



罗淦,王宏瑶,刘昱男,周可才,张玲,刘东晖,马怡斐,吴良泉. 基于Meta分析评估饲料调控对泌乳牛生产性能及氮排泄的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(04):164-175.

LUO Gan, WANG Hongyao, LIU Yunan, ZHOU Kecai, ZHANG Ling, LIU Donghui, MA Yifei, WU Liangquan. The effect of feed optimization on the characteristics of production and nitrogen excretion in lactating cows[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(04): 164-175.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.04.13

基于Meta分析评估饲料调控对泌乳牛生产性能及氮排泄的影响

罗淦¹ 王宏瑶¹ 刘昱男¹ 周可才² 张玲³ 刘东晖¹ 马怡斐^{1*} 吴良泉¹

(1. 福建农林大学 资源与环境学院/国际镁营养研究所, 福建 350002;

2. 平和县畜牧技术服务站, 福建 363700;

3. 中国农业大学 资源与环境学院/国家农业绿色发展研究院/
植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193)

摘要 为提高奶产量与氮素利用效率,本研究采用荟萃分析(Meta-analysis)系统评估饲料营养调控对奶牛生产性能与氮素利用的影响,基于收集的58篇论文、242个观测数据对评估优化日粮结构、降低日粮粗蛋白(CP)、日粮添加过瘤胃氨基酸和饲料添加剂等饲料调控措施对标准乳(FPCM)、氮素利用效率(NUE)及氮排泄量的影响。结果表明:1)近40年来我国泌乳牛平均单产逐年增加,但整体生产效率仍低于发达国家。泌乳牛氮素利用效率偏低,总氮排泄量逐年增加。2)4种饲料调控策略均可显著提高泌乳牛NUE($P<0.05$),平均增幅为4.6%,氮排泄率显著降低2.1%($P<0.05$),但对干物质采食量(DMI)的影响不显著($P>0.05$)。添加优质牧草可提高FPCM 1.3%,同时增加氮排泄1.6%;降低日粮粗蛋白2%~3%在稳定FPCM的同时显著提高NUE 12.7%,减少氮排泄量4.2%,其中尿氮和粪氮分别减少24.1%和5.8%;日粮同时添加过瘤胃蛋氨酸和赖氨酸可提高奶产量2.0%,降低氮排泄8.1%,其中尿氮减少41.7%,粪氮减少13.0%;日粮额外添加微生物添加剂可同时提高5.2%的FPCM和12.8%的NUE。3)预测在2050年全国范围内实施饲料营养调控策略后,奶牛总产奶量将增加2 114.7万t,氮排泄量减少10.6万t。综上,科学调控饲料营养可同步提升奶牛泌乳性能与氮素利用效率,从源头降低氮排泄,为奶牛绿色生产体系的构建提供理论依据。

关键词 Meta分析; 饲料调控; 泌乳牛; 氮素利用效率; 氮排泄

中图分类号 S816

文章编号 1007-4333(2026)04-0164-12

文献标志码 A

The effect of feed optimization on the characteristics of production and nitrogen excretion in lactating cows

LUO Gan¹, WANG Hongyao¹, LIU Yunan¹, ZHOU Kecai², ZHANG Ling³, LIU Donghui¹,
MA Yifei^{1*}, WU Liangquan¹

(1. College of Resources and Environment/International Magnesium Nutrition Research Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian 350002, China;

2. Pinghe County Livestock Technology Service Station, Fujian 363700, China;

3. College of Resources and Environment/National Institute of Agricultural Green Development/Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To enhance milk production and nitrogen utilization efficiency, this study conducted a systematic assessment of the impact of feed nutrition regulation on dairy cow production performance and nitrogen utilization through meta-analysis. Based on 58 collected papers and 242 observation data, the study evaluated the effects of optimizing feed composition, reducing crude protein (CP) in the diet, adding rumen-protected amino acids

收稿日期: 2025-09-09; 接受日期: 2025-10-28

基金项目: 国家重点研发计划政府间专项(2016YFE0103100); 国际镁营养研究所开放课题(IMI2021-09)

第一作者: 罗淦(ORCID:0009-0005-1566-7718), 硕士研究生, E-mail: 18398874893@163.com

通讯作者: 马怡斐(ORCID:0009-0007-5952-9055), 讲师, 主要从事农牧系统养分管理与环境评价以及畜禽废弃物资源化利用研究, E-mail: mayifei@fafu.edu.cn

to the diet, and using feed additives on standard milk (FPCM), nitrogen utilization efficiency (NUE), and nitrogen excretion. The results showed that: 1) Over the past 40 years, milk yield per lactating cow in China has been increasing year by year, yet production efficiency remains lower than that in developed countries. NUE was low, and total nitrogen excretion increased annually. 2) The four feed optimization strategies significantly improved the NUE of lactating cows ($P < 0.05$), with an average increase of 4.6%. The nitrogen excretion rate was significantly reduced by 2.1% ($P < 0.05$), but there was no significant effect on the dry matter intake (DMI) ($P > 0.05$). The addition of high-quality forage increased FPCM by 1.3% and raised N excretion by 1.6%. Reducing dietary CP by 2% to 3% significantly boosted NUE by 12.7%, reduced N excretion by 4.2%, and stabilized FPCM, with urinary N and fecal N decreasing by 24.1% and 5.8%, respectively. Rumen-protected methionine and lysine increased milk yield by 2.0% and reduced N excretion by 8.1% (urinary N: -41.7%; fecal N: -13.0%). Microbial additives in feed increased FPCM by 5.2% and NUE by 12.8%. 3) It is predicted that after implementing feed nutrition regulation strategies nationwide in 2050, the total milk production of dairy cows will increase by 2.147 million tons and nitrogen excretion will decrease by 0.11 million tons. In summary, scientific regulation of feed nutrition can simultaneously improve milk performance and nitrogen use efficiency of dairy cows simultaneously, reduce nitrogen emission from the source, and provide technical and theoretical basis for the construction of green production system of lactating cows.

Keywords Meta-analysis; feed regulation; lactating cow; nitrogen use efficiency; nitrogen excretion

在人口增长和城镇化的驱动下,我国乳制品需求量持续增长,对奶牛养殖业的供给能力提出了更高要求。2024年,我国牛奶产量达到4 079万t,位居全球前列^[1]。在扩大生产规模的同时,养殖模式也从传统、分散的后院养殖向现代化、集约化转变。相对于传统养殖模式,集约化奶牛养殖提高了动物生产力和氮素利用效率(NUE)^[2],但奶牛生产仍存在养分利用效率低和氮排泄量高的问题^[3-4]。Bai等^[5]评估2010年我国畜牧业总氮排泄量达2 280万t,奶牛氮排泄量约占7.8%,且奶牛的NUE仅为16%。为追求高产,我国奶牛生产多采用高蛋白日粮配方,需大量进口优质牧草和豆粕等蛋白饲料,增加了氮素排泄,提高了氨挥发和氧化亚氮排放等环境排放的风险^[1]。提高奶牛生产性能可提升氮素利用效率和降低氮排泄量^[6],饲料调控是改善奶牛营养供给、提高生产性能与NUE的重要途径^[3]。适度降低日粮粗蛋白水平可源头控制氮排泄^[7-9]。降低日粮粗蛋白水平2%在保证奶产量的同时降低了1.5%的粪氮^[10]和13.1%的尿氮^[11]。除此之外,赖氨酸和蛋氨酸是奶牛生产的主要限制性氨基酸。日粮添加过瘤胃蛋氨酸和赖氨酸可提高奶牛产奶量18.6%,减少氮排泄11.0%^[12]。添加酵母菌剂、乳酸菌制剂等微生物添加剂可提高饲料消化率和NUE。在日粮中添加微生物添加剂可提高奶产量4.0%~5.0%^[13]。但Huhtanen等^[14]发现,奶牛日粮添加苜蓿干草或黑麦草青贮等优质牧草提高产奶量3.0%~5.0%,但同时增加氮排泄2.0%~

4.0%。尽管已有大量关于饲料调控的单点试验研究,但其结果受饲养条件、日粮类型等因素影响,缺乏系统评估日粮调控对奶牛生产和氮素利用的影响,亟需阐明不同饲料调控策略对奶牛生产性能、NUE与氮排泄的影响。本研究通过荟萃分析(Meta-analysis)和情景分析饲料调控策略对泌乳牛生产性能和氮素利用效率的影响。具体目标包括:1)明晰不同饲料调控措施对奶牛产奶性能、氮素利用效率及氮排泄量的影响;2)基于情景分析评估饲料调控在国家尺度上减少氮排泄与提升奶产量的潜力。

1 研究方法

1.1 奶牛饲料调控策略文献检索

基于泌乳牛、粪氮、尿氮、氮排泄、产奶量、NUE、Lactating cows、Fecal nitrogen、Urinary nitrogen、Nitrogen excretion、Milk yield和Nitrogen utilization efficiency等关键词,在中国知网(CNKI)和Web of Science(WOS)国内外数据库进行2005—2024年中国奶牛生产文献检索。本研究文献数据筛选标准包括:1)试验动物为中国饲养的泌乳奶牛;2)试验设计需包含基础日粮对照组与饲料调整处理组;3)试验需提供完整的日粮配方及其粗蛋白水平等营养组成信息;4)试验结果包括干物质采食量、产奶量、尿氮及粪氮排泄量。通过检索文献和筛选数据,共收集经同行评议的58篇论文,242个观测数据对(图1)。

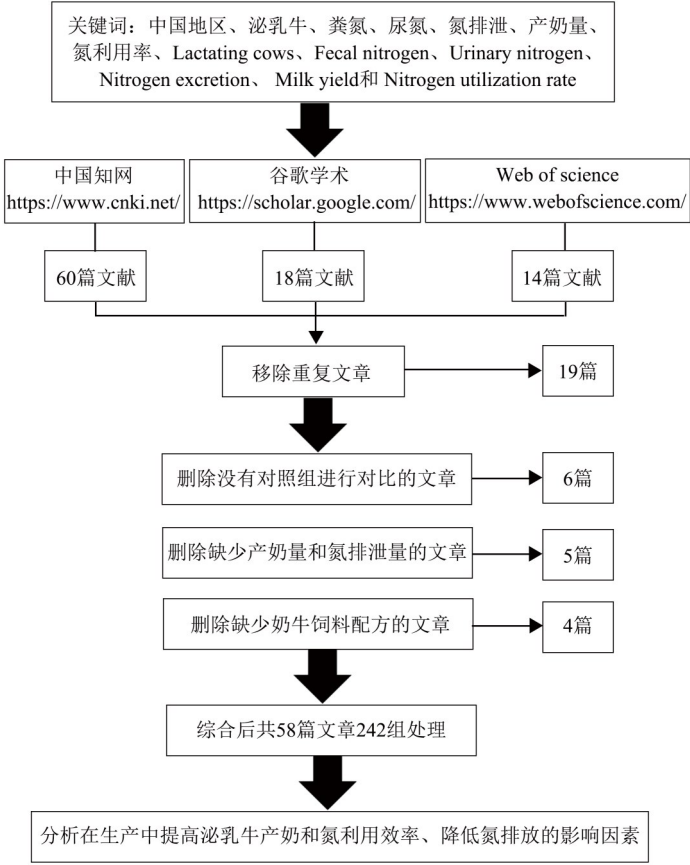


图1 文献筛选流程

Fig. 1 Literature screening process

1.2 饲料调控措施

饲料调控措施主要分为优化日粮结构、降低日粮粗蛋白(CP)、添加过瘤胃氨基酸(RPAA)和添加饲料添加剂四类干预策略。优化日粮结构策略包括增加优质牧草(苜蓿、羊草、黑麦草)、添加优质蛋白、额外添加谷物和额外添加秸秆。日粮添加剂包括微生物添加剂(枯草芽孢杆菌、酵母蛋白、酵母培养物)、植物添加剂(单宁酸、肉桂醛、牛至油、杨梅缩合单宁、马占相思缩合单宁、白雀-板栗单宁提取物、橡水解单宁、博落回提取物)、化学添加剂(尿素、N-氨甲酰谷氨酸、半胱胺)和其他添加剂(稀土、糖蜜、复合添加剂)。添加过瘤胃氨基酸包括单独添加过瘤胃赖氨酸(RPLys)、过瘤胃蛋氨酸(RPMet)和同时添加两者。

1.3 评价指标

通过标准牛奶(FPCM)消除不同牛奶样本因乳蛋白和乳脂肪波动对营养评估或经济价值比较的影响,计算公式如下所示。

$$FPCM = MY \times (0.1226 \times FP + 0.0776 \times PP + 0.2534)$$

式中:FPCM为标准牛奶,kg;MY为实际奶牛产量,kg;FP为牛奶乳脂率,%;PP为牛奶乳蛋白率,%。

基于输入-输出物质流计算奶牛生产氮投入、氮排泄和NUE。计算公式如下所示。

$$N_{\text{intake}} = \frac{DMI \times CP}{6.25}$$

式中: N_{intake} 为奶牛饲料氮摄入量,kg;DMI为泌乳牛的饲料干物质采食量,kg/head;CP为日粮粗蛋白水平,%;6.25为粗蛋白向氮的转化系数。

$$N_{\text{output}} = \frac{FPCM \times PP}{6.38}$$

式中: N_{output} 为牛奶氮输出量,kg;PP为牛奶乳蛋白率,%;6.38为牛奶中氮含量的转化系数。

$$NUE = \frac{N_{\text{output}}(\text{kg})}{N_{\text{intake}}(\text{kg})} \times 100$$

式中:NUE为氮素利用效率,%。

1.4 Meta分析数据统计

使用 Microsoft Excel 对原始数据进行整理归纳,同时将数据按四类饲料调控策略分组:优化日粮结构、日粮粗蛋白含量调整、日粮添加剂、日粮添加过瘤胃氨基酸。以响应比(Response ratio)作为效应量指标,采用 R 3.5.2 的 nlme 包构建混合效应模型,计算饲料调控措施标准化均差及 95% 置信区间,并通过统计量评估异质性。

通过比较饲料调控处理组和对照组的效应值大小,量化饲料调控策略对泌乳牛的产奶量、NUE 和氮排泄量等效应值的影响。响应比的自然对数(ln RR)反映了饲料调控策略导致产奶量和 NUE 的相对变化。ln RR 为负值时,表示处理组的效应值比对照组减少;ln RR 为正值时,表示处理组的效应值比对照组增加。ln RR 计算公式为:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right)$$

式中: X_t 为处理组的产奶量、干物质采食量(DMI)、NUE、氮排泄量的平均值; X_c 为对照组的平均值。由于部分研究数据缺乏标准差,需要对文献原始数据进行方差(v)赋值。

$$v = \frac{N_t N_c}{N_t + N_c}$$

式中: N_t 和 N_c 分别为处理的样本量和对照的样本量。

1.5 中国奶牛现状及情景设置

我国奶牛养殖数量来源于联合国粮农组织(FAO)数据库,牛奶产量来源于《中国统计年鉴》。不同奶牛养殖体系养殖数量来源于《中国畜牧兽医年鉴》。不同养殖体系饲料配方来源于文献搜索^[5]。由于统计数据中奶牛养殖包括泌乳牛和后备牛(犊牛、育成牛和青年牛),根据搜集不同奶牛养殖体系的泌乳牛占比,计算泌乳牛年产奶量。以上数据用于评估 1980—2023 年中国奶牛养殖变化。NUE 采用本研究 1.3 的定义与方法进行计算,氮排泄量计算公式如下所示:

$$N_{\text{excretion}} = N_{\text{intake}} - N_{\text{output}}$$

式中: N_{intake} 为奶牛饲料氮摄入量,kg; N_{output} 为牛奶氮输出量,kg。

为评估不同营养调控措施对未来奶牛生产性能与氮排泄的影响,本研究设置情景如下:

1)基线情景(BAU):设定 2050 年我国奶牛饲养方式、饲料供给结构及饲料调控措施与

2023 年相同,泌乳牛的饲料配方及 DMI 采用基础日粮的平均值。根据 FAO 最低每年人均牛奶推荐量(56 kg)、共享的社会经济途径^[15]和牛奶自给率^[16](75%)核算,2050 年中国牛奶生产量为 5 880 万 t。

2)增加优质牧草(S1):基于基线情景,泌乳牛日粮添加优质牧草。

3)降低饲料粗蛋白(S2):基于基线情景,降低日粮粗蛋白含量 2%~3%。

4)饲料添加过瘤胃氨基酸(S3):基于基线情景,泌乳牛日粮中同时添加过瘤胃赖氨酸和蛋氨酸。

5)饲料添加微生物添加剂(S4):基于基线情景,在日粮中添加微生物添加剂。

1.6 数据分析

响应比通过 R 软件计算后以平均效应值及其 95% 置信区间(CI)绘制森林图展示。若置信区间不与零值重叠,则认为处理间差异具有统计学显著性($P < 0.05$)。为检验分析结果的稳健性与潜在发表偏倚,本研究在 R 中构建漏斗图并采用 Egger 检验^[17]进行偏倚性检测。当漏斗图对称良好,且 Egger 检验结果不显著($P > 0.05$)时,视为不存在明显的发表偏倚。若存在偏倚趋势,则进一步进行修剪和填充分析,对漏斗图结果进行修正^[18],并比较修正前后效应量的变化。若修正前后效应值差异不显著,则结果仍被视为可靠。此外,为进一步评估 Meta 分析结果的稳健性,依据 Rosenberg 的方法计算安全失败数,当其超过观察研究数量的 5 倍时,结果可认为具有高度稳健性^[19-20]。所有图形结果(森林图、漏斗图)均在 R 平台中绘制完成,Meta 分析的全过程严格遵循统计检验规范,确保结论的科学性与可靠性。

2 结果与分析

2.1 中国奶牛生产现状

1980—2023 年我国奶牛养殖数量与氮利用效率呈现增加趋势(图 2)。奶牛存栏数由 1980 年的 67 万头增长至 2023 年的 1 620 万头,特别是在 1990 年后增长幅度更大,在 2000 年后维持高位。每头泌乳牛平均产奶量由 1980 年的 1.8 t 增长至 2023 年的 5.2 t。NUE 由 1980 年的 8.1% 提高至 2023 年的 17.5%。总氮排泄量显著上升,由 1980 年的 5.6 万 t 增长至 2023 年的 99.3 万 t。

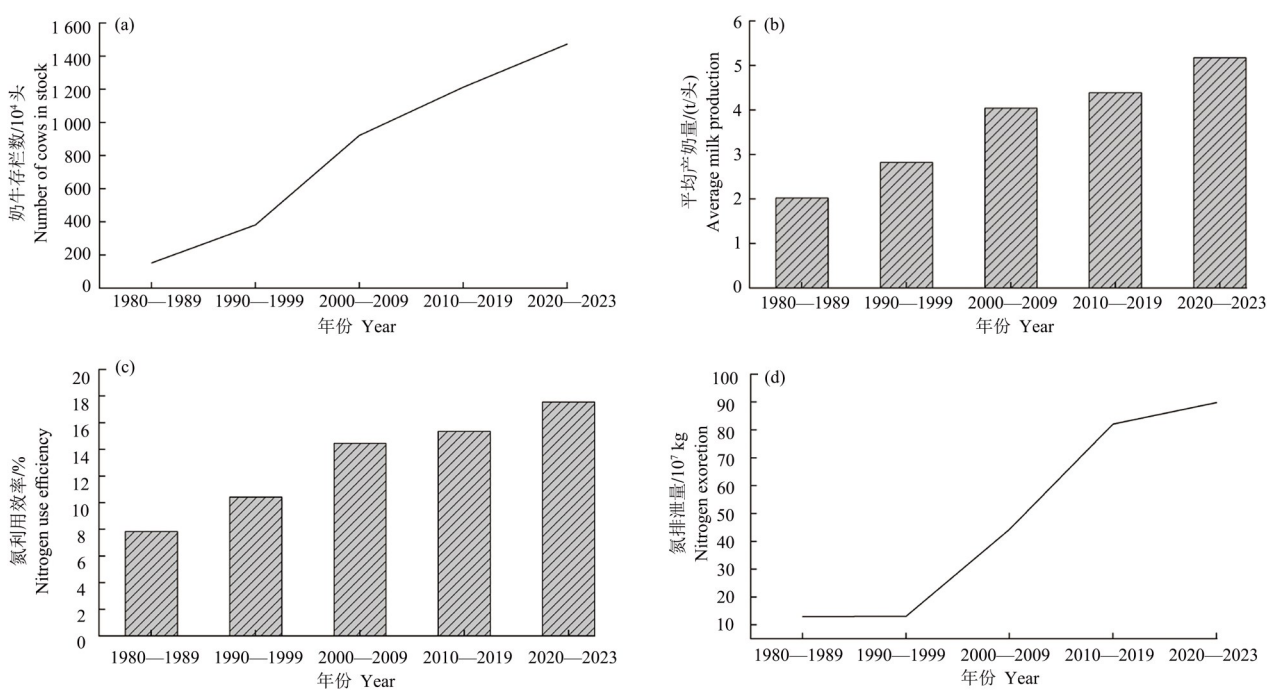


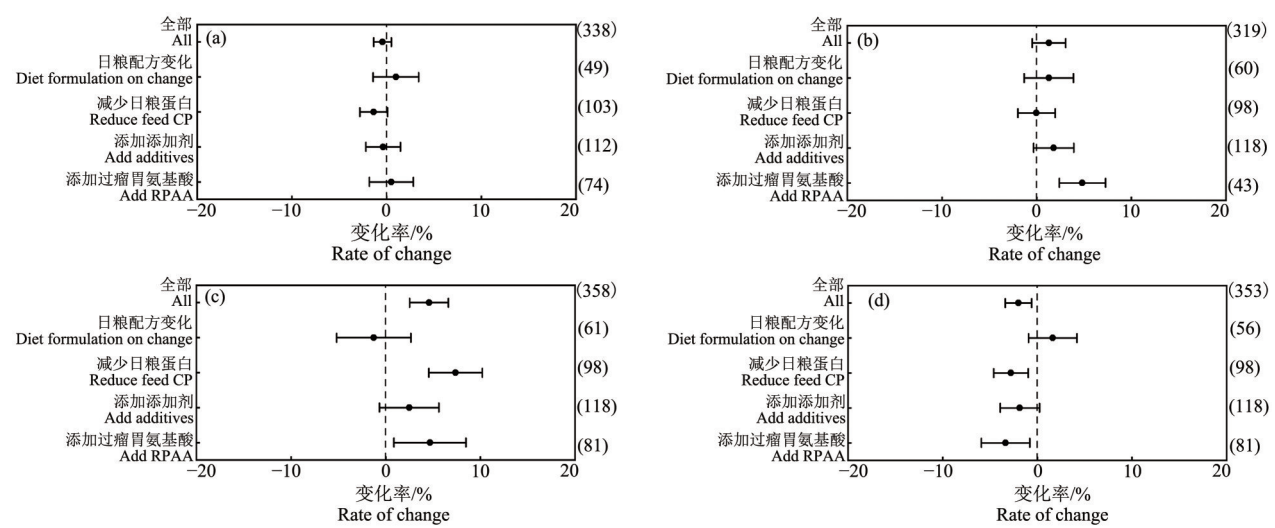
图2 1980—2023年中国奶牛存栏(a)、平均产奶量(b)、氮素利用效率(c)与氮排放量(d)年际变化

Fig. 2 Changes of stock (a), average milk yield (b), nitrogen use efficiency (c) and nitrogen excretion (d) of dairy cows in China from 1980 to 2023

2.2 饲料调控对泌乳牛奶产量和氮素利用效率的影响

4类饲料调控策略显著提高了泌乳牛 NUE ($P<0.05$), 平均增幅为 4.6%, 氮排放量显著降低 2.1% ($P<0.05$), 但对 DMI 的影响不显著(图 3)

($P>0.05$)。在饲料结构调整策略中, 添加优质牧草对产奶量的影响最大, 提高 2.8%(图 4(a))。日粮中添加谷物和秸秆则分别提高 6.9% 和 5.6% 的氮排放量。



点和误差线分别表示平均百分比变化和 95% 置信区间(CI), 如果 CI 与 0 线不重叠, 则效应显著 ($P<0.05$)。图右侧括号内数字表示有效数据组。下同。

Points and error lines indicate mean percentage change and 95% confidence interval (CI), respectively, and if the CI does not overlap with the zero line, the effect is significant ($P<0.05$). Numbers in parentheses on the right side of the figure indicate valid data groups. The same below.

图3 4种饲料调控措施对泌乳牛干物质采食量(a)、产奶量(b)、氮素利用效率(c)和氮素排放量(d)的影响

Fig. 3 Effects of four feed control measures on dry matter intake (a), milk yield (b), nitrogen use efficiency (c), and nitrogen excretion (d) of lactating cows

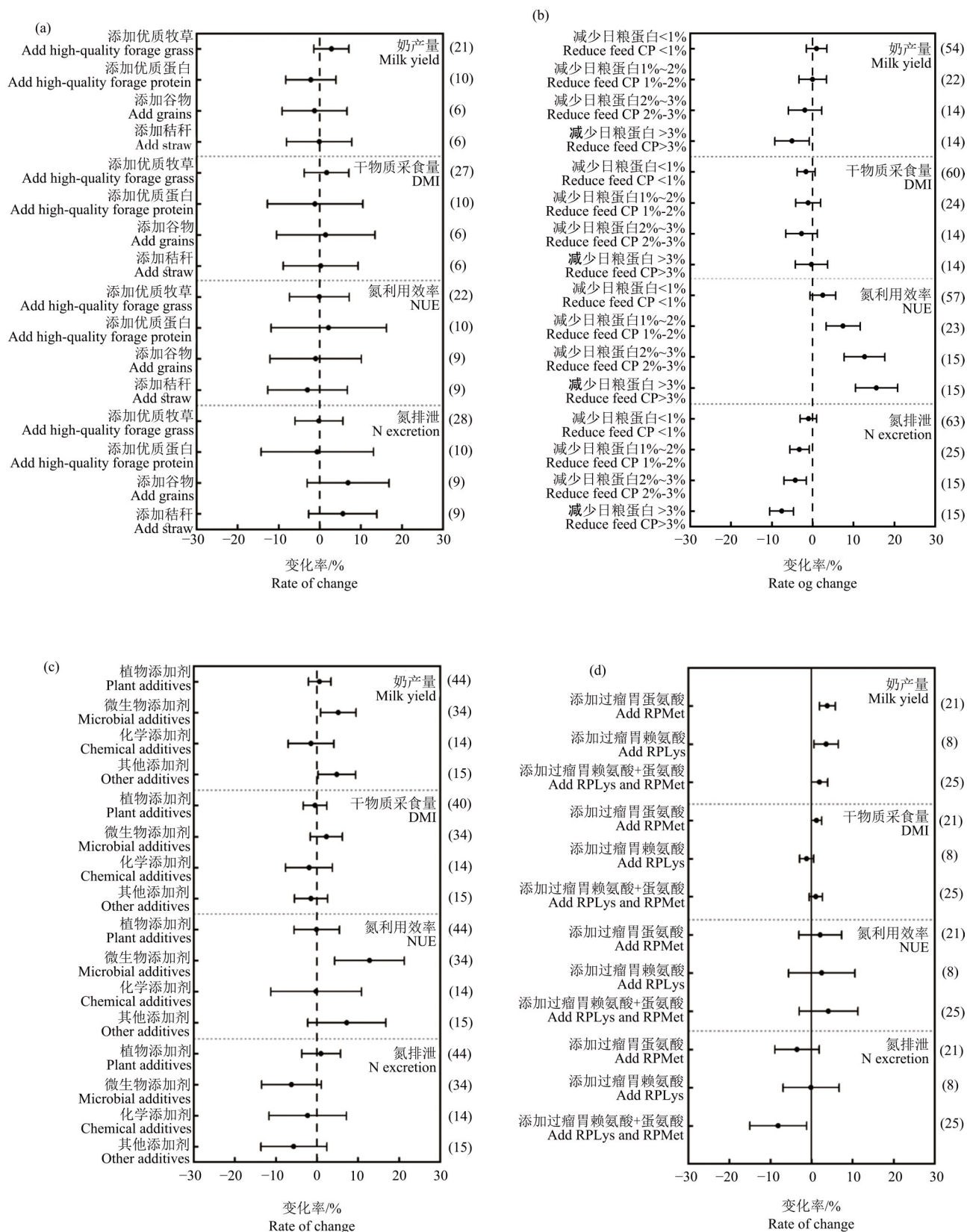


图 4 不同饲料调控措施对泌乳牛奶产量(a)、干物质采食量(b)、氮素利用效率(c)和氮素排泄量(d)的影响

Fig. 4 Percentage changes in milk yield, dry matter intake, nitrogen use efficiency, and nitrogen excretion by changes in feed formulation (a), reduction in dietary protein (b), addition of additives (c), and rumen protect amino acids (d) for lactation

降低日粮粗蛋白水平在不影响奶产量的情况下,显著提高NUE 7.4%和减少氮排泄2.8%(图3(b)~3(d))($P<0.05$)。随着日粮蛋白水平的下降,产奶量、NUE和氮排泄发生显著变化,但对DMI无显著影响。当日粮蛋白分别降低1%~2%和2%~3%时,在不影响DMI和奶产量的前提下,NUE显著提高7.5%和12.7%,氮排泄量显著降低3.2%和4.2%。而当CP降低幅度超过3%时,NUE提升15.7%,氮排泄率减少7.6%,但产奶量显著降低5.1%。

添加饲料添加剂实现提高奶产量,增加NUE和降低氮排泄量,但在统计上没有显著性差异。其中,微生物添加剂和其他类添加剂(如稀土、糖蜜)分别使奶产量提升5.2%和4.8%(图4(c))($P<0.05$)。添加微生物添加剂有效提高了NUE 12.8%($P<0.05$)。

在饲料中添加过瘤胃氨基酸分别显著提高了4.8%的产奶量(图3(b))和4.8%的NUE(图3(c))($P<0.05$),同时降低氮排泄量3.4%(图3(d))。补充过瘤胃蛋氨酸可显著提升DMI 1.3%,并提高3.9%产奶量(图4(d))。单独添加过瘤胃赖氨酸可使产奶量提高3.6%。同时补充过瘤胃蛋氨酸与赖氨酸,产奶量提升2.0%,同时氮排泄量显著下降8.1%。

2.3 饲料调控对泌乳牛氮排泄的影响

随着日粮粗蛋白水平的降低,泌乳牛粪氮和尿氮排泄量呈现下降趋势。当CP减少1%~2%时,尿氮排泄显著下降16.8%;减少2%~3%时,粪氮和尿氮分别减少5.8%和24.1%;当CP降低幅度超过3%时,粪氮减少13.0%,尿氮减少达到41.7%。同时添加过瘤胃蛋氨酸和赖氨酸显著减少粪氮5.8%和尿氮排泄10.5%(图5(b))($P<0.05$)。

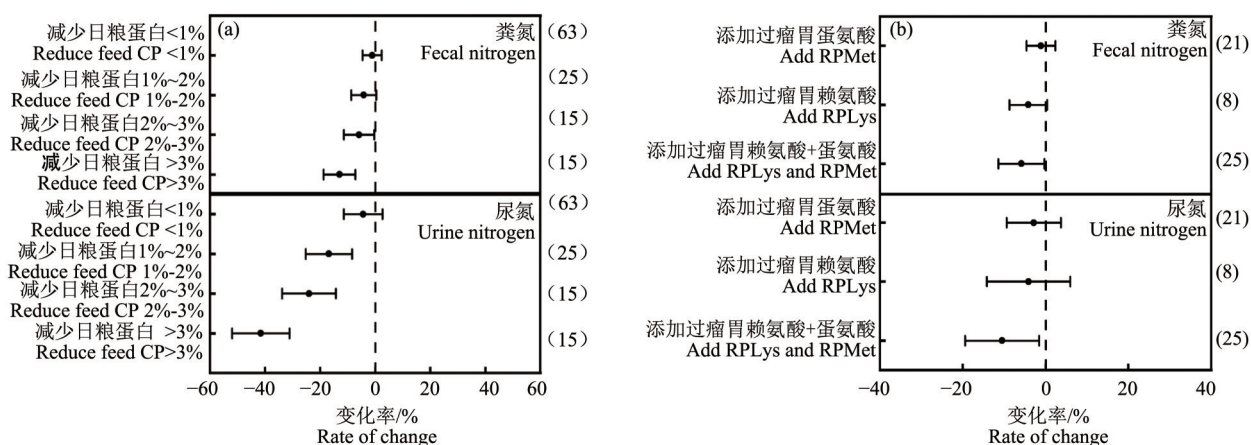


图5 减少日粮蛋白(a)和添加过瘤胃氨基酸(b)对泌乳牛粪氮和尿氮排泄量的影响。

Fig. 5 Percentage changes in fecal nitrogen excretion and urinary nitrogen excretion in lactating cattle with reduced dietary protein (a) and rumen protect amino acids supplementation (b)

2.4 饲料调控对中国泌乳牛生产的影响

2050年在S1、S3和S4情景下分别增加产奶量75.4万、283.8万和105.6万t(图6(a))。相对于基线情景,S1增加氮排泄3.3万t,S2和S4情景分别减少氮排泄12.2万和1.1万t(图6(b))。

2.5 发表偏倚性检验

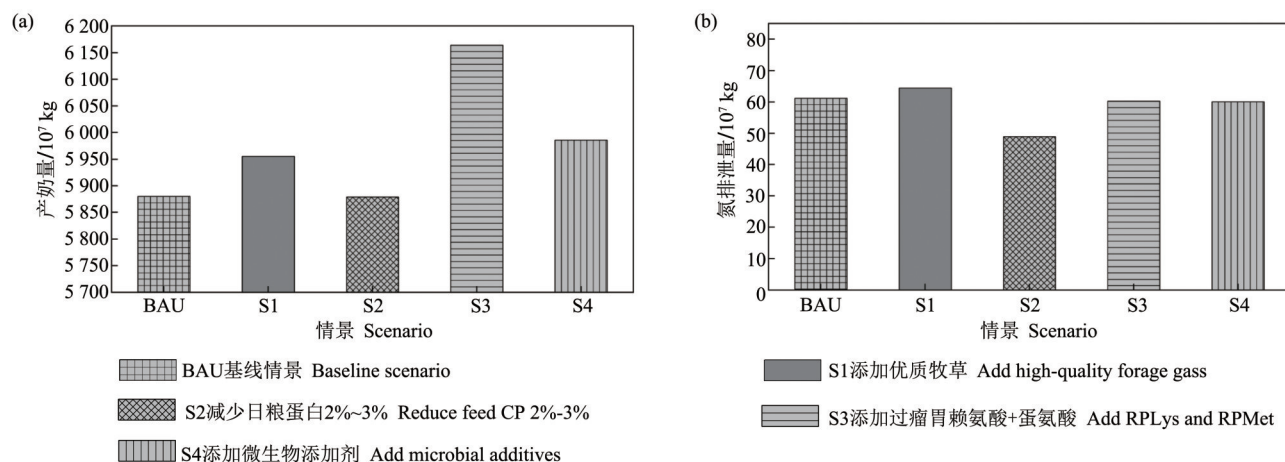
DMI、产奶量、NUE和氮排泄量效应值分布总体比较集中,在底部的数据精度较低但分布均匀,漏斗图形状基本对称,表明本研究结果受发表偏倚影响的可能性较小,Meta分析结果可信(图7)。

3 讨论

3.1 饲料调控对泌乳牛生产性能的影响

从1980年至2023年,我国泌乳奶牛年氮排泄量逐年增加,2023年达到99.31万t,且NUE普遍仅为16%^[5]。因此应对奶牛养殖氮排放增加与资源利用效率偏低的双重挑战,优化饲料结构和蛋白供给成为当前奶牛生产的重要调控方向^[21]。

本研究发现,添加优质牧草使泌乳牛的产奶量提高了2.8%。主要原因是在日粮中添加苜蓿青贮等优质牧草可有效提升乳牛产奶量。苜蓿青贮富



BAU 为 2050 年我国奶牛生产情况基线情景, S1 为 BAU 情境下添加优质牧草, S2 为 BAU 情境下降低蛋白供给 2%~3% 情景, S3 为 BAU 情境下同时添加过瘤胃氨基酸及赖氨酸情景, S4 为 BAU 情境下添加微生物添加剂情景。

BAU represents the baseline scenario for dairy cattle production in China in 2050. S1 refers to the scenario where high-quality forage is added under the BAU context. S2 refers to the scenario where the protein supply is reduced by 2%-3% under the BAU context. S3 refers to the scenario where both rumen-protected amino acids and lysine are added simultaneously under the BAU context. S4 refers to the scenario where microbial additives are added under the BAU context.

图 6 饲料调控措施对我国 2050 年奶产量(a)和氮排泄量(b)的潜力分析

Fig. 6 Analysis of the potential for dairy production (a) and nitrogen excretion (b) in China in 2050 through feed management measures

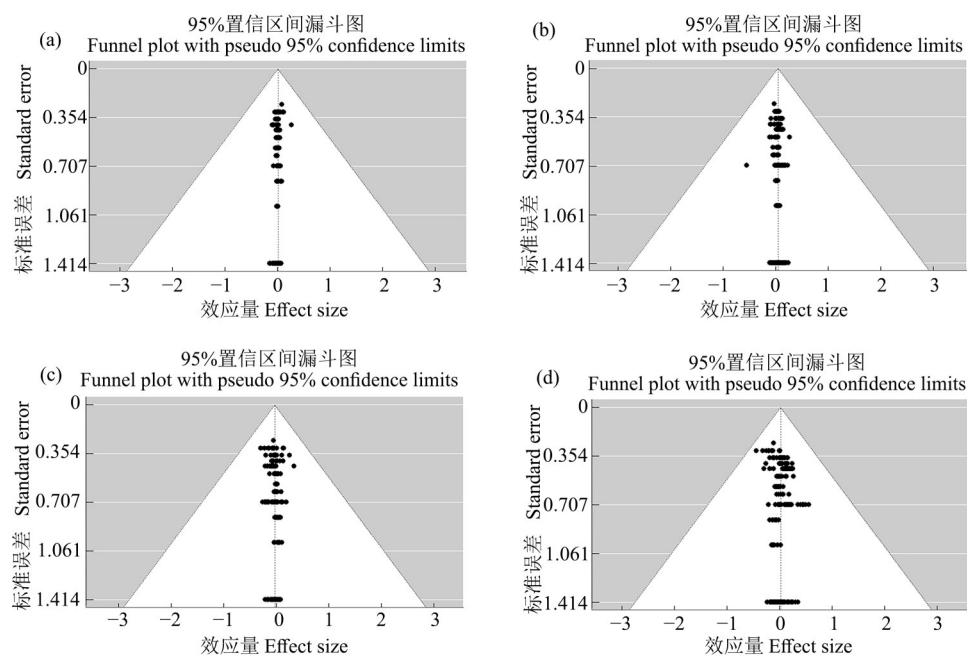


图 7 饲料调控措施对泌乳牛 DMI(a)、产奶量(b)、NUE(c)、氮排泄量(d)影响的漏斗图

Fig. 7 The funnel diagram showing the effects of feed control measures on the daily DMI(a), milk production(b), NUE (c), and nitrogen excretion (d) of lactating cattle

含过瘤胃蛋白,可绕过瘤胃直接进入小肠被吸收利用,从而增加小肠可消化蛋白的供给,为乳腺合成乳蛋白提供充足底物,促进乳蛋白合成与奶产量提升^[22]。其次,玉米青贮和羊草具有良好的适口性和

结构性碳水组成,优化日粮的纤维结构,改善瘤胃发酵模式,促进咀嚼与反刍,提高瘤胃 pH 稳定性,从而显著提升 DMI^[23]。此外,优质牧草所提供的可发酵性碳水化合物还可与日粮中蛋白质实现更好

的能蛋平衡,提高瘤胃微生物蛋白合成效率和整体营养转化效率^[24]。这些机制协同作用,共同推动泌乳牛产奶性能的提升,也与Xia等^[25]研究结论一致。

降低日粮粗蛋白水平并未影响DMI,表明适度减少日粮粗蛋白水平不会干扰泌乳牛的采食行为。这与Erickson等^[26]和Zang等^[27]研究结果相同。当日粮CP下调幅度小于3%时,奶产量未表现出明显下降,但氮排泄显著减少,NUE明显提升。这是因为奶牛具有调节氮代谢和氨基酸利用的能力,轻度的蛋白下调减少了氮输入,但乳腺对氮素的沉积能力未受明显抑制,反而由于氮摄入减少、排泄量下降,整体NUE得以显著提高^[28]。此外,在适度降低蛋白供给条件下,氨基酸更多用于乳蛋白合成,体内氮代谢趋于合成方向^[29]。与此同时,脱氨与转氨等导致氨生成的过程减少,从而减少氮排出,提高NUE^[30]。蛋白供给适度下调可促进氨基酸用于乳蛋白合成,减少尿氮排放^[31-32]。而当CP下调超过3%时,产奶量出现下降趋势,这与Doepel等^[33]的研究结果一致,当CP水平过度下调时,瘤胃微生物蛋白合成减少,氨基酸组成失衡,导致小肠吸收的必需氨基酸无法满足乳腺合成乳蛋白的需求,最终抑制乳蛋白产量^[34]。综上,适度减少日粮蛋白是提高NUE和减少氮排泄的有效途径^[35]。

相对于基础日粮,添加微生物添加剂显著提高了泌乳牛5.2%的产奶量。这是由于微生物添加剂调节瘤胃微生态平衡,改善发酵模式,促进丙酸产生比例升高,从而提高奶产量^[36]。同时促进微生物蛋白合成,增加NUE^[37],优化日粮营养物质转化,实现奶产量和NUE的双重提升。这与Moallem等^[38]研究结果一致,均表明微生物添加剂在提升奶牛生产性能和资源利用效率方面具有积极作用。

添加过瘤胃保护氨基酸能有效提高产奶量和乳蛋白量^[39]。过瘤胃保护氨基酸可绕过瘤胃微生物降解,直接在小肠吸收,弥补蛋氨酸和赖氨酸等限制性氨基酸^[40],满足乳腺对必需氨基酸的需求,促进乳蛋白合成,提升泌乳性能。此外,过瘤胃氨基酸补充优化日粮氨基酸平衡,使氮代谢和利用更符合奶牛生理需求,从而提升NUE^[41]。这与姜富贵等^[42]通过额外补充过瘤胃蛋氨酸和赖氨酸显著提升乳蛋白产量的研究一致。

3.2 饲料调控对泌乳牛氮排泄的影响

日粮CP水平与奶牛氮代谢密切相关。当日粮

CP含量超过机体对氨基酸的实际需求时,多余的氮素通常以尿氮的形式排出体外^[43-44]。因此,适度降低日粮CP水平有助于减少瘤胃内铵态氮(NH₃-N)的生成,降低经尿液排泄的氮量,从而提高整体氮素利用效率。同时,减少过量蛋白质供应降低鸟氨酸循环中氨基酸向尿素转化的比例,促使更多氮素沉积于产奶或组织蛋白中,从而减少氮的浪费。降低日粮CP的主要目标是从源头减少氮的投入,进而降低尿液和粪便中的氮排泄^[45-46]。研究表明,随着日粮CP水平的下降,粪氮和尿氮的排泄量均显著降低^[42,47],并且在不同蛋白水平梯度增加的过程中,粪氮排泄量差异显著,而尿氮排泄量差异极显著^[48-49]。进一步印证了合理调控日粮蛋白水平对改善奶牛氮代谢、减少环境污染的重要意义。

在本研究中,日粮中添加过瘤胃赖氨酸(RPLys)和过瘤胃蛋氨酸(RPMet)显著降低了氮排泄量。作为奶牛日粮中的第一和第二限制性氨基酸,赖氨酸与蛋氨酸的供给水平直接影响了其他氨基酸及含氮物质的利用效率。补充RPMet有助于维持体内氨基酸平衡,提高多种氨基酸的利用率,减少尿氮排出^[50];而RPLys的添加则能够改善小肠可消化粗蛋白(IDCP)的氨基酸组成,促进乳蛋白合成^[51-53]。过瘤胃氨基酸的补充优化了日粮氨基酸平衡,减少了脱氨和转氨过程中产生的氮浪费,降低了尿素合成与排泄^[54],同时允许日粮CP水平适度下调,从源头上减少氮输入总量,减轻泌乳牛生产系统的氮素负荷。通过改善可消化蛋白的氨基酸组成与平衡,补充RPMet和RPLys减少了经鸟氨酸循环转化为尿素的氨基酸比例,使更多氮素向乳蛋白沉积,从而降低尿氮排放^[55-56]。此外,RPMet和RPLys部分溢出瘤胃后,还可改善瘤胃营养环境,满足微生物部分氮能和碳架需求,刺激微生物生长,提高微生物蛋白(MCP)合成量^[57-58]。MCP具有较高的生物学价值,能够有效利用瘤胃NH₃-N,降低氮损失,从而提高整体NUE。本研究结果与丁大伟等^[12]、王诚等^[59]的研究一致,表明补充过瘤胃氨基酸,是减少泌乳牛氮排泄、提升氮利用效率的有效途径,也与已有报道中添加RPMet和RPLys可显著增加氮沉积、提高NUE的结果相吻合。

3.3 饲料调控下泌乳牛生产提质增效途径

4种饲料调控策略在提高泌乳牛生产性能、优

化氮素利用及减少环境负担方面均具有潜力。适度降低日粮CP水平在保证产奶量稳定的同时,显著提升氮利用效率(NUE)并减少氮排泄,适合作为普遍推广的基础策略。日粮添加过瘤胃蛋氨酸和赖氨酸兼顾产奶量提升与氮排泄减少。微生物添加剂在优化瘤胃微生态、改善氮转化中的协同效应也值得关注。值得注意的是,单一饲料结构调整如添加优质牧草,在缺乏蛋白精准调控下,虽能改善采食量和产奶表现,但可能对环境氮排放产生负面影响。因此,应注重多策略的组合应用。在当前泌乳牛日粮蛋白供给普遍偏高的背景下,适度降低粗蛋白供给水平(如2%~3%)是提升NUE、减少氮排放的重要基础措施。同时为避免因降蛋白可能带来的产奶量下降,可结合添加过瘤胃氨基酸等精准营养补充,确保乳腺合成底物充足,兼顾奶产量与氮素利用的同步提升。同时,微生物添加剂可作为辅助手段,改善瘤胃微生态,进一步提升饲料转化效率和整体的氮沉积能力。

情景分析表明,若推广饲料营养调控措施,2050年全国可增加产奶量2 114.7万t,减少氮排放10.6万t,兼顾生产力提升与环境压力降低。通过精准饲养管理与区域资源禀赋,形成泌乳牛提质增效与绿色转型的可行路径。因地制宜推广,实现我国奶牛产业生产力提升与环境可持续的双赢发展。

4 结 论

本研究系统分析了我国泌乳牛的产奶水平与氮素利用现状,并评估了日粮营养调控策略对奶牛生产的综合效应。结果表明,适度降低饲料粗蛋白可在维持奶产量的同时显著提高氮素利用效率和减少氮排泄量。日粮添加微生物菌剂可提升产奶量与氮素利用效率;补充过瘤胃氨基酸通过优化氨基酸平衡,增加乳蛋白合成和减少氮排泄。当前我国泌乳牛产量和氮素利用效率低于国际先进水平,建议结合区域资源条件,科学选择饲料策略,实施精准营养管理,实现增产与减排协同,推动奶牛生产绿色发展。

参考文献 References

- [1] 国家统计局. 2024年经济运行稳中有进主要发展目标顺利实现 [EB/OL]. [2025-01-23]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202501/t20250117_1958332.html
National Bureau of Statistics. Economic performance in 2024 maintained

- stability with progress, and major development goals were successfully achieved [EB/OL]. [2025-01-23]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202501/t20250117_1958332.html (in Chinese)
- [2] Tan M X, Hou Y, Zhang L, Shi S L, Long W T, Ma Y F, Zhang T, Oenema O. Nutrient use efficiency of intensive dairy farms in China - Current situation and analyses of options for improvement[J]. *Agricultural systems*, 2022, 203: 103495
- [3] 张仕琦, 赵圣国, 郑楠, 王加启. 奶牛氮代谢及其营养调控的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(7): 4119-4126
Zhang S Q, Zhao S G, Zheng N, Wang J Q. Research progress of nitrogen metabolism and nutrient regulation in dairy cows [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(7): 4119-4126 (in Chinese)
- [4] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 梁国庆, 周卫. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1131-1148
Song D L, Hou S P, Wang X B, Liang G Q, Zhou W. Quantity and utilization potential of nutrient resources in livestock manure and urine in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(5): 1131-1148 (in Chinese)
- [5] Bai Z H, Ma L, Jin S Q, Ma W Q, Velthof G L, Oenema O, Liu L, Chadwick D, Zhang F S. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China[J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(24): 13409-13418
- [6] Zhu Z P, Zhang X M, Dong H M, Wang S T, Reis S, Li Y, Gu B J. Integrated livestock sector nitrogen pollution abatement measures could generate net benefits for human and ecosystem health in China[J]. *Nature Food*, 2022, 3(2): 161-168
- [7] Phuong H N, Friggens N C, de Boer I J M, Schmidely P. Factors affecting energy and nitrogen efficiency of dairy cows: A meta-analysis[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(11): 7245-7259
- [8] Sinclair K D, Garnsworthy P C, Mann G E, Sinclair L A. Reducing dietary protein in dairy cow diets: Implications for nitrogen utilization, milk production, welfare and fertility[J]. *Animal*, 2014, 8(2): 262-274
- [9] 张峰, 邱伟, 刘小静, 马书林, 房灿, 刘小虎, 韩爱云, 常靖, 张彩云, 张建良. 日粮蛋白水平对奶牛生产性能及氮表观消化率的影响[J]. *饲料研究*, 2012, 35(7): 51-53
Zhang F, Qiu W, Liu X J, Ma S L, Fang C, Liu X H, Han A Y, Chang J, Zhang C Y, Zhang J L. Effects of dietary protein levels on performance and apparent nitrogen digestibility of dairy cows[J]. *Feed Research*, 2012, 35(7): 51-53 (in Chinese)
- [10] 王星凌, 刘春林, 赵红波, 游伟, 成海建. 饲料粗蛋白质水平对中国荷斯坦奶牛产奶性能、氮利用及血液激素的影响[J]. *动物营养学报*, 2012, 24(4): 669-680
Wang X L, Liu C L, Zhao H B, You W, Cheng H J. Dietary crude protein levels affect milk production, nitrogen utilization and blood hormones of Chinese Holstein dairy cows[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2012, 24(4): 669-680 (in Chinese)
- [11] Lee C, Hristov A N, Dell C J, Feyerherisen G W, Kaye J, Beegle D. Effect of dietary protein concentration on ammonia and greenhouse gas emitting potential of dairy manure[J]. *Journal of dairy science*, 2012, 95(4): 1930-1941
- [12] 丁大伟, 高许雷, 滕乐帮, 吕永艳, 孙国强. 过瘤胃蛋氨酸与过瘤胃赖氨酸不同组合对奶牛瘤胃微生物蛋白产量、产奶性能和氮排泄的影响[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(6): 2716-2726
Ding D W, Gao X L, Teng L B, Lyu Y Y, Sun G Q. Effects of different combinations of rumen-protected methionine and rumen-protected lysine on rumen microbial protein production, lactation performance and nitrogen excretion of dairy cows[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(6): 2716-2726 (in Chinese)
- [13] Desnoyers M, Giger-Reverdin S, Bertin G, Duvaux-Ponter C, Sauvant D. Meta-analysis of the influence of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on ruminal parameters and milk production of ruminants[J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(4): 1620-1632
- [14] Huhtanen P, Hetta M, Swensson C. Evaluation of canola meal as a protein

- supplement for dairy cows: A review and a meta-analysis[J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2011, 91(4): 529-543
- [15] O'Neill B C, Kriegler E, Riahi K, Ebi K L, Hallegatte S, Carter T R, Mathur R, van Vuuren D P. Meeting report of the workshop on the nature and use of new socioeconomic pathways for climate change research, boulder, CO, November 2-4, 2011 [R]. Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research (NCAR), 2012
- [16] Bai Z H, Lee M R F, Ma L, Ledgard S, Oenema O, Velthof G L, Ma W Q, Guo M C, Zhao Z Q, Wei S, Li S L, Liu X, Havlik P, Luo J F, Hu C S, Zhang F S. Global environmental costs of China's thirst for milk[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 2198-2211
- [17] Egger M, Smith G D, Schneider M, Minder C. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test[J]. *BMJ: British Medical Journal*, 1997, 315(7109): 629-634
- [18] Duval S, Tweedie R. Trim and fill: A simple funnel-plot - based method of testing and adjusting for publication bias in meta-analysis[J]. *Biometrics*, 2000, 56(2): 455-463
- [19] Rosenberg M S. The file-drawer problem revisited: A general weighted method for calculating fail-safe numbers in meta-analysis[J]. *Evolution*, 2005, 59(2): 464-468
- [20] Lin L F, Chu H T. Quantifying publication bias in meta-analysis [J]. *Biometrics*, 2018, 74(3): 785-794
- [21] Schwab C, Broderick G. A 100-year review: Protein and amino acid nutrition in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(12): 10094-10112
- [22] 史卉玲, 席琳乔, 王连群, 马春晖. 不同苜蓿青贮比例对泌乳奶牛生产性能及血液生化指标的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(12): 181-186
Shi H L, Xi L Q, Wang L Q, Ma C H. Influence of different alfalfa silage proportion on lactating dairy production performance and blood biochemical indicators[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22(12): 181-186 (in Chinese)
- [23] Allen M S. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83(7): 1598-1624
- [24] Huhtanen P, Hristov A N. A meta-analysis of the effects of dietary protein concentration and degradability on milk protein yield and milk N efficiency in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(7): 3222-3232
- [25] Xia T, Liu Z X, Yang Z Y, Jiang A Y, Zhou C S, Tan Z L. Effects of partial replacement of alfalfa hay with alfalfa silage in dairy cows: Impacts on production performance and rumen microbiota[J]. *Animals*, 2025, 15(18): 2748
- [26] Erickson M G, Barros T, Aguerre M J, Olmos Colmenero J J, Bertics S J, Wattiaux M A. Reducing dietary crude protein: Effects on digestibility, nitrogen balance, and blood metabolites in late-lactation Holstein cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107(7): 4394-4408
- [27] Zang Y, Ji P, Morrison S Y, Koba Y, Grant R J, Dann H M. Reducing metabolizable protein supply: Effects on milk production, blood metabolites, and health in early-lactation dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(12): 12443-12458
- [28] Kidane A, Overland M, Mydland L T, Prestløkken E. Interaction between feed use efficiency and level of dietary crude protein on enteric methane emission and apparent nitrogen use efficiency with Norwegian Red dairy cows [J]. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(9): 3967-3982
- [29] Danes M A C, Paula E M, Parys C, Souza G M, Rezende J P A, Broderick G A, Wattiaux M A. Effects of amount and profile of amino acids supply on lactation performance, mammary gland metabolism, and nitrogen efficiency in Holstein dairy cows[J]. *Animals*, 2023, 13(11): 1866
- [30] van der Stelt B, van Vliet P C J, Reijs J W, Temminghoff E J M, van Riemsdijk W H. Effects of dietary protein and energy levels on cow manure excretion and ammonia volatilization[J]. *Journal of Dairy Science*, 2008, 91(12): 4811-4821
- [31] Lapierre H, Berthiaume R, Raggio G, Thivierge M C, Doepel L, Pacheco D, Dubreuil P, Lobley G E. The route of absorbed nitrogen into milk protein [J]. *Animal Science*, 2005, 80(1): 11-22
- [32] Reynal S M, Broderick G A. Effect of dietary level of rumen-degraded protein on production and nitrogen metabolism in lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2005, 88(11): 4045-4064
- [33] Doepel L, Pacheco D, Kennelly J J, Hanigan M D, López I F, Lapierre H. Milk protein synthesis as a function of amino acid supply[J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(5): 1279-1297
- [34] Broderick G A. Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy Cows¹[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(4): 1370-1381
- [35] Broderick G A, Faciola A P, Armentano L E. Replacing dietary soybean meal with canola meal improves production and efficiency of lactating dairy cows 1[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(8): 5672-5687
- [36] Chowdhury MR. Low protein diets based on high protein forages for dairy cows: effects on performance, metabolism and nitrogen use efficiency[D]. *Newport: Harper Adams University*; 2022
- [37] 王茂荣, 莫放, 岳文斌, 黄应祥, 苗朝华, 王峰, 陈瑶. 硫酸亚铁添加对体外瘤胃微生物发酵的影响[J]. 中国草食动物, 2008(6): 14-18
Wang M R, Mo F, Yue W B, Huang Y X, Miao C H, Wang F, Chen Y. Influence of ferrous sulfate supplementation on nitrogen metabolism and volatile fatty acid production by ruminal microorganisms in continuous culture flow-through fermentors[J]. *China Herbivores*, 2008, 28(6): 14-18 (in Chinese)
- [38] Moallem U, Lehrer H, Livshitz L, Zachut M, Yakoby S. The effects of live yeast supplementation to dairy cows during the hot season on production, feed efficiency, and digestibility[J]. *Journal of Dairy Science*, 2009, 92(1): 343-351
- [39] 李颖丽, 王典, 刘宏凯, 赵永生, 兰儒冰, 杜宏盛, 张孟恩, 田彦锋. 外源 α -淀粉酶对荷斯坦奶牛生产性能的影响[J]. 饲料研究, 2025, 48(7): 16-20
Li Y L, Wang D, Liu H K, Zhao Y S, Lan R B, Du H S, Zhang M E, Tian Y F. Effect of exogenous α -amylase on production performance of Holstein dairy cows[J]. *Feed Research*, 2025, 48(7): 16-20 (in Chinese)
- [40] 王宝义, 韩吉雨, 张彩霞, 李俊良. 复合酶制剂对奶牛生产性能和营养物质表现消化率的影响[J]. 中国奶牛, 2024(7): 78-81
Wang B Y, Han J Y, Zhang C X, Li J L. Effects of compound enzyme preparation on performance and nutrient apparent digestibility of lactating cows[J]. *China Dairy Cattle*, 2024(7): 78-81 (in Chinese)
- [41] 贾晓晓, 徐宏建, 李建国, 李妍, 马峰涛, 高艳霞, 沈宜钊. 过瘤胃酵母培养物对泌乳中期奶牛生产性能、瘤胃发酵参数和血清指标的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(7): 4564-4575
Jia X X, Xu H J, Li J G, Li Y, Ma F T, Gao Y X, Shen Y Z. Effects of rumen-protected yeast culture on performance, rumen fermentation parameters and serum indexes of mid-lactation dairy cows[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(7): 4564-4575 (in Chinese)
- [42] 姜富贵, 李德鹏, 成海建, 苏文政, 张召坤, 时光, 宋恩亮. 过瘤胃氨基酸对泌乳早期奶牛生产性能、乳成分和血液生化指标的影响[J]. 中国乳业, 2021(7): 25-31
Jiang F G, Li D P, Cheng H J, Su W Z, Zhang Z K, Shi G, Song E L. Effect of rumen-protected amino acid on production performance, milk composition and blood biochemical parameter in early lactation dairy cows[J]. *China Dairy*, 2021(7): 25-31 (in Chinese)
- [43] 郎昌兵, 韩庆彦. 微生物饲料添加剂对泌乳荷斯坦奶牛的应用效果试验[J]. 畜牧兽医科技信息, 2024(2): 37-39
Lang C B, Han Q Y. Effect of microbial feed additives on lactating Holstein cows[J]. *Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2024(2): 37-39 (in Chinese)
- [44] 米伟虎, 李一帆, 王丽, 李玉龙, 曹雨娃, 王弘浩, 刘维平, 王腊梅, 姚军虎, 王场场, 曹阳春. 酵母培养物对泌乳后期奶牛生产性能、血清生化指标、瘤胃微生物及代谢物的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(7): 4576-4590
Mi H W, Li Y F, Wang L, Li Y L, Cao Y W, Wang H H, Liu W P, Wang L M, Yao J H, Wang D D, Cao Y C. Effects of yeast culture on performance, serum biochemical indexes, rumen microbiota and metabolites of late lactating dairy cows [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(7): 4576-4590 (in Chinese)
- [45] Wei X S, Wu H, Wang Z X, Zhu J P, Wang W J, Wang J H, Wang Y M,

- Wang C. Rumen-protected lysine supplementation improved amino acid balance, nitrogen utilization and altered hindgut microbiota of dairy cows[J]. *Animal Nutrition*, 2023, 15: 320-331
- [46] Pegolo S, Mach N, Ramayo-Caldas Y, Schiavon S, Bittante G, Cecchinato A. Integration of GWAS, pathway and network analyses reveals novel mechanistic insights into the synthesis of milk proteins in dairy cows[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 566
- [47] Mazinani M, Naserian A, Rude B, Tahmasbi A, Valizadeh R. Effects of feeding rumen-protected amino acids on the performance of feedlot calves[J]. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 2020, 7(2): 229-233
- [48] Sinclair K D, Garnsworthy P C, Mann G E, Sinclair L A. Reducing dietary protein in dairy cow diets: Implications for nitrogen utilization, milk production, welfare and fertility[J]. *Animal*, 2014, 8(2): 262-274
- [49] Nennich T D, Harrison J H, VanWieringen L M, St-Pierre N R, Kincaid R L, Wattiaux M A, Davidson D L, Block E. Prediction and evaluation of urine and urinary nitrogen and mineral excretion from dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2006, 89(1): 353-364
- [50] Kebreab E, France J, Beever D E, Castillo A R. Nitrogen pollution by dairy cows and its mitigation by dietary manipulation[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 60(1): 275-285
- [51] Yang C T, Ferris C P, Yan T. Effects of dietary crude protein concentration on animal performance and nitrogen utilisation efficiency at different stages of lactation in Holstein-Friesian dairy cows[J]. *Animal*, 2022, 16(7): 100562
- [52] 倪丽丽, 闫素梅, 赵鹏, 史彬林, 鲍宏云. 日粮蛋白质与瘤胃非降解蛋白质水平对奶牛氮排泄的影响 [C]//第六次全国饲料营养学术研讨会论文集. 杨凌, 2010: 126
- Ni L L, Yan S M, Zhao P, Shi B L, Bao H Y. Effects of dietary protein and ruminal non-digested protein levels on nitrogen excretion in dairy cows[C]. In: *Proceedings of the sixth National Symposium on Feed Nutrition*. Yang Ling, 2010: 126 (in Chinese)
- [53] 杨正德, 吴锋, 宋大书, 裴成江, 刘付祥, 曾一敬. 过瘤胃保护氨基酸提高泌乳盛期奶牛乳蛋白含量的营养调控研究[J]. *山地农业生物学报*, 2011, 30(5): 391-394, 403
- Yang Z D, Wu F, Song D S, Pei C J, Liu F X, Zeng Y J. Effects of rumen protected amino acids on nutritive manipulation of improving milk protein yield in early lactation dairy cattle[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2011(5): 391-394, 403 (in Chinese)
- [54] 郭玉琴. 蛋氨酸和赖氨酸过瘤胃保护及其效果评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006
- Guo Y Q. A study of the protection and effectiveness evaluation on rumen bypass methionine and lysine[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006 (in Chinese)
- [55] 吴锋, 杨正德, 曾一敬, 裴成江. 过瘤胃保护氨基酸提高奶牛乳蛋白转化效率的研究[J]. *贵州畜牧兽医*, 2012, 36(2): 1-4
- Wu F, Yang Z D, Zeng Y J, Pei C J. Study on rumen-protected amino acids to improve the conversion efficiency of milk protein[J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2012, 36(2): 1-4 (in Chinese)
- [56] 张成喜, 孙友德, 刘锡武, 孙国强. 过瘤胃蛋氨酸对奶牛瘤胃微生物蛋白产量、产奶性能和氮排泄的影响[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(5): 1759-1766
- Zhang C X, Sun Y D, Liu X W, Sun G Q. Effects of rumen-protected methionine on ruminal microbial protein production, milk performance and nitrogen excretion of dairy cows[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(5): 1759-1766 (in Chinese)
- [57] Robinson P H, Swanepoel N, Shinzato I, Juchem S O. Productive responses of lactating dairy cattle to supplementing high levels of ruminally protected lysine using a rumen protection technology[J]. *Animal feed science and technology*, 2011, 168(1/2): 30-41
- [58] Lee C, Hristov A N, Dell C J, Feyereisen G W, Kaye J, Beegle D. Effect of dietary protein concentration on ammonia and greenhouse gas emitting potential of dairy manure[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(4): 1930-1941
- [59] 王诚, 郭慧君, 张桂国, 翟桂玉, 丁博群, 董桂红, 王玲, 范秋苹, 孔德玲. 过瘤胃氨基酸对反刍动物生产性能及氮排放的影响[J]. *中国乳业*, 2024(6): 49-53
- Wang C, Guo H J, Zhang G G, Zhai G Y, Ding B Q, Dong G H, Wang L, Fan Q P, Kong D L. Effect of rumen-protected amino acid on production performance and nitrogen emission of ruminants[J]. *China Dairy*, 2024(6): 49-53 (in Chinese)

责任编辑: 秦梅



第一作者简介: 罗淦, 福建农林大学国际镁研究所资源利用与植物保护专业在读硕士研究生。研究方向为农牧系统养分管理与环境评价。



通讯作者简介: 马怡斐, 福建农林大学资源与环境学院国际镁营养研究所讲师。研究方向为农牧系统养分管理与环境评价和畜禽废弃物资源化利用。