

仇亚伟, 徐尧, 杨成森, 等. 过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛生产性能及肝脏健康的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (8): 55-62.

QIU Y W, XU Y, YANG C S, et al. Effects of rumen-protected choline chloride on liver health and production performance in periparturient dairy cows [J].

Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (8): 55-62.

过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛生产性能及肝脏健康的影响

仇亚伟¹, 徐尧², 杨成森¹, 刘家睿¹, 王恒², 扶绍东¹, 苗晋锋^{1*}

(1. 南京农业大学动物医学院/农业农村部动物生理生化重点实验室, 江苏 南京 210014;

2. 上海美农生物科技股份有限公司, 上海 201800)

摘要: 旨在探讨过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛生产性能和肝脏健康的影响。选取 35 头预产期和产奶量相近的荷斯坦黑白花奶牛, 采用完全随机化方法将其分为对照组与试验组, 对照组奶牛饲喂基础日粮, 试验组奶牛在基础日粮中添加 50 g/(头·d) 的过瘤胃氯化胆碱; 试验共 42 d (产前 21 d 至产后 21 d), 持续记录产奶量至产后 90 d; 在产后 10、40 和 70 d, 收集乳样, 检测乳成分; 在产前 21 d、产后 14 d 和产后 21 d 采血, 检测血常规和血液生化指标。结果: 在生产性能表现上, 产后 10 d 试验组乳累计蛋白显著高于对照组 ($P<0.05$), 产后 70 d 试验组组内乳脂率显著高于产后 10 d ($P<0.05$)。在肝脏健康与能量代谢方面, 产后 14 d 试验组血清甘油三酯 (TG) 水平显著低于对照组 ($P<0.05$); 与产前相比, 产后 14 d 试验组血清 β -羟丁酸 (BHBA) 水平下降 4.8% ($P>0.05$), 对照组上升 6.2% ($P>0.05$); 与对照组相比, 产后 14 d 试验组血清非酯化脂肪酸 (NEFA) 水平降低 2.36% ($P>0.05$)。在免疫调节方面, 各项指标无显著差异 ($P>0.05$)。综上, 在日粮中添加 50 g/(头·d) 的过瘤胃氯化胆碱, 对改善围产期奶牛的能量负平衡状态、降低代谢患病风险和提升其生产性能具有积极作用。

关键词: 过瘤胃氯化胆碱; 围产期奶牛; 生产性能; 肝脏健康

中图分类号: S826

文献标志码: A

文章编号: 0529-5130(2026)08-0055-08

Effects of rumen-protected choline chloride on liver health and production performance in periparturient dairy cows

QIU Yawei¹, XU Yao², YANG Chengsen¹, LIU Jiarui¹, WANG Heng², FU Shaodong¹, MIAO Jinfeng^{1*}

(1. College of Veterinary Medicine, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Animal Physiology and Biochemistry,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China;

2. Shanghai Menon Biological Technology Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of rumen-chlorinated choline on production performance and liver health in perinatal dairy cows. A total of 35 Holstein Black-and-White cows with similar estimated dates of calving and milk yield were selected, and randomly divided into a control group and an experimental group using a completely randomized design. The control group was fed with the basal diet; additionally, the experimental group received an extra 50 g · head⁻¹ · d⁻¹ of rumen-chlorinated choline. The trial lasted for 42 days (from 21 days prepartum to 21 days postpartum), with continuous recording of milk production until 90 days postpartum. Milk samples were collected at 10, 40, and 70 days postpartum for analysis of milk composition; and blood samples were drawn at 21 days prepartum, 14 days postpartum, and 21 days postpartum, respectively, for routine blood tests and biochemical parameter measurements. The results showed that, the cumulative milk protein content in the experimental group was significantly higher than that in the control group at 10 days postpartum ($P<0.05$), and the milk fat percentage within the experimental group showed a significant upward trend ($P<0.05$). In terms of liver health and energy metabolism, the serum triglyceride (TG) levels in the experimental group were significantly lower than those in the control group at 14 days postpartum ($P<0.05$); at 14 days postpartum, the serum β -hydroxybutyrate (BHBA) levels decreased by 4.8% in the experimental group ($P>0.05$), while these levels increased by 6.2% in the control group ($P>0.05$); and the non-esterified fatty acid (NEFA) levels were reduced by 2.36% in the experimental group, compared with the control group ($P>0.05$). In terms of immunomodulation, no signifi-

收稿日期: 2025-09-26; 修回日期: 2026-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32273013); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2026FRF05012); 中央高校基本业务费项目 (QTPY2025008)

第一作者: 仇亚伟, 男, 硕士, 实验师

* 通信作者: 苗晋锋, 教授, 研究方向为泌乳及动物健康调控, E-mail: mjf171647@126.com。

cant differences were observed in all the indicators ($P>0.05$). In conclusion, dietary supplementation with $50\text{ g} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ of rumen-protected choline chloride produced positive effects on improving the negative energy balance state, reducing the risk of metabolic diseases, and enhancing the production performance of periparturient dairy cows.

Keywords: rumen-protected choline chloride; periparturient dairy cows; production performance; liver health

奶业是我国重要的畜牧产业。2025 年,我国奶牛存栏达 590 万头,商品原料奶产量 4 091 万吨,占全球总量 5.5%,形成全球大型乳制品消费市场^[1]。然而在“需求增长+进口替代+成本倒挂”的影响下,生鲜乳单位养殖成本不断上涨,“增产不增效”成为制约牧场生存的核心矛盾。农业农村部《“十四五”奶业竞争力提升行动方案》明确提出,到 2025 年,我国奶牛年均单产力争达到 9 吨左右,持续提升奶牛养殖标准化、健康化水平,全面增强奶业核心竞争力。因此,如何在产后 60 d 这一关键期以最小营养投入获取最大健康红利,已成为全行业降本增效的关键突破口。

围产期(产前 21 d 至产后 21 d)正是奶牛能量负平衡(NEB)最剧烈的阶段。这种能量缺口迫使机体通过分解脂肪供能,造成非酯化脂肪酸(NEFA)水平剧烈升高^[2],当 NEFA 超过线粒体 β -氧化能力时,肝脏将其重新酯化为甘油三酯(TG)。由于反刍动物肝脏载脂蛋白 B100(ApoB100)及微粒体 TG 转移蛋白(MTP)表达量天然偏低,极低密度脂蛋白(VLDL)组装受限,TG 无法有效输出,继而诱发脂肪肝、酮病等代谢性疾病,严重制约产奶性能并增加淘汰风险^[3]。全国 11.7 万家规模牧场监测数据显示,临床酮病、亚临床酮病与脂肪肝分别使单头泌乳牛年均损失 1 850 元、1 220 元与 960 元;按 650 万头成母牛计算,三类代谢病每年导致行业直接经济损失 103.7 亿元,其中治疗费用占 12%,淘汰损失占 44%,产奶量下降折损占 44%。因此,解决围产期奶牛健康问题,成为中国奶业“稳产、提效、降本”的关键。

胆碱作为 VLDL 合成的限速底物,能把肝脏过量 TG 以脂蛋白形式转运出去,从而预防脂肪肝和酮病。然而,反刍动物瘤胃微生物对胆碱的降解率大于 85%,普通胆碱无法以生理有效剂量到达小肠^[4]。2005 年我国首次实现“氯化胆碱微胶囊”过瘤胃保护技术突破。研究发现,过瘤胃氯化胆碱能够预防脂肪肝、减少酮病发生、降低围产期奶牛氧化应激水平^[5-6],整体上调控围产期奶牛生理代谢和健康状态^[7]。日粮中添加 $20\text{ g}/(\text{头} \cdot \text{d})$ 过瘤胃氯化胆碱,可以改善奶牛生产性能、血液生化指标^[8]。

尽管过瘤胃氯化胆碱的“增产、降脂、抗酮”

效应已被试验证实,国内外尚未见 $50\text{ g}/(\text{头} \cdot \text{d})$ 剂量同步分析不同胎次奶牛产前-产后肝脏代谢酶、免疫因子动态变化的相关内容。本研究立足“国家奶业竞争力提升”重大需求,以 $50\text{ g}/(\text{头} \cdot \text{d})$ 过瘤胃氯化胆碱为干预剂量,同步监测初产、经产奶牛自产前 21 d 至产后 21 d 血清 NEFA、 β -羟基丁酸(BHBA)、TG、VLDL、己糖激酶(HK)、乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)及免疫球蛋白 G(IgG)、免疫球蛋白 M(IgM)、肿瘤坏死因子- α (TNF- α)等的动态变化,旨在明确该剂量对不同胎次围产期奶牛肝脏脂代谢酶与免疫因子的时效差异,为靶向缓解能量负平衡提供可复制的技术参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

过瘤胃氯化胆碱为上海美农生物科技股份有限公司提供,采用脂质-壳聚糖双层包被,主要有效成分为氯化胆碱(饲料级,纯度 $\geq 98\%$,重金属铅 $\leq 2\text{ mg/kg}$,砷 $\leq 1\text{ mg/kg}$,游离三甲胺 $\leq 0.02\%$),有效含量为 30%,0~72 h 的胆碱瘤胃降解率为 0.70%~50.40%,瘤胃有效降解率为 18.90%,16 h 胆碱小肠释放率为 92.22%(数据由扬州大学动物营养与饲料工程技术研究中心提供)。荷斯坦黑白花奶牛由现代牧业股份有限公司提供。

1.2 试验动物及分组

选择不同胎次,预产期相近的 35 头荷斯坦黑白花奶牛,并根据牧场最近一次日常监测数据,剔除有临床酮病和脂肪肝病史的个体,随机分为对照组和试验组。对照组饲喂基础日粮,其中初产牛 6 头,二胎牛 7 头,三胎牛 5 头;试验组在基础日粮中添加 $50\text{ g}/(\text{头} \cdot \text{d})$ 过瘤胃氯化胆碱,其中初产牛 7 头,二胎牛 6 头,三胎牛 4 头。组间胎次分布无差异($\chi^2=0.06$, $P=0.81$),基于预期产奶量差值 2.5%,设定 $\alpha=0.05$,检验效能 0.80,经 GPower 计算每组最低样本量为 15 头。本试验实际每组选用 17~18 头,样本量满足统计学要求。本试验获南京农业大学实验动物福利与伦理委员会批准(批准号: NJAULLSC2024102)。试验期为产前 21 d~产后 21 d,共计 42 d,试验期间自由饮水、采食;产后 21 d 起试验组所有牛只统一停用过瘤胃氯化胆碱,以观察残留/延迟效应,数据跟踪至产后 90 d。奶牛按照养殖

场正常养殖程序进行饲养，基础日粮组成和营养成分见表 1。

表 1 奶牛基础日粮组成及营养成分（干物质基础）

	组成	含量
日粮/%	玉米粉	21.01
	苜蓿长草	20.56
	青贮玉米	17.57
	豆粕	8.00
	甜菜粕	5.13
	燕麦草	5.12
	光棉籽	4.58
	湿啤酒糟	4.53
	膨化大豆	3.85
	压片玉米	2.40
	干酒糟及其可溶物	2.38
	菜籽粕	1.30
	预混料 ^①	1.05
	小苏打	0.74
	食盐	0.55
	磷酸氢钙	0.50
	脂肪酸钙	0.43
	氧化镁	0.30
营养	干物质/%	57.10
	中性洗涤纤维/%	30.85
	酸性洗涤纤维/%	19.59
	粗蛋白质/%	17.40
	代谢能/（MJ·kg ⁻¹ ）	11.16
	粗灰分/%	7.73
	泌乳净能/（MJ·kg ⁻¹ ）	7.20
	粗脂肪/%	5.56
	钙/%	0.65
	磷/%	0.45

注：①每千克预混料提供：维生素 A 151 400 U，维生素 D₃ 21 284 U，维生素 E 720 U，生物素 0.05 mg，β-胡萝卜素 0.14 mg，锰 1 500 mg，磷 4 000 mg，硫 0.65 mg，锌 2 000 mg，硒 14 mg，钴 18 mg。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 产奶量及乳品质

牧场采用管道式挤奶器，试验期间记录产后 1~90 d 的产奶量（当日产奶量为早、中、晚 3 次产奶量之和）。产后 10、40 和 70 d，收集乳样，乳成分分析仪系统检测牛乳中乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和累计蛋白等指标。

1.3.2 血常规和血液生化指标

分别在产前 21 d、产后 14 d 和产后 21 d，于牛尾根静脉采血 10 mL，所有血样统一于早班挤奶后 1 h 内采集。全血用于血常规检测。4 ℃、3 000 r·min⁻¹离心 10 min，取上清液，-80 ℃保存，3 月内测定生化指标。

使用 ELISA 试剂盒（江苏酶免实业有限公司）进行血液生化指标测定，具体步骤按照说明书指示操作。测定指标：NEFA、BHBA、VLDL、白细胞介素-10（IL-10）、IgG、IgM、TNF-α、C-反应蛋白（CRP）、总抗氧化能力（T-AOC）、丙二醛（MDA）、HK 和 ACC 活力。

全自动血细胞分析仪（深圳迈瑞 BC-5000）或全自动生化分析仪（希思美康 BX-4000）检测奶牛血液中 TG、总蛋白（TP）、总胆红素（TB）、白蛋白（ALB）、白细胞总数（WBC）、葡萄糖（GLU）、丙氨酸氨基转移酶（ALT）、天门冬氨酸氨基转移酶（AST）及碱性磷酸酶（ALP）活力。

1.4 数据统计与分析

试验数据采用 WPS 表格进行整理，使用 GraphPad Prism 10.6.0 统计软件进行双因素重复测量方差分析（Two-way repeated-measures ANOVA），检验处理因素、时间因素及处理×时间交互作用的效果；当主效应或交互作用显著时，采用 Tukey 法进行事后多重比较。*P*<0.01 表示差异极显著，*P*<0.05 表示差异显著。试验数据以“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 过瘤胃氯化胆碱对奶牛产奶量的影响

由表 2 可知，产后 1~90 d，试验组和对对照组奶牛产奶量无显著差异（*P*>0.05）。产后 1~30 d，初产奶牛产奶量试验组比对照组降低 8.36%，经产二胎次与三胎次奶牛试验组产奶量相较于对照组略有提升，分别提升 5.72%、1.72%。产后 31~60 d，初产奶牛试验组日均产奶量较对照组低 2.70%，经产二胎次与三胎次奶牛试验组产奶量均高于对照组，相比对照组分别提升 5.06%、3.08%。产后 61~90 d，初产奶牛试验组日均产奶量高于对照组，经产二胎次试验组奶牛低于对照组，降低了 1.98%，经产三胎次奶牛试验组产奶量较对照组提升了 3.70%。

2.2 过瘤胃氯化胆碱对奶牛乳品质的影响

由表 3 可知，产后 10、40 和 70 d 试验组乳脂率、乳蛋白率和乳糖率与对照组相比均无显著差异（*P*>0.05），产后 10 d 试验组累计蛋白显著高于对照组（*P*<0.05）。试验组乳脂率产后 70 d 显著高于产后 10 d（*P*<0.05）；对照组和试验组累计蛋白含量均

显著升高 ($P<0.05$)。

表 2 产后不同阶段奶牛的日均产奶量分析

阶段/d	组别	不同胎次日均产奶量/kg		
		第一胎	第二胎	第三胎
1~30	对照	36.14±6.68	39.35±8.05	45.31±7.68
	试验	33.12±3.51	41.60±7.65	46.09±5.31
31~60	对照	43.66±4.37	49.43±10.83	54.55±10.44
	试验	42.48±2.74	51.93±6.32	56.23±5.12
61~90	对照	41.66±5.22	50.56±10.11	53.25±11.08
	试验	42.24±4.27	49.56±8.47	55.22±5.15

表 3 产后不同阶段奶牛的乳成分分析

指标	组别	产后 10 d	产后 40 d	产后 70 d
乳脂率/%	对照	4.39±0.91	4.74±1.08	5.26±0.81
	试验	4.36±0.97	5.21±1.41	5.66±1.38 [#]
乳蛋白率/%	对照	3.36±0.5	3.25±0.44	3.24±0.23
	试验	3.28±0.24	3.19±0.35	3.08±0.26
乳糖率/%	对照	5.15±0.15	5.16±0.21	5.16±0.14
	试验	5.14±0.17	5.23±0.16	5.22±0.10
累计蛋白/kg	对照	30.11±18.36	52.22±10.94 [#]	106.94±26.56 [#]
	试验	56.59±28.97 [*]	67.18±31.84 [#]	116.35±38.33 [#]

注：[#]表示与产后 10 d 比较，同行数据差异显著 ($P<0.05$)；^{*}表示与对照组比较，相同指标组间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

2.3 过瘤胃氯化胆碱对奶牛酮病的影响

如图 1 所示，在产前阶段，试验组奶牛血清的 BHBA 浓度显著高于对照组 ($P<0.01$)。至产后 7 d，试验组的 BHBA 水平下降，而对照组上升，两组基本持平 ($P=0.89$)。值得注意的是，对照组奶牛的血清 BHBA 水平在整个妊娠进程中持续上升 ($P>0.05$)，而试验组在产犊后呈现下降趋势 ($P>0.05$)。至产后 14 d 时，试验组的 BHBA 水平已低于对照组 ($P=0.46$)。

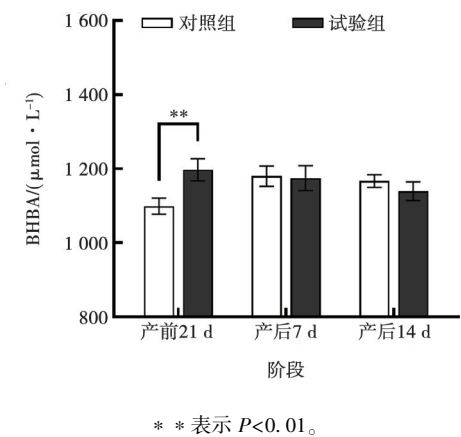


图 1 过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛 BHBA 水平的影响

与产前 21 d 相比，产后 7 d 试验组 BHBA 下降 1.9%，对照组上升 7.3%；产后 14 d 试验组下降 4.8%，对照组上升 6.2%。

2.4 过瘤胃氯化胆碱对奶牛血液生化指标的影响

由表 4 可知，两组奶牛血清 NEFA、VLDL 含量在产前 21 d、产后 7 d、产后 14 d，组间和组内均无显著差异 ($P>0.05$)，其中 NEFA 水平在产后 14 d 试验组比对照组下降 2.36%。血清 TG 含量组内比较显示，两组产后 7 d 较产前 21 d 均显著下降 ($P<0.05$)；组间比较中，试验组产后 14 d 血清 TG 含量显著低于对照组 ($P<0.05$)。两组血清 GLU 含量在产后 7 d、14 d 均较产前 21 d 显著降低 ($P<0.05$)，但各时间点组间差异不显著 ($P>0.05$)。试验组产前 21 d 血清 TP 含量显著高于对照组 ($P<0.05$)，产后 7 d、14 d 组间差异不显著 ($P>0.05$)；组内比较，两组产后 7 d、试验组产后 14 d 较产前 21 d 均显著下降 ($P<0.05$)。对照组血清 ALB 含量呈先下降后上升的趋势，产后 7 d 较产前 21 d 显著降低 ($P<0.05$)；试验组在产后 7 d 略微升高，组内无显著差异 ($P>0.05$)；试验组产后 7 d 血清 ALB 含量显著高

于对照组同期水平 ($P<0.05$)。两组血清 TB 含量在产后 7 d、14 d 均较产前 21 d 显著升高 ($P<0.05$)，但各时间点组间差异不显著 ($P>0.05$)。两组血清 HK、ACC 含量在各时间点均无显著组间及组内差异 ($P>0.05$)。

表 4 过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛血液生化指标的影响

指标	组别	产前 21 d	产后 7 d	产后 14 d
NEFA/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	128.05±7.06	129.98±12.71	129.40±8.02
	试验	127.69±8.93	127.05±11.30	126.35±10.34
TG/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	0.87±0.24	0.55±0.31 [#]	0.85±0.36
	试验	0.99±0.26	0.38±0.07 [#]	0.54±0.26 ^{*#}
VLDL/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	1 547.97±124.39	1 492.25±106.15	1 547.26±110.87
	试验	1 536.46±116.33	1 557.15±105.49	1 485.17±89.21
TP/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	76.29±10.75	59.53±5.70 [#]	71.72±4.49
	试验	81.56±8.70 [*]	62.01±4.70 [#]	73.92±6.85 [#]
TB/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	2.17±0.33	4.09±1.47 [#]	3.36±0.93 [#]
	试验	2.21±0.41	4.14±1.65 [#]	3.20±1.13 [#]
ALB/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	36.43±3.57	33.12±4.23 [#]	37.59±2.84
	试验	35.05±2.47	36.19±4.26 [*]	35.58±3.89
GLU/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	3.57±0.36	2.58±0.45 [#]	2.92±0.38 [#]
	试验	3.79±0.34	2.82±0.49 [#]	2.91±0.58 [#]
HK/ ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	401.88±31.64	405.45±25.01	405.50±29.05
	试验	402.27±36.51	408.33±34.68	404.44±17.03
ACC/ ($\text{pmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	1 408.53±86.33	1 413.60±102.09	1 422.24±101.40
	试验	1 445.94±90.13	1 438.90±111.86	1 434.28±92.03

注：#表示与产前 21 d 比较，同行数据差异显著 ($P<0.05$)。下同。

奶牛血清中 ALT、AST 和 ALP 的正常参考范围分别为 14~38、78~132 和 8.9~121 $\text{U} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据表 5 可知，除了产前 21 d 两组血清 ALT 含量高于正常参考范围外，其他时间点肝功能的三种酶指征均在正常范围之内。两组血清 AST 和 ALP 含量，组内和组间均无显著差异 ($P>0.05$)。两组血清 ALT 含量在产后 7 d、14 d 均较产前 21 d 显著降低 ($P<0.05$)，组间无显著差异 ($P>0.05$)，

表 5 过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛肝脏健康相关指标的影响

指标	组别	产前 21 d	产后 7 d	产后 14 d
ALT/ ($\text{U} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	44.37±7.80	25.56±3.60 [#]	26.74±4.03 [#]
	试验	44.02±9.02	25.79±3.75 [#]	25.24±5.10 [#]
AST/ ($\text{U} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	89.62±16.26	129.56±20.24	125.59±22.91
	试验	82.50±21.08	128.14±21.55	121.26±19.26
ALP/ ($\text{U} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	43.31±16.64	50.03±10.15	48.43±12.42
	试验	39.83±11.43	48.35±17.72	48.21±9.19

2.5 过瘤胃氯化胆碱对奶牛免疫调节因子的影响

如表 6 所示，血清抗炎因子 IL-10 水平在两组间各时间点均无显著差异 ($P>0.05$)，对照组产后 7 d 较产前 21 d 显著降低 ($P<0.05$)，试验组无此显著下降趋势。两组血清 IgM、IgG 含量在各时间点均无显著组间及组内差异 ($P>0.05$)。两组血清 T-AOC 水平均呈先下降后上升的趋势，在产后 7 d 较产前 21 d 均显著下降 ($P<0.05$)，但组间差异不显著 ($P>0.05$)。对照组产后 7 d 血清 MDA 水平较产前 21 d 显著升高 ($P<0.05$)，试验组无此显著升高趋

势。炎症与急性期反应指标方面，试验组产前 21 d 血清 TNF-α 水平显著低于对照组 ($P<0.05$)，产后 7 d 及 14 d 两组差异不显著 ($P>0.05$)。两组血清 CRP 水平在各时间点均无显著组间及组内差异 ($P>$

0.05)。外周血 WBC 方面，两组产后 14 d WBC 水平较产前 21 d 均显著升高 ($P<0.05$)，但各时间点组间差异不显著 ($P>0.05$)。

表 6 过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛血液免疫调节因子的影响

指标	组别	产前 21 d	产后 7 d	产后 14 d
IL-10/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	46.69±3.13	42.68±3.24 [#]	44.36±3.39
	试验	46.23±3.79	43.40±2.89	44.33±3.80
T-AOC/ ($\text{U} \cdot \text{mL}^{-1}$)	对照	2.21±0.61	1.68±0.27 [#]	2.08±0.43
	试验	2.17±0.52	1.68±0.38 [#]	2.09±0.30
WBC/ ($10^{-9} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	7.32±0.94	8.22±1.32	9.45±3.22 [#]
	试验	6.65±1.39	7.71±1.85	9.68±1.32 [#]
IgM/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	对照	120.27±9.50	119.43±8.77	120.92±10.14
	试验	120.13±9.96	119.72±8.81	121.99±6.29
IgG/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	对照	1 860.29±121.23	1 860.56±156.71	1 828.05±161.19
	试验	1 850.47±109.77	1 876.72±142.22	1 864.84±129.67
MDA/ ($\text{U} \cdot \text{mL}^{-1}$)	对照	2.23±0.27	2.67±0.41 [#]	2.37±0.50
	试验	2.26±0.26	2.55±0.36	2.47±0.43
TNF-α/ ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	302.97±21.93	291.91±19.32	287.38±24.53
	试验	286.24±21.97 [*]	295.17±21.53	287.39±23.06
CRP/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	对照	1 095.76±95.71	1 086.04±80.19	1 121.34±97.87
	试验	1 079.65±80.97	1 080.56±76.62	1 103.98±74.78

3 讨论

产奶量是衡量奶牛生产性能的重要指标之一。本研究发现，补充过瘤胃氯化胆碱对不同胎次、不同泌乳阶段的围产期奶牛产奶量的影响存在差异。具体而言，初产奶牛产后 1~30 d 产奶量低于对照，可能因过瘤胃氯化胆碱促进乳腺细胞分化而短暂抑制分泌活性。初产奶牛乳腺细胞增殖优先于分泌，类似“代谢重编程”，从而出现短暂的产奶量下降，后期可通过代谢适应实现补偿性增长^[9]。初产奶牛在产后 61~90 d，经产二胎次奶牛在产后 1~60 d，三胎次奶牛在整个产后 1~90 d 内，其日均产奶量均表现出不同程度的提升。这一结果与 Pinotti 等^[10]的研究一致。王广猛等^[11]亦报道，补充过瘤胃氯化胆碱后，奶牛在产后 15 d 和 30 d 的产奶量分别提高了 5.7% 和 1.6%。此外，李伟等^[7]、王西耀等^[8]以及 Elek 等^[12]的研究亦证实，日粮中添加适量过瘤胃氯化胆碱可缓解肝脏脂肪沉积、增强能量代谢效率、改善能量负平衡、调节乳腺细胞功能，从而促进乳汁合成，整体提升奶牛产奶性能，且高产奶牛品种因代谢压力更大，补充过瘤胃氯化胆碱的效益更显著。

乳品质是评价奶牛生产效益的重要方面，主要包括乳脂率、乳蛋白率、乳糖率和累计蛋白等指标。本试验结果显示，补充过瘤胃氯化胆碱后，奶牛乳脂率和累计蛋白均上升显著，乳蛋白率和乳糖率无显著差异，提示其对乳品质具有一定的改善作用。刘翔等^[13]研究发现，日粮中添加 30 g/ (头·d) 过瘤胃氯化胆碱可显著提高泌乳早期奶牛的乳脂率和乳蛋白率。本研究结果与 Janovick Guretzky 等^[14]、徐晓明等^[15]的报道基本一致，进一步支持了胆碱在乳腺生物合成调控及能量代谢稳态中的潜在作用。

血液中 BHBA 水平是评估奶牛酮病风险的重要生化指标。过瘤胃氯化胆碱通过优化脂质代谢途径，降低脂肪动员强度，并增强肝细胞对酮体的清除能力，从而有效缓解能量负平衡状态，降低酮病发生率^[16-18]。本研究中，产前 21 d 试验组奶牛 BHBA 水平高于对照组，说明产前脂肪动员增强与激素敏感脂肪酶 (HSL) 磷酸化水平升高相关，过瘤胃氯化胆碱可能通过激活腺苷酸活化蛋白激酶 (AMPK) 通路促进 HSL 活性，为分娩储备 NEFA，属代偿性适应。尽管两组奶牛 BHBA 水平均处于正常范围，但补充氯化胆碱的试验组在产后 7 d 和 14 d 的 BHBA 水平分别

较对照组降低了 0.44% 和 3.78%，提示其在预防亚临床酮病方面具有积极作用。该结果与徐晓明等^[15]、王凯文等^[19]的研究一致。

肝脏健康相关血液生化指标，如 NEFA、TG、VLDL、TP、TBIL、ALB、GLU 等，是评估奶牛代谢状态的重要依据。本研究中，试验组奶牛 NEFA 水平较对照组降低，提示其能量负平衡状态得到改善。该结果与王凯文等^[19]和谢磊^[20]的研究一致。此外，试验组 GLU 水平高于对照组，TG 水平显著降低，进一步表明过瘤胃氯化胆碱在调节糖脂代谢、缓解能量负平衡方面具有良好效果^[21-22]。Myers 等^[23]研究发现，产前添加过瘤胃氯化胆碱可使围产期牛血液磷脂酰胆碱浓度提高 18%，与本试验 VLDL 先升后降结果一致，过瘤胃氯化胆碱通过提供充足胆碱原料，经胆碱激酶和 CTP-磷酸胆碱胞苷转移酶催化生成磷脂酰胆碱（PC），PC 作为 VLDL 组装的结构核心，可增强载脂蛋白与微粒体 TG 转移蛋白的结合效率，促进 TG 与 PC 在粗面内质网组装为 VLDL 前体并分泌入血，同时通过激活过氧化物酶体增殖物激活受体 α -肝 X 受体 α （PPAR α -LXR α ）通路和 AMPK 信号，调节相关蛋白表达与活性，加速 VLDL 外周代谢清除，实现肝脏 TG 有效输出，缓解围产期奶牛肝脂沉积风险。

在肝功能酶类指标方面，本研究未发现对照组与试验组在 ALT、AST 及 ALP 活性方面存在显著差异，除产前 21 d ALT 略高外，其他时间点的各项指标均处于正常范围。产前 21 d ALT 略高，可能与围产期奶牛自身的生理变化有关。产前奶牛处于能量负平衡状态，肝脏代谢活跃，可能会出现短暂的肝细胞应激，导致 ALT 轻微升高。随着产后过瘤胃氯化胆碱的持续作用以及奶牛自身的适应调节，ALT 逐渐恢复正常。这与马晨等^[24]的研究结果略有不同，可能是由于不同剂量的过瘤胃氯化胆碱对肝脏的作用强度和时效不同。较低或较高的剂量可能会对肝脏代谢产生不同影响，进而反映在酶学指标上。同时，试验周期的长短也可能影响结果，较短的试验周期可能还未使酶学指标出现显著变化。

免疫调节方面，本研究检测了 WBC、IL-10、CRP、IgG、IgM、TNF- α 、T-AOC 及 MDA 等指标。在本研究中，两组奶牛的 WBC 均显著上升，且试验组产后 14 d 上升达 45.56%。IgG、IgM 水平未达显著，但产后 14 d 试验组分别提高 1.4% 与 1.7%，且结合 T-AOC 维持在更高水平，TNF- α 水平亦略有升高，说明分娩应激导致皮质醇升高，并通过糖皮质激素受体（GR）抑制核因子 κ B（NF- κ B）活性。试验组能量负平衡缓解（如 GLU 水平稳定）可能降低

皮质醇受体敏感性，解除对骨髓造血干细胞的增殖抑制，促进中性粒细胞、淋巴细胞释放，同时通过胆碱抑制 11 β -羟类固醇脱氢酶 1 型（11 β -HSD1）（皮质醇活化酶）活性，减少局部组织炎症损伤。过瘤胃氯化胆碱通过代谢改善-抗氧化-免疫信号协同，在分子层面实现免疫细胞增殖、功能激活与炎症平衡的动态调控，最终表现为 WBC 升高及体液免疫正向趋势，这与一些报道研究结果一致^[25-27]。本研究仅通过血清指标评估氧化应激，无法直接证明肝脏脂肪蓄积减少。肝脏组织抗氧化酶（超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶）的变化需后续肝脏活检验证，下一步将同步开展瘤胃瘘管试验，检测微生物群落，验证肝脏代谢及瘤胃发酵直接机制。

4 结论

围产期奶牛日粮中添加 50 g/（头·d）的过瘤胃氯化胆碱，能够缓解能量负平衡状态，降低酮病和脂肪肝等代谢性疾病的发生风险，同时在一定程度上提升奶牛的生产性能和乳品质，对保障奶牛健康和提高养殖效益具有积极意义。

参考文献：

- [1] 国家统计局. 2025 年经济发展向新向优预期目标圆满实现[EB/OL]. (2026-01-19) [2026-06-13]. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202601/t20260119_1962330.html.
- [2] 夏科, 徐作明, 郝伟斌, 等. 奶牛脂肪肝研究进展 [J]. 中国乳业, 2008 (8): 76-78.
- [3] SHI K, LI R, XU Z, et al. Identification of crucial genetic factors, such as PPAR γ , that regulate the pathogenesis of fatty liver disease in dairy cows is imperative for the sustainable development of dairy industry [J]. Animals, 2020, 10 (4): 639.
- [4] PINOTTI L, BALDI A, DELL'ORTO V. Comparative mammalian choline metabolism with emphasis on the high-yielding dairy cow [J]. Nutr Res Rev, 2002, 15 (2): 315-332.
- [5] SHARMA B K, ERDMAN R A. *In vitro* degradation of choline from selected foodstuffs and choline supplements 1, 2 [J]. J Dairy Sci, 1989, 72 (10): 2772-2776.
- [6] COOKE R F, DEL RÍO N S, CARAVIELLO D Z, et al. Supplemental choline for prevention and alleviation of fatty liver in dairy cattle [J]. J Dairy Sci, 2007, 90 (5): 2413-2418.
- [7] 李伟, 袁鹏, 王法明, 等. 过瘤胃氯化胆碱对泌乳后期奶牛生产性能的影响 [J]. 中国奶牛, 2023 (9): 10-14.
- [8] 王西耀, 韩增霞, 林清香. 不同剂量过瘤胃氯化胆碱对围产期奶牛生产性能及血液生化指标的影响研究 [J]. 中国乳业, 2024 (6): 25-30.
- [9] CONTRERAS G A, STRIEDER - BARBOZA C, RAPHAEL W. Adipose tissue lipolysis and remodeling during the transition period of dairy cows [J]. J Anim Sci Biotechnol, 2017, 8: 41.
- [10] PINOTTI L, CAMPAGNOLI A, DELL'ORTO V, et al. Choline:

is there a need in the lactating dairy cow? [J]. *Livest Prod Sci*, 2005, 98 (1/2): 149-152.

[11] 王广猛, 王剑飞, 冯春燕. 过瘤胃氯化胆碱对奶牛生产性能及脂肪代谢的影响 [J]. *中国奶牛*, 2016 (10): 9-12.

[12] ELEK P, NEWBOLD J R, GAAL T, et al. Effects of rumen-protected choline supplementation on milk production and choline supply of periparturient dairy cows [J]. *Animal*, 2008, 2 (11): 1595-1601.

[13] 刘翔, 曲永利, 刘立成, 等. 过瘤胃胆碱对围产期奶牛生产性能及脂肪代谢的影响 [J]. *动物营养学报*, 2014, 26 (3): 675-682.

[14] JANOVIK GURETZKY N A, CARLSON D B, GARRETT J E, et al. Lipid metabolite profiles and milk production for Holstein and Jersey cows fed rumen-protected choline during the periparturient period [J]. *J Dairy Sci*, 2006, 89 (1): 188-200.

[15] 徐晓明, 徐国忠, 范占炼, 等. 过瘤胃氯化胆碱对奶牛生产性能的影响 [J]. *乳业科学与技术*, 2010, 33 (6): 284-286.

[16] 丁宝隆, 伏东宝, 赵洪喜. 酮病奶牛血清脂代谢和肝功能相关指标的变化 [J]. *中国兽医杂志*, 2024, 60 (6): 80-85.

[17] 孔凡林, 魏勇, 王蔚, 等. 酮病奶牛糖、脂代谢变化规律及营养调控研究进展 [J]. *动物营养学报*, 2023, 35 (4): 2041-2052.

[18] 刘潇怡, 王迪铭, 孙会增, 等. 泌乳高峰期奶牛肝脂肪变性影响生产性能的代谢机制 [J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2024, 50 (5): 805-816.

[19] 王凯文, 赖碧雄, 刘肃然, 等. 不同瘤胃保护性胆碱对围产后期奶牛酮病发病率和血液代谢指标的影响 [J]. *中国奶牛*, 2024 (2): 1-6.

[20] 谢磊. 奶牛不同生理阶段和 NEFA 对中性粒细胞胞外诱捕网形成的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

[21] 赵娜, 李会菊, 刘敏, 等. 过瘤胃胆碱在奶牛围产期的代谢调节作用 [J]. *现代畜牧科技*, 2023 (1): 22-24.

[22] 李红宇, 王德香, 黄萌, 等. 过瘤胃胆碱调控围产期奶牛营养平衡和机体健康研究进展 [J]. *中国畜牧杂志*, 2022, 58 (9): 87-92.

[23] MYERS W A, ZENOBI M G, REYES D C, et al. Feeding rumen-protected choline to prepartum Holstein cows in negative energy balance increases circulating lipoprotein phosphatidylcholine and triglyceride concentrations [J]. *JDS Commun*, 2025, 6 (3): 304-308.

[24] 马晨, 徐凌峰, 郝伟斌. 围产期饲喂过瘤胃胆碱对奶牛生产性能及血液生化指标的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2018, 54 (4): 66-71.

[25] 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.

[26] SALAM KARIM Y, HACHIM S K, ABDUL ALI A, et al. The influence of rumen-protected choline and α -tocopherol supplementation on early lactating dairy cows metabolism [J]. *Arch Razi Inst*, 2022, 77 (3): 1165-1171.

[27] 许贵宝. 饲料中添加过瘤胃保护胆碱对奶牛泌乳性能、血清生化及免疫指标的影响 [J]. *特产研究*, 2025, 47 (3): 39-43.