的蛋氨酸可以增强瘤胃细菌的生长速度^[58],改变瘤胃微生物区系从而改变瘤胃发酵模式。关于对反刍动物瘤胃微生物的影响的大量研究中,蛋氨酸羟基类似物以及衍生物是重要的研究对象,主要原因可能是因为在瘤胃内约 50% 被瘤胃微生物利用导致^[59]。瘤胃微生物区系的改变对反刍动物的影响是多方面的,无论各类养分消化率变化还是生产性能的改变都可能与瘤胃中相关微生物丰度的改变密不可分。

2.4 过瘤胃蛋氨酸对反刍动物繁殖性能的影响

以往研究已经明确动物摄入营养与动物繁殖之间存在联系,营养缺乏会对动物繁殖性能以及胚胎发育造成不利影响。研究表明胚胎植入前母体蛋氨酸水平应为 $14 \sim 21 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,才可正常维持胚

胎定植及胎儿发育^[60]。Stephanie等^[61]研究发现,试验组奶牛补充RPM剂量为日粮DM的0.08%,与对照组相比,试验组胚胎具有更高的多不饱和脂质浓度,子宫内膜样品在泌乳第15天时单不饱和脂质的浓度较低,在泌乳第30天时饱和、不饱和(特别是二酰基甘油)和单不饱和(主要是神经酰胺)脂质的浓度更高。Acosta等^[60]研究发现,奶牛产前补充RPM可以提高胚胎着床前的脂质累积,为胚胎后续发育提供足够的能量基础。妊娠期阿瓦西母羊在产前和产后60 d日粮中补充不同剂量的RPM,增加了母体内孕酮浓度,RPM添加量为 $5\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 的试验组的产羔率更高,试验组羔羊的断奶体重和日增重低于对照组^[62]。裴明财等^[20]研究发现,在产前21 d给奶牛补充 $25\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ RPM,产后30 d血清中促卵泡素显著提升,产后公犊体重显著提高,奶牛总受胎率、第一情期受胎率、情期受胎率均有提高的趋势,配种指数有降低的趋势,胎衣不下、子宫炎、妊娠毒血症等产后疾病发生率有降低的趋势。Mohamed等^[23]研究发现,在CP水平为14%和16%的日粮中补充 $15\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ 或 $25\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ RPM均增加了奶牛血浆孕酮水平并降低了产犊间隔。Toledo等^[63]研究发现,在奶牛产前28 d至产后80 d补充RPM可以降低奶牛分娩时亚临床低钙血症发生率和奶牛淘汰率,缩短部分奶牛的妊娠时间。研究表明,补充RPM可以通过影响相关基因的表达提高机体免疫和抗氧化能力,这有利于奶牛在分娩后应对代谢挑战^[64]。Guadagnin等^[65]研究发现,在产前21 d到泌乳73 d对荷斯坦奶牛补充RPM,白细胞介素(IL)6、IL-8、IL-1 β 、前列腺素E合酶3、TSPO、超氧化物歧化酶和黏蛋白1等参与炎症过程的基因mRNA表达较低,表明饲喂RPM奶牛子宫环境的炎症较少,反映了抵抗疾病和子宫修复能力有所改善;而成纤维细胞生长因子7、甲硫氨酸腺苷转移酶1 α 、卵磷脂-胆固醇酰基转移酶和S-腺苷-l-同型半胱氨酸水解酶的mRNA表达较高,表明RPM还可以参与细胞营养代谢和细胞增殖过程,这对子宫复原和受孕准备至关重要。

补充RPM能够弥补反刍动物因蛋氨酸缺乏而导致的繁殖问题。具体而言,RPM的补充可以调控机体的脂质代谢和转甲基过程,增加母体妊娠期间机体脂肪酸的可用性,此外作为甲基供体可调控各类辅助因子和相关酶的合成与活性,通过影响机体激素分泌而影响动物的繁殖性能^[66]。以上研究表

明,补充RPM可以降低反刍动物生殖疾病、调控生殖激素分泌、改善子宫免疫水平和提升胚胎生存率,提升动物的繁殖性能。

2.5 过瘤胃蛋氨酸对反刍动物抗氧化及免疫性能的影响

蛋氨酸代谢过程中可生成S-腺苷甲硫氨酸,可用于DNA甲基化并支持磷脂酰胆碱和肉碱合成以促进脂肪酸代谢。奶牛围产期三酰甘油在肝中积聚,导致线粒体功能障碍、炎症和肝功能降低^[67]。通过增加蛋氨酸供应增强磷脂酰胆碱合成,有助于改善极低密度脂蛋白合成并减少肝中三酰甘油积累,从而提高免疫功能^[68]。

中性粒细胞(polymorphonuclear leukocyte, PMN)是病原体入侵时机体的第一反应者,在炎症和免疫反应中起重要作用,研究发现,围产后期给奶牛补充RPM可以改善奶牛产后病原体攻击时PMN免疫反应^[69]。Zhou等^[70]研究发现,围产期给荷斯坦奶牛补充RPM,与对照组相比,试验组奶牛PMN黏附和迁移相关基因细胞黏附分子1、选择素L、IL 1受体相关激酶1和Toll样受体4表达较低,PMN中氧化应激相关基因(*CBS*、*CTH*、*GPX1*、*GSS*、*SOD2*)的表达较低,血浆牛磺酸浓度较高,说明在围产期补充RPM会改变包括细胞黏附和迁移、炎症和抗氧化代谢途径在内的基因表达,提升动物机体的氧化还原能力。Vailati-Riboni等^[64]从荷斯坦奶牛血液中分离出PMN在3种不同赖氨酸和蛋氨酸比例(3.6:1、2.9:1和2.4:1)的条件下加入 $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 脂多糖刺激,发现在赖氨酸和蛋氨酸比例为2.4:1时会最大程度上改善PMN炎症和氧化状态,在受到脂多糖刺激下蛋氨酸有助于炎症的消退,并帮助奶牛降低长期炎症和慢性炎症带来的有害影响。Tsiplakou等^[71]研究发现,日粮补充 $6\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ RPM和 $5\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ RPL,母羊PMN中白细胞介素1 α 、白细胞介素10和血红素加氧酶-1基因的mRNA相对表达水平下降,而转录因子*JunD*基因的mRNA相对表达水平升高,说明在母羊的日粮中同时补充RPM和RPL可以下调参与促炎信号传导的基因表达以增强母羊的免疫力。

在围产期补充RPM也会对产后犊牛的免疫产生影响。Jacometo等^[72]研究发现,在产前21 d补充RPM,产后犊牛的*CTH*、*CBS*、*NOS2*、*NFE2L2*等基因丰度较高,*MPO*、*TNF*、*GSR*、*CASP8*和*ZBP1*的基因丰度则较低,表明补充RPM不仅可以改变

后代中PMN水平,也对与抗氧化和免疫相关的代谢途径具有调控作用。妊娠母牛补充RPM,犊牛出生后0、12、24、48 h和7 d时的血浆免疫球蛋白G浓度均显著升高^[73]。Lopes等^[74]研究发现,产前30 d给妊娠母牛补充钴源、叶酸和RPM,对犊牛出生时血浆炎症生物标志物和炎症机制相关的分子有影响。Gastón等^[75]研究发现,在产前90 d给妊娠母牛补充 $8\text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ RPM可以提高产后犊牛SOD2和NOS3基因表达。

此外,奶牛热应激是诱发机体出现健康问题的重要因素^[76]。Pate等^[77]研究发现,在热应激环境条件下补充RPM,乳腺细胞凋亡与增殖比率降低,说明热应激期间补充RPM对奶牛乳腺细胞具有保护作用。Danesh等^[10]研究发现,在热应激期间给高产奶牛补充0.131%日粮干物质基础的蛋氨酸-锌螯合物,试验组奶牛的触珠蛋白和白细胞介素 1β 浓度较低,试验组奶牛整体表现出更高的抗氧化状态和更低的丙二醛浓度,说明补充蛋氨酸-锌螯合物对奶牛在热应激条件下抗氧化能力和免疫状态有一定的改善。

综上所述,蛋氨酸代谢过程中的代谢产物可以影响机体内脂质代谢,降低肝的负担并改善机体的免疫能力。补充RPM可调控机体内免疫反应相关基因表达,增强机体免疫反应。同时对改善后代的免疫和代谢及缓解动物因应激带来的不利影响也具有一定作用。

3 小 结

随着畜牧业的发展,RPM在反刍动物上的应用日益广泛,探究其对反刍动物的影响有助于在实际生产中提供更多的理论支持。Met是蛋白质合成的底物之一,更是有效的甲基供体来源,后者在调控基因表达、参与机体代谢及维护机体健康方面至关重要。以往研究表明,RPM对提升反刍动物生产性能、繁殖性能、免疫功能、促进养分消化并减少氮排放、改善瘤胃微生物区系促进瘤胃发酵等均有一定作用。目前关注的仍是RPM在应用过程中补充水平应当根据实际生产需要,结合日粮中各类氨基酸和营养物质含量,满足动物的营养需求并实现精准饲养,使反刍动物发挥更高效的生产潜力。

参考文献 (References):

[1] SINCLAIR K D, GARNSWORTHY P C, MANN G

E, et al. Reducing dietary protein in dairy cow diets: Implications for nitrogen utilization, milk production, welfare and fertility [J]. *J Anim Sci*, 2014, 8 (2) : 262-274.

[2] LEE C, HRISTOV A N, HEYLER K S, et al. Effects of metabolizable protein supply and amino acid supplementation on nitrogen utilization, milk production, and ammonia emissions from manure in dairy cows [J]. *J Dairy Sci*, 2012, 95 (9) : 5253-5268.

[3] TOLEDO M Z, BAEZ G M, GARCIA-GUERRA A, et al. Effect of feeding rumen-protected methionine on productive and reproductive performance of dairy cows [J]. *PLoS One*, 2017, 12 (12) : e0189117.

[4] MAJUMDER A, SINGH M, BEHERA J, et al. Hydrogen sulfide alleviates hyperhomocysteinemia-mediated skeletal muscle atrophy via mitigation of oxidative and endoplasmic reticulum stress injury [J]. *Am J Physiol Cell Physiol*, 2018, 315 (5) : C609-C622.

[5] ZAREMBSKA E, LUSARCZYK K, WRZOSEK M. The implication of a polymorphism in the methylenetetrahydrofolate reductase gene in homocysteine metabolism and related civilisation diseases [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 25 (1) : 193.

[6] MENTCH S J, LOCASALE J W. One-carbon metabolism and epigenetics: understanding the specificity [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2016, 1363 (1) : 91-98.

[7] STIPANUK M H, UEKI I. Dealing with methionine/homocysteine sulfur: cysteine metabolism to taurine and inorganic sulfur [J]. *J Inherit Metab Dis*, 2011, 34 : 17-32.

[8] 祁茹, 卢娜, 石小平, 等. 包被蛋氨酸和蛋氨酸类似物在荷斯坦奶牛生产应用中的研究 [J]. *饲料研究*, 2021, 44 (15) : 1-5.

QI R, LU N, SHI X P, et al. Research of coated methionine and HMBi on production application of Holstein dairy cows [J]. *Feed Research*, 2021, 44 (15) : 1-5. (in Chinese)

[9] 马丽琴, 王玲, 温万, 等. 蛋氨酸羟基类似物异丙酯对围产期奶牛瘤胃发酵及微生物区系的影响 [J]. *动物营养学报*, 2022, 34 (7) : 4425-4437.

MA L Q, WANG L, WEN W, et al. Effects of 2-Hydroxy-4-Methionine Isopropyl on ruminal fermentation and microflora of peripartum dairy cows [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34 (7) : 4425-4437. (in Chinese)

- [10] DANESH MESGARAN M, KARGAR H, JANSSEN R, et al. Rumen-protected zinc-methionine dietary inclusion alters dairy cow performances, and oxidative and inflammatory status under long-term environmental heat stress[J]. *Front Vet Sci*, 2022, 9: 935939.
- [11] GULTEPE E E, UYARLAR C, BAYRAM İ. Supplementation of Cr methionine during dry period of dairy cows and its effect on some production and biochemical parameters during early lactation and on immunity of their offspring[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2018, 186: 143-153.
- [12] 李 芳, 游斌杰, 郑 萍, 等. 国内包被技术在畜牧业的应用研究进展[J]. *饲料研究*, 2019, 42(5): 100-105. LI F, YOU B J, ZHENG P, et al. Research progress on the application of domestic coating technology in animal husbandry[J]. *Feed Research*, 2019, 42(5): 100-105. (in Chinese)
- [13] THANH L P, WICHASIT N, LI Y, et al. Alterations in skeletal muscle abundance of protein turnover, stress, and antioxidant proteins during the periparturient period in dairy cows fed ethyl-cellulose rumen-protected methionine[J]. *J Dairy Sci*, 2023, 106(7): 5127-5145.
- [14] KING L, WICKRAMASINGHE J, DOOLEY B, et al. Effects of microencapsulated methionine on milk production and manure nitrogen excretions of lactating dairy cows[J]. *Animals*, 2021, 11(12): 3545.
- [15] MAZINANI M, NASERIAN A A, RUDE B J, et al. Effects of feeding rumen-protected amino acids on the performance of feedlot calves. [J]. *J Adv Vet Anim Res*, 2020, 7(2): 229-233.
- [16] NRC I. Nutrient requirements of dairy cattle[J]. *NRC*, 2001, 519.
- [17] JUNIOR V C, LOPES F, SCHWAB C G, et al. Effects of rumen-protected methionine supplementation on the performance of high production dairy cows in the tropics. [J]. *PLoS One*, 2021, 16(4): e0243953.
- [18] MELENDEZ P, MÖLLER J, AREVALO A, et al. The effect of rumen-protected lysine and methionine on milk yield, milk components, and body weight in grazing Holstein cows during spring calving season in the southern hemisphere[J]. *Livest Sci*, 2023: 272.
- [19] MELENDEZ P, MÖLLER J, AREVALO A, et al. An evaluation of the supplementation of rumen-protected Lysine and methionine on the lactation performance of fall parturition grazing Holstein cows in Southern Chile[J]. *Animals*, 2023, 13(19): 3118.
- [20] 裴明财, 曾涵芳, 林 红, 等. 蛋氨酸羟基类似物异丙酯(HMBi)对奶牛产奶性能、繁殖性能及血清生化指标的影响[J]. *中国兽医学报*, 2023, 43(2): 396-404. PEI M C, ZENG H F, LIN H, et al. Effect of methionine hydroxy analogue isopropyl ester (HMBi) supplementation on lactation, reproduction performance and serum parameters in Holstein cows [J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2023, 43(2): 396-404. (in Chinese)
- [21] 刘德强. 过瘤胃蛋氨酸对奶牛泌乳期生产性能、养分消化率、血清生化指标的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023. LIU D Q. Effects of supplemental rumen-protected methionine on production performance, nutrient digestibility and serum parameters of lactation cow [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023. (in Chinese)
- [22] 梁树林. 奶牛泌乳性能对过瘤胃蛋氨酸响应的个体差异及其成因探究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. LIANG S L. Inter-individual variability and causality in the lactation performance in response to rumen-protected methionine in lactating dairy cows [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [23] MOHAMED A A, HOSAM H T, MOHMMAD A, et al. The effects of rumen protected methionine supplementation on the performance of primiparous dairy cows using the Presynch-Ovsynch protocol[J]. *Anim Sci J*, 2023, 94(1): e13835.
- [24] PEREIRA M N, MORAIS JÚNIOR N N, CAPUTO OLIVEIRA R, et al. Methionine precursor effects on lactation performance of dairy cows fed raw or heated soybeans[J]. *J Dairy Sci*, 2021, 104(3): 2996-3007.
- [25] GU F, LIANG S, ZHU S, et al. Multi-omics revealed the effects of rumen-protected methionine on the nutrient profile of milk in dairy cows[J]. *Food Res Int*, 2021, 149: 110682.
- [26] 徐 蔚, 何 涛, 万轩辰, 等. 基于Meta分析评价过瘤胃蛋氨酸对奶牛产奶量及乳成分的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(5): 257-261. XU W, HE T, WAN X C, et al. To evaluate the effects of rumen-protected methionine on milk yield and milk composition of dairy cows based on meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(5): 257-261. (in Chinese)
- [27] TAMURA T, INOUE K, NISHIKI H, et al. Effects of rumen-protected methionine on milk production in

- early lactation dairy cattle fed with a diet containing 14.5% crude protein[J]. *Anim Sci J*, 2018, 90(1): 62-70.
- [28] TOLEDO M Z, STANGAFERRO M L, GENNARI R S, et al. Effects of feeding rumen-protected methionine pre- and postpartum in multiparous Holstein cows: Lactation performance and plasma amino acid concentrations[J]. *J Dairy Sci*, 2021, 104(7):7583-7603.
- [29] APPUHAMY J A D R, KNOEBEL N A, NAYANANJALIE W A D, 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.
- [30] LI P, FANG X, HAO G, et al. Methionine promotes milk protein synthesis via the PI3K-mTOR signaling pathway in human mammary epithelial cells[J]. *Metabolites*, 2023, 13(11):1149.
- [31] LEÃO G F M, SANTOS S K, ASKEL E J, et al. Feeding rumen-protected methionine during the peripartum period improved milk fat content and reduced the culling rate of Holstein cows in a commercial herd[J]. *J Dairy Sci*, 2024, 107(9): 6758-6770.
- [32] DALEY V L, ARMENTANO L E, HANIGAN M D. Models to predict milk fat concentration and yield of lactating dairy cows: A Meta-analysis[J]. *J Dairy Sci*, 2022, 105(10):8016-8035.
- [33] PAZ A, MICHELOTTI T C, SUAZO M, et al. Rumen-protected methionine supplementation improves lactation performance and alleviates inflammation during a subclinical mastitis challenge in lactating dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2024, 107(12): 10761-10775.
- [34] 罗志斌, 欧慧敏, 李建中, 等. 添加过瘤胃氨基酸低蛋白饲料对呼伦贝尔羊生长性能、养分表观消化率及肉品质的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2024, 55(6): 2498-2509.
- LUO Z B, OU H M, LI J Z, et al. Effects of low protein diet supplemented with rumen-protected amino acids on growth performance, nutrient apparent digestibility and meat quality of Hulun Buir Sheep[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2024, 55(6): 2498-2509. (in Chinese)
- [35] 左子珍, 王海波, 柴志欣, 等. 过瘤胃蛋氨酸对牦牛半腱肌肉品质、挥发性风味物质及脂肪酸组成的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2024, 55(3): 1102-1114.
- ZUO Z Z, WANG H B, CHAI Z X, et al. Effects of rumen-protected methionine on meat quality, volatile flavor compounds and fatty acid composition of yak semitendinosus[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2024, 55(3): 1102-1114. (in Chinese)
- [36] 曹广, 吕刚, 刘伟, 等. 玉米-棉籽粕型饲料添加过瘤胃赖氨酸和过瘤胃蛋氨酸对育肥湖羊生长性能、屠宰性能、器官指数和肉品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(6): 3812-3821.
- CAO G, LÜ G, LIU W, et al. Effects of dietary rumen-protected lysine and rumen-protected methionine in corn-cotton seed meal type diet on growth performance, slaughter performance, organ indices and meat quality of fattening Hu Sheep[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(6): 3812-3821. (in Chinese)
- [37] 苟红晶, 高宪儒. 日粮添加过瘤胃蛋氨酸对肉羊生长性能、养分消化率及血液生化指标的影响[J]. *饲料研究*, 2021, 44(7): 21-24.
- GOU H J, GAO X R. Effect of adding rumen-protected methionine in diet on growth performance, nutrient digestibility and blood biochemical indexes of mutton sheep[J]. *Feed Research*, 2021, 44(7): 21-24. (in Chinese)
- [38] VAN ENOLTE J, LOEST C A, FERREIRA A V, et al. Limiting amino acids for growing lambs fed a diet low in ruminally undegradable protein[J]. *Anim Sci J*, 2008, 86(10): 2627-2641.
- [39] 高晔, 闫海龙, 闫玉清, 等. 妊娠期绒山羊母羊饲料添加过瘤胃蛋氨酸对羔羊绒毛品质的影响[J]. *家畜生态学报*, 2019, 40(8): 37-41.
- GAO Y, YAN H L, YAN Y Q, et al. Effect of Rumen Protected Methionine on growth performance and fleece quality of pregnant and newborn Cashmere Goats[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2019, 40(8): 37-41. (in Chinese)
- [40] VAN DEN BOSSCHE T, GOOSSENS K, AMPE B, et al. Effect of supplementing rumen-protected methionine, lysine, and histidine to low-protein diets on the performance and nitrogen balance of dairy cows[J]. *J Dairy Sci*, 2023, 106(3): 1790-1802.
- [41] ZHAO K, LIU W, LIN X Y, et al. Effects of rumen-protected methionine and other essential amino acid supplementation on milk and milk component yields in lactating Holstein cows[J]. *J Dairy Sci*, 2019, 102(9): 7936-7947.
- [42] MOLANO R A, SAITO A, LUCHINI D N, et al. Effects of rumen-protected methionine or methionine

- analogs in starter on plasma metabolites, growth, and efficiency of Holstein calves from 14 to 91 d of age. [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103(11):10136-10151.
- [43] 欧阳潼, 李胜利. 低蛋白氨基酸平衡日粮在奶牛生产中的应用研究进展[J]. 中国饲料, 2023(22):160-164.
- OUYANG T, LI S L. Research progress of rumen-protected amino acids supplementation for low protein diet in dairy cows [J]. *China Feed*, 2023(22):160-164. (in Chinese)
- [44] LIU Y Q, WANG C, LIU C, et al. Effects of coated folic acid and coated methionine on growth performance, nutrient digestibility and rumen fermentation in Simmental bulls [J]. *Anim Feed Sci Tec*, 2023, 298:115596.
- [45] LI Y, WEI J, DOU M, et al. Effects of rumen-protected methionine supplementation on production performance, apparent digestibility, blood parameters, and ruminal fermentation of lactating Holstein dairy cows [J]. *Front Vet Sci*, 2022, 9:981757.
- [46] ZHAO Y, RAHMAN M S, ZHAO G, et al. Dietary supplementation of rumen-protected methionine decreases the nitrous oxide emissions of urine of beef cattle through decreasing urinary excretions of nitrogen and urea [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(4):1797-1805.
- [47] 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]. *Anim Sci J*, 2021, 106:1790-1802.
- [48] ZOU S, JI S, XU H, et al. Rumen-protected lysine and methionine supplementation reduced protein requirement of Holstein Bulls by altering nitrogen metabolism in liver [J]. *Animals*, 2023, 13(5):843.
- [49] WANG W, YE L, DOU X, et al. Effects of rumen-protected methionine supplementation on growth performance, nutrient digestion, nitrogen utilisation and plasma amino acid profiles of Liaoning Cashmere goats [J]. *Animals*, 2023, 13(19):2995.
- [50] LI S, ZENG H, WANG C, et al. Effect of methionine hydroxy analog on Hu Sheep digestibility, rumen fermentation, and rumen microbial community *in vitro* [J]. *Metabolites*, 2023, 13(2):169.
- [51] ZHAO Z W, MA Z Y, WANG H C, et al. Effects of rumen-protected methionine and lysine supplementation on milk yields and components, rumen fermentation, and the rumen microbiome in lactating yaks (*Bos grunniens*) [J]. *Anim Feed Sci Tec*, 2021, 277:114972.
- [52] ZHANG X R, LIU Y, ZUO Z Z, et al. Effect of isopropyl ester of hydroxy analogue of methionine on rumen microbiome, active enzymes, and protein metabolism pathways of Yak [J]. *Fermentation*, 2024, 10(2):94.
- [53] 刘 垚. 过瘤胃蛋氨酸对牦牛生长、养分消化及瘤胃微生物宏基因组学的影响[D]. 成都:西南民族大学, 2023.
- LIU Y. Effect of rumen-protected methionine on growth performance, nutrient digestion and rumen microorganisms metagenomics of Yak [D]. Chengdu: Southwest Minzu University, 2023. (in Chinese)
- [54] ZHANG X, ZUO Z, LIU Y, et al. Effect of methionine analogues on growth performance, serum biochemical parameters, serum free amino acids and rumen fermentation of Yaks [J]. *Animals*, 2022, 12(22):3175.
- [55] ZHENG Y, HE T, XIE T, et al. Hydroxy-selenomethionine supplementation promotes the *in vitro* rumen fermentation of dairy cows by altering the relative abundance of rumen microorganisms [J]. *J Appl Microbiol*, 2021, 132(4):2583-2593.
- [56] GUO Y, FAN Z, LI M, et al. Effects of sodium nitrate and coated methionine on lactation performance, rumen fermentation characteristics, amino acid metabolism, and microbial communities in lactating Buffaloes. [J]. *Microorganisms*, 2023, 11(3):675.
- [57] 孔凡林, 李 媛, 付 彤, 等. 蛋氨酸羟基异丙酯对母犊牛瘤胃发酵和微生物区系的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4):796-806.
- KONG F L, LI Y, FU T, et al. Effects of 2-Hydroxy-4-(Methylthio)-Butanoic acid on rumen fermentation and microbiota in Holstein female calves [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(4):796-806. (in Chinese)
- [58] SALSBURY R L, MARVIL D K, WOODMANSEE C W, et al. Utilization of methionine and methionine hydroxy analog by rumen microorganisms *in vitro* [J]. *J Dairy Sci*, 1971, 54(3):390-396.
- [59] OSORIO J S, JI P, DRACKLEY J K, et al. Smartamine M and MetaSmart supplementation during the periparturient period alter hepatic expression of gene networks in 1-carbon metabolism, inflammation, oxidative stress, and the growth hormone-insulin-like growth factor 1 axis pathways. [J]. *J Dairy Sci*, 2014, 97(12):7451-7464.

- [60] ACOSTA D, RIVELLI M I, SKENANDORE C, et al. Effects of rumen-protected methionine and choline supplementation on steroidogenic potential of the first postpartum dominant follicle and expression of immune mediators in Holstein cows[J]. *Theriogenology*, 2017,96:1-9.
- [61] STEPHANIE L S, ANNE R G, DIEGO A V, et al. Rumen-protected methionine supplementation alters lipid profile of preimplantation embryo and endometrial tissue of Holstein cows[J]. *Front Vet Sci*, 2024, 10: 1301986.
- [62] TITI H H, ALNIMER M A, ABEDAL-MAJED M A. Effect of supplemental rumen-protected methionine on reproduction and production of Awassi ewes [J]. *Ital J Anim Sci*, 2022, 21(1):624-633.
- [63] TOLEDO M Z, STANGAFERRO M L, CAPUTO OLIVEIRA R, et al. Effects of feeding rumen-protected methionine pre- and postpartum in multiparous Holstein cows: Health disorders and interactions with production and reproduction [J]. *J Dairy Sci*, 2023, 106(3):2137-2152.
- [64] VAILATI-RIBONI M, ZHOU Z, JACOMETO C B, et al. Supplementation with rumen-protected methionine or choline during the transition period influences whole-blood immune response in periparturient dairy cows [J]. *J Dairy Sci*, 2017, 100(5):3958-3968.
- [65] GUADAGNIN A R, VELASCO-ACOSTA D A, STELLA S L, et al. Methionine supply during the peripartum period and early lactation alter immunometabolic gene expression in cytological smear and endometrial tissue of Holstein cows [J]. *Theriogenology*, 2021, 173:102-111.
- [66] BROSNAN J T, BROSNAN M E, BERTOLO R F P, et al. Methionine: A metabolically unique amino acid [J]. *Livest Sci*, 2007, 112(1):2-7.
- [67] DU X, SHEN T, WANG H, et al. Adaptations of hepatic lipid metabolism and mitochondria in dairy cows with mild fatty liver[J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(10):9544-9558.
- [68] COLEMAN D N, LOPREIATO V, ALHARTHI A, et al. Amino acids and the regulation of oxidative stress and immune function in dairy cattle [J]. *Anim Sci J*, 2020, 98(Supplement_1):S175-S193.
- [69] ZHOU Z, BULGARI O, VAILATI-RIBONI M, et al. Rumen-protected methionine compared with rumen-protected choline improves immunometabolic status in dairy cows during the peripartal period [J]. *J Dairy Sci*, 2016, 99(11):8956-8969.
- [70] ZHOU Z, FERDOUS F, MONTAGNER P, et al. Methionine and choline supply during the peripartal period alter polymorphonuclear leukocyte immune response and immunometabolic gene expression in Holstein cows [J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(11):10374-10382.
- [71] TSIPLAKOU E, MAVROMMATIS A, SKLIROS D, et al. The impact of rumen-protected amino acids on the expression of key-genes involved in the innate immunity of dairy sheep [J]. *PLoS One*, 2020, 15(5): e0233192.
- [72] JACOMETO C B, ALHARTHI A S, ZHOU Z, et al. Maternal supply of methionine during late pregnancy is associated with changes in immune function and abundance of microRNA and mRNA in Holstein calf polymorphonuclear leukocytes [J]. *J Dairy Sci*, 2018, 101(9):8146-8158.
- [73] WANG H, ELSAADAWY S A, WU Z, et al. Maternal supply of ruminally-protected lysine and methionine during close-up period enhances immunity and growth rate of neonatal calves [J]. *Front Vet Sci*, 2021, 8:780731.
- [74] LOPES M G, ALHARTHI A S, LOPREIATO V, et al. Maternal supplementation with cobalt sources, folic acid, and rumen-protected methionine and its effects on molecular and functional correlates of the immune system in neonatal Holstein calves [J]. *J Dairy Sci*, 2021, 104(8):9340-9354.
- [75] GASTÓN F A, SOREN R, SONIA M. Fetal programming effect of rumen-protected methionine on primiparous Angus × Simmental offspring's performance and skeletal muscle gene expression [J]. *Anim Sci J*, 2024, 102:1-15.
- [76] GIANNONE C, BOVO M, CECCARELLI M, et al. Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle [J]. *Animals*, 2023, 13(22):3451.
- [77] PATE R T, LUCHINI D, CANT J P, et al. Immune and metabolic effects of rumen-protected methionine during a heat stress challenge in lactating Holstein cows [J]. *Anim Sci J*, 2021, 99(12):skab323.

(编辑 范子娟)