

基于精准营养的奶牛产后低血钙症补钙策略及博威钙应用

王礲礲¹, 赵永峰², 王耀武³, 杨旭⁴, 韩萌¹, 田园¹, 王晶¹, 王煜东^{5*}

[1.中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081; 2.利津县动物疫病预防控制中心, 山东利津 257400; 3.河北省张家口市万全区农业农村局, 河北张家口 076250; 4.勃林格殷格翰动物保健(上海)有限公司, 上海 200040; 5.北京信立强劳务服务有限责任公司, 北京 100010]

摘要: 奶牛产后低血钙症是严重危害围产期奶牛健康与生产性能的关键代谢性疾病, 其有效防控对奶牛养殖业至关重要。传统群体性补钙策略存在精准度不足、资源浪费及潜在代谢风险等问题。随着精准营养理念的发展, 针对个体奶牛生理状态的精准补钙策略成为当前研究热点。本文系统综述了产后低血钙症的危害、传统与新兴补钙方法, 并重点探讨了基于行为监测(如采食与反刍时间)等指标的个体化精准补钙策略。同时, 结合博威钙等口服钙剂的应用理念, 分析其对改善奶牛钙代谢稳态、维护子宫健康及提升后续生产性能的潜在影响。本文旨在为优化奶牛围产期钙代谢管理、推动精准营养干预实践提供理论依据与参考。

关键词: 奶牛; 低血钙症; 精准营养; 补钙策略; 博威钙; 采食反刍时间; 代谢状态

文章编号: 1671-4393 (2026) 05-0055-08 DOI:10.12377/1671-4393.26.05.09

Calcium Supplementation Strategies for Postpartum Hypocalcemia in Dairy Cows Based on Precision Nutrition and the Application of Bovikal

WANG Mengmeng¹, ZHAO Yongfeng², WANG Yaowu³, YANG Xu⁴, HAN Meng¹,
TIAN Yuan¹, WANG Jing¹, WANG Yudong^{5*}

[1.Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2.Lijin County Animal Disease Prevention and Control Center, Lijin Shandong 257400; 3.Wanquan District Agriculture and Rural Bureau, ZhangjiakouHebei 076250; 4.Boehringer Ingelheim Animal Health (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200040; 5.Beijing Xinliqiang Labor Service Co., Ltd., Beijing 100010]

作者简介: 王礲礲(1982-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副研究员, 研究方向为畜牧养殖和奶业经济;
赵永峰(1977-), 男, 山东省利津县, 本科, 高级兽医师, 研究方向为畜牧兽医;
王耀武(1980-), 男, 河北张家口人, 本科, 研究方向为畜牧兽医;
杨旭(1988-), 男, 山东济南人, 硕士, 研究方向为兽医产科学;
韩萌(1993-), 女, 北京人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为畜牧业生产与奶业经济;
田园(1991-), 女, 北京人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为奶业产业;
王晶(1984-), 女, 内蒙古满洲里人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为动物医学、奶业市场分析。

通信作者: 王煜东(1988-), 女, 江西九江人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为期刊编辑、奶业市场分析。

Abstract: Postpartum hypocalcemia in dairy cows is a critical metabolic disorder that severely threatens the health and productivity of transition dairy cows, and its effective prevention and control are of paramount importance to the dairy industry. Traditional herd-based calcium supplementation strategies suffer from issues such as insufficient precision, resource wastage, and potential metabolic risks. With the advancement of the concept of precision nutrition, precision calcium supplementation strategies tailored to the physiological status of individual cows have become a current research focus. This paper systematically reviewed the hazards of postpartum hypocalcemia, traditional and emerging calcium supplementation methods, and specifically discussed individualized precision calcium supplementation strategies based on indicators such as behavioral monitoring (e.g., feeding and rumination time). Furthermore, in conjunction with the application concept of oral calcium supplements like Bovikalc, this paper analyzed their potential effects on improving calcium metabolic homeostasis, maintaining uterine health, and enhancing subsequent production performance in dairy cows. This review aimed to provide a theoretical basis and reference for optimizing calcium metabolism management during the transition period and promoting the practice of precision nutritional interventions in dairy cows.

Keywords: dairy cows; hypocalcemia; precision nutrition; calcium supplementation strategies; Bovikalc; feeding and rumination time; metabolic status

奶牛围产期，特别是产后初期，是能量负平衡和钙代谢紊乱的高发阶段。产后低血钙症不仅直接导致产乳热，还会引发一系列继发性健康问题，如子宫炎、酮病、真胃移位等，严重影响奶牛福利、生产性能和牧场经济效益。研究表明，临床型产乳热发生在血清钙离子浓度降至1.50 mM以下时，若不及时干预，可导致昏迷甚至死亡；而亚临床低血钙症（血钙浓度介于1.50~2.12 mM之间）在经产奶牛中的发生率可高达约50%，其间接经济损失同样巨大^[1]。传统的预防性补钙方法，如产前低钙日粮或产后群体性口服/静脉补钙，虽有一定效果，但未能充分考虑个体差异，可能导致部分奶牛补钙不足或过度。随着精准畜牧业和传感器技术的发展，通过实时监测奶牛个体行为（如采食、反刍活动）来识别代谢风险牛只，并实施靶向干预，成为优化营养管理的新方向；同时，新兴的检测技术也为精准识别提供了可能。本文将围绕精准补钙这一核心，系统阐述相关方法和效果评估及博威钙的用途。

1 奶牛产后低血钙症的病理生理学基础与危害

1.1 围产期钙代谢的动态平衡与挑战

奶牛在围产期经历剧烈的钙代谢转变，泌乳启

动时大量钙随初乳流失，对血钙稳态构成严峻挑战。其每日钙需求可从干奶期的较低水平骤增至产犊后的30~50 g，这一急剧变化要求机体迅速启动适应性调节机制^[2]。机体主要通过增加肠道钙吸收和动员骨骼钙库来应对这一需求，然而，初产牛和高产牛的这种适应性调节能力往往存在延迟或不足，导致产后血钙浓度急剧下降，引发低血钙症^[3]。这一过程的核心调控涉及甲状旁腺激素（PTH）和活性维生素D等关键激素。PTH在低血钙刺激下分泌增加，旨在促进骨钙释放和肾脏钙重吸收，并刺激肾脏合成活性维生素D，后者则主要增强肠道对钙的吸收。但在围产期奶牛，尤其是存在代谢紊乱的个体中，这些激素的分泌节律、靶器官（如骨骼、肠道和肾脏）的敏感性可能发生改变，从而直接影响血钙的恢复能力。研究表明，代谢紊乱可能在临床型低血钙症（产乳热）发生前数周就已出现，并持续至产后，凸显了围产期钙稳态调节的复杂性和预适应的重要性^[2]。因此，理解围产期钙代谢的动态平衡与面临的挑战，是制定有效预防和干预策略的基础。

1.2 低血钙症的临床与亚临床危害

低血钙症对奶牛健康和生产性能构成显著威胁，其危害根据血钙下降程度可分为临床型和亚临床型。临床型低血钙症，即产乳热，表现为明显的

肌肉无力、卧地不起，严重时可导致死亡，在牛群中的发病率为3%~10%^[2]。然而，更具普遍性和隐匿性危害的是亚临床低血钙症，其血钙浓度通常介于1.4~2.0 mmol/L（或5.6~8.0 mg/dL）之间，发病率可高达25%~50%，甚至更高^[3, 4]。亚临床低血钙症虽无典型临床症状，但其危害深远，会损害平滑肌和骨骼肌的正常功能，导致瘤胃蠕动减弱、采食量下降，以及子宫收缩无力^[5]。这些功能障碍进而显著增加其他围产期疾病的发生风险，包括真胃移位、胎衣不下、子宫炎和酮病等。研究证实，产犊时低血钙浓度与细胞学子宫内膜炎的发生显著相关^[6]。更重要的是，亚临床低血钙对繁殖效率和产奶量造成长期负面影响。血钙水平较低的奶牛，其产后首次发情间隔和情期间隔显著延长，受孕风险降低，最终导致空怀期延长；低血钙奶牛的产奶量也显著低于血钙正常的同伴，并且牛奶体细胞计数升高，提示亚临床乳腺炎风险增加^[4, 7]。因此，亚临床低血钙症不仅是一个独立的代谢问题，更是引发一系列连锁健康事件、降低牧场经济效益的关键风险因素。

2 传统与新兴奶牛补钙方法评述

2.1 产前预防策略：低钙日粮与阴离子盐

产前预防策略的重点在于通过营养调控，在奶牛分娩前预先激活其钙稳态调节机制，以应对产后泌乳启动时急剧增加的钙需求。产前低钙日粮策略旨在通过限制干奶后期日粮中的钙供应，刺激PTH的分泌，使机体在产犊前进入一种“预激活”状态，从而在产后能更迅速地动员骨钙储备^[8]。研究表明，在产前最后4周限制日粮磷的供应，同样可以改善奶牛产后的钙稳态，这主要是通过增加骨组织动员来实现的^[9]。然而，单纯的低钙日粮策略需要精确的配方管理，以确保既达到刺激效果，又不影响奶牛的基本营养需求。

另一种广泛应用且更为有效的策略是饲喂阴离子盐，如氯化铵、硫酸镁等，以诱导奶牛产生轻度代偿性代谢性酸中毒。这种酸中毒状态能够提高组织对PTH的敏感性，并促进骨钙的释放，从而有效

预防临床和亚临床低血钙症的发生^[10]。研究表明，饲喂负阴阳离子差（DCAD）日粮的奶牛，其产后血钙浓度显著高于饲喂正DCAD日粮的对照组，并且能降低亚临床低血钙症的患病率^[11, 12]。

但以上两种方法均需要精细的日粮配方和严格的饲喂管理。过度使用阴离子盐可能影响日粮的适口性，导致干物质采食量下降，进而引发其他代谢问题^[13]。因此，监测尿液pH值（通常目标范围为5.5~6.5）是评估酸化程度和避免过度酸化的关键手段。综合来看，产前低钙日粮与阴离子盐饲喂是预防奶牛产后低血钙症的有效营养策略，但其成功实施依赖于精准的个体化农场管理方案。

2.2 产后干预策略：静脉注射、皮下注射与口服补钙

产后干预策略旨在奶牛经历血钙最低点时，通过外源性补充快速纠正低血钙状态，其方法主要包括静脉注射、皮下注射和口服补钙，各具特点与适用场景。静脉注射钙剂（如葡萄糖酸钙）是治疗临床产乳热病例最快速有效的方法，能够迅速提升血钙浓度，恢复神经肌肉功能^[14]。但静脉注射操作专业要求高，且存在心脏毒性等风险，因此不适合作为常规预防手段。皮下注射钙剂的安全性高于静脉注射，但其吸收速度较慢，且可能引起注射部位的局部组织炎症甚至坏死。相比之下，口服补钙因其操作简便、安全性高，已成为产后预防亚临床低血钙症的主流方法。

口服补钙的核心在于在血钙最低点（通常为产后12~24 h）为奶牛提供易于吸收的钙源，以平稳渡过钙负平衡危机。常见的口服补钙剂型包括钙灌服剂和钙丸。研究显示，在产后立即口服钙丸，可以有效提升产后24 h内的平均血钙浓度^[15]。但需要注意的是，传统的在产后0 h和24 h“一刀切”式补钙方案对生产性能的提升效果有限^[16]。新兴观点认为，低血钙的类型（短暂性、持续性或延迟性）不同，其影响也不同，短暂性低血钙可能是高产奶牛适应泌乳的正常生理现象，而产后数日出现的持续性低血钙则与疾病和产奶量下降相关^[17]。因此，补钙时机可能需要更加精准。有研究尝试将口服补钙延迟

至产后48 h和72 h,发现对特定胎次(如第三胎)奶牛的产奶量有积极影响^[16]。此外,口服补钙也可与静脉注射联合使用,以在治疗临床病例的同时提供更持久的钙支持^[15]。

3 精准营养理念下的个体化补钙策略

3.1 精准补钙的必要性与识别指标

传统的奶牛产后补钙策略往往采取群体性“一刀切”的方式,即对所有经产牛或特定胎次的牛只进行统一干预,但这种做法忽略了奶牛个体在泌乳潜力、体况、代谢适应能力等方面的显著差异,可能导致对低风险牛只的过度干预和对高风险牛只的干预不足^[18]。例如,一项针对高产奶牛的研究发现,产后口服甲酸钠钙的普遍性预防措施并未能有效提升血清钙水平,也未降低亚临床低血钙症的发生率,表明不加区分的补钙策略可能造成资源浪费且效果有限^[19]。因此,从群体管理转向个体化管理,实施精准补钙,对于优化资源分配、提升干预效率、保障奶牛健康和生产性能至关重要。

实现精准补钙的关键在于建立可靠的高风险个体识别指标体系。传统指标主要包括胎次、产奶量历史以及既往疾病史等。大量研究表明,经产牛,尤其是高胎次奶牛,由于钙动员能力下降,其产后低血钙症的风险显著高于头胎牛^[19]。此外,体况评分(BCS)也是一个重要的参考因素,对于体况过肥(BCS>3.50)的奶牛,产后补充钙剂或维生素D类似物能显著降低胎盘滞留、子宫炎等疾病的发生率,而对体况正常的奶牛则益处有限,这进一步强调了基于个体特征进行靶向干预的必要性^[18]。

最新的研究趋势聚焦于利用自动化监测技术获取的实时生理与行为数据,作为更动态、更早期的风险预警信号。例如,产前或产后早期的血钙浓度是直接的诊断指标,而便携式离子钙检测仪的出现使得在牧场现场快速、准确地评估血钙状态成为可能^[20]。除了直接的生化指标,行为变化,特别是采食与反刍行为的异常,被认为是反映奶牛代谢压力的敏感指标。研究表明,临床低血钙症奶牛在产犊

当天活动量减少,躺卧时间显著延长^[21]。更重要的是,采食和反刍时间的减少与低血钙症的发生密切相关。一项研究明确指出,产后第1天的反刍时间与血浆钙浓度高度相关,临床低血钙奶牛的日反刍时间远低于正常奶牛^[22]。这些通过颈圈式传感器等设备连续监测的行为数据,为实现实时、动态的风险个体识别和精准补钙干预提供了坚实的技术基础。

3.2 基于采食与反刍时间(CRET)监测的靶向补钙

采食和反刍时间(CRET)是反映奶牛整体健康状况和代谢压力的核心行为指标。产后低血钙症由于导致神经肌肉功能紊乱,常引发奶牛肌无力、食欲不振,进而使其CRET显著降低。研究证实,低血钙会直接干扰反刍这一复杂的神经肌肉活动过程。在围产期,临床低血钙奶牛的日反刍时间在产犊后数天内都维持在极低水平,即使在静脉补钙治疗后,其反刍功能的恢复也相对缓慢^[22]。这种CRET的下降不仅是一个临床症状,更是一个早期预警信号,因为它通常发生在其他更严重的临床表现(如卧地不起)之前,为早期干预提供了宝贵的时间窗口。

远程传感器技术,特别是颈圈式或腿部佩戴的监测器,为实现基于CRET的靶向补钙提供了技术可行性。这些设备可以连续、自动、无干扰地记录每头牛的采食、反刍、活动量和躺卧时间等行为数据^[23]。研究表明,通过设定特定的行为阈值,可以有效识别高风险个体。例如,有研究发现,产后第一天CRET低于489 min/天的奶牛,其血钙浓度显著低于CRET正常的奶牛^[22]。另一项研究通过监测产前躺卧时间及其变异系数,发现这些行为指标与产前非酯化脂肪酸浓度及产后死胎风险相关,间接印证了行为监测在评估围产期代谢风险方面的价值^[24]。这些自动化系统能够实时将异常行为数据反馈给管理者,使得对高风险个体的识别从“事后诊断”转变为“事前预警”。

这种基于CRET等行为指标的识别方法,使得补钙干预能够精确地瞄准那些已经表现出代谢压力行为信号的个体,从而实现资源的最优配置和干预的

时效性。它避免了传统“一刀切”策略中对低风险牛只的无效补钙，将有限的资源（如快速溶解的氯化钙丸剂）集中用于最需要的牛只^[25]。例如，当系统监测到某头经产牛产后CRET急剧下降时，可立即触发对该牛只的口服钙剂干预，从而在低血钙症加剧或引发继发性疾病（如胎衣不下、子宫炎）之前进行纠正^[6]。这种动态、精准的管理模式，不仅提高了钙补充的效率，降低了治疗成本，更重要的是通过及时维持钙稳态，保障了奶牛的健康、福利及后续的生产繁殖性能，代表了奶牛产后代谢病管理的发展方向。

4 博威钙（Bovicalc）的应用理念与效果分析

4.1 博威钙的产品特性与应用方案

博威钙作为一种口服缓释钙丸，其核心设计理念在于通过不同溶解特性的钙盐组合，实现对奶牛产后血钙水平的快速提升与持续维持。其主要成分为氯化钙和硫酸钙，每丸可提供约43 g元素钙^[25]。这种配比具有明确的药代动力学优势：氯化钙溶解迅速，能在短时间内被吸收，从而快速提升血钙浓度，应对产后急性钙需求；而硫酸钙则溶解缓慢，可在消化道内持续释放钙离子，为机体提供长效的钙源支持。这种“快速+持续”的供钙模式，旨在精准覆盖产后最初几天血钙最不稳定、钙负平衡最为严重的关键时期，帮助奶牛平稳度过生理挑战。其标准应用方案通常针对识别出的高风险奶牛，例如刚产犊的经产牛，或通过现代监测技术（如结合反刍与采食时间的CRET监测）识别出的代谢紊乱牛只。方案建议在产后连续3天，每天口服1丸^[26]。这一为期3天的干预策略，是基于产后血钙动态变化规律制定的，力求在机体自身钙稳态调节机制完全恢复前，提供外源性钙补充，以预防临床或亚临床低血钙症的发生及其后续连锁反应。研究表明，含有氯化钙和硫酸钙的钙丸在瘤胃内的溶解速度较快，能在较短时间内（如90 min内）释放有效成分，这为其快速起效提供了物理基础^[25]。因此，博威钙的产

品特性和标准化应用方案，共同构成了一个基于精准识别和时序干预的产后低血钙症管理策略。

4.2 对奶牛代谢状态的影响

对通过CRET降低识别出的高风险奶牛补充博威钙的实证研究，揭示了这种干预策略对代谢状态的复杂影响。一项研究显示，在产后第1天，补钙组奶牛的血钙浓度与未补钙的对照组相似，均处于较低水平，这证实了基于CRET降低的识别方法是准确的，目标牛群确实处于低血钙状态^[26]。然而，单次或首日补钙并未能在群体水平上立即逆转已存在的低血钙，表明对于已发生显著钙负平衡的个体，单点干预的即时效果有限。在后续的监测时间点（如产后第3、5、12天），补钙组、未补钙对照组以及CRET正常的对照组之间的血钙浓度均未显示出统计学差异^[26]。这一现象可能提示，在产后几天内，奶牛自身的钙调节机制（如PTH和活性维生素D的动员）逐渐发挥主导作用，使得所有组别的血钙水平趋于恢复稳态；也可能意味着，对于这部分牛群，单纯的钙补充在纠正血钙浓度方面，与不干预相比并未产生持续的额外优势。

一个更值得关注的发现是能量代谢指标的变化。研究发现，补钙组奶牛在产后第3天和第5天的血清 β -羟基丁酸（BHB）浓度反而最高，并且在产后第12天的游离脂肪酸（FA）浓度也较高^[26]。BHB和FA是反映能量负平衡和脂肪动员的关键指标。这一结果可能提示，对于这部分已经出现代谢紊乱（表现为CRET降低）的奶牛，单纯的钙补充不足以全面纠正其深层的能量负平衡状态。钙离子在细胞信号传导中扮演重要角色，可能通过影响脂类代谢相关酶的活性或激素分泌，与能量代谢产生复杂的交互作用^[27]。另一种解释是，CRET降低本身是奶牛面临多重代谢挑战（包括但不限于低血钙）的一个综合标志，这些牛只可能同时存在严重的能量摄入不足。因此，尽管补钙可能对血钙有一定支持作用，但若未能同步解决能量短缺问题，其高脂肪动员和酮体生成的状态仍将持续甚至被凸显。这强调了在产后管理中，需要将钙代谢与能量代谢统筹考

考虑，进行综合干预。

4.3 对奶牛健康与生产性能的影响

现有关于博威钙对奶牛健康与生产性能影响的研究数据呈现出复杂的结果。在繁殖健康方面，针对CRET降低奶牛使用博威钙进行补钙，并未能显著降低子宫炎的发病率，也未对后续的繁殖性能（如妊娠率）产生明显的积极影响^[26]。这表明，对于已发生代谢紊乱的个体，产后补钙作为一种单一措施，可能不足以有效预防或改善由免疫抑制和炎症反应引发的繁殖道疾病。子宫健康受到能量平衡、炎症状态和矿物质代谢等多重因素影响，单纯的钙干预可能无法触及核心病理环节^[6]。

然而，一个具有重要警示意义的发现是，未接受钙补充的CRET降低组奶牛，其在产后30天内的存活率显著低于CRET正常的奶牛^[26]。这一结果强烈暗示，CRET降低本身是奶牛产后高风险的一个强有力的标志，与短期生存结局不良密切相关。低血钙会损害神经肌肉功能，影响采食和运动，并可能加剧其他疾病的发生，从而威胁奶牛生命^[22]。虽然该研究未显示补钙组与未补钙组在存活率上有统计学差异，但未补钙组的高淘汰/死亡率凸显了对此类高风险牛群进行干预的必要性。是否补钙可能与其他关键管理因素（如疼痛管理、能量补充、抗炎治疗等）共同作用，影响其生存结局。

在生产性能方面，关于口服钙补充剂的效果研究结论不一。有研究显示，对经产娟姗牛及其杂交牛进行产后口服钙补充，总体上并未影响其产奶量、乳成分或繁殖指标^[28]。然而，效果可能取决于个体因素，例如，对于干奶期较长的奶牛，补钙可能带来产奶量的提升。此外，低血钙状态本身与生产性能相关，有研究发现产后血钙浓度较低的娟姗牛，其产奶量反而更高，但同时也伴随着体细胞评分升高和繁殖性能下降的风险^[7]。因此，博威钙的应用效果可能高度依赖于干预对象的精准选择（不仅仅是基于CRET，或许还需结合胎次、体况、既往病史等），以及是否与其他产后管理措施（如针对能量负平衡的丙酸钙补充、针对炎症的抗炎处理等）

形成协同方案。综合来看，博威钙作为精准营养策略的一部分，其价值在于对高风险个体的识别和早期支持，但其最终的健康与生产效益，需要在更全面的围产期管理框架内进行评估和优化。

5 奶牛补钙管理的未来展望与综合建议

5.1 多维度数据驱动精准决策

未来的精准补钙决策正朝着整合多源数据的方向发展，以超越对单一指标的依赖。传统的风险预测主要依据胎次或产前尿液pH值（如CRET）等有限信息，但产后低血钙症的发生是多种因素共同作用的结果。因此，构建一个多维度的数据驱动决策体系至关重要。这包括整合奶牛的基因组信息，以识别与钙代谢相关的遗传易感性；实施连续的体况评分系统，动态监控围产期能量储备的变化；利用可穿戴生物传感器等技术进行实时血液代谢物（如钙离子、BHB）的监测，实现从“事后治疗”到“事前预警”的转变^[29]。此外，产后乳成分的快速分析（如乳脂、乳蛋白比例）也能间接反映机体的能量平衡与代谢状态，为评估补钙效果和调整策略提供即时反馈。在此基础上，利用机器学习算法对上述海量、异构的数据进行深度挖掘与分析，可以构建出个体化的风险预测模型。这类模型能够更早、更准确地识别出发生产后低血钙症及其继发疾病（如胎衣不下、酮病、子宫炎）的高风险牛只，从而为实施预防性、靶向性的口服钙剂干预提供精准依据，实现从群体化管理到个体化精准营养的跨越。

5.2 从“补钙”到“综合代谢管理”

现代奶牛围产期营养管理理念已深刻认识到，低血钙症很少孤立发生，它常与能量负平衡及其导致的酮病紧密交织、相互恶化。因此，未来的干预策略必须从单纯的钙补充，升级为针对围产期奶牛的综合代谢管理方案。单纯的补钙可能无法解决由能量负平衡引发的整体代谢紊乱和免疫抑制问题。干奶期长短不仅影响产奶量，也与产后健康密切相关，过短或过长的干奶期都可能增加淘汰风险，这

提示围产期的整体管理至关重要。对于通过多维度风险评估识别出的高风险牛只，干预措施应具有协同性。例如，在口服补钙的同时，联合使用丙二醇等生糖前体物质，以改善能量状况，减少酮体生成，从而打破低血钙与酮病之间的恶性循环。此外，考虑到产后炎症反应会加剧钙的负平衡和代谢应激，适时使用非甾体抗炎药可能有助于改善奶牛的整体状态。同时，通过添加诱食剂、改善日粮适口性等措施，确保奶牛在围产后期的干物质摄入量，是支持所有代谢调整的基础。这种“钙补充+能量调控+炎症管理+营养支持”的综合策略，旨在协同改善奶牛的整体代谢健康和抗病力，从根本上降低产后各类代谢性疾病的发生率。

5.3 产品与理念革新

在精准营养理念的推动下，口服钙剂的产品研发也需不断创新，以提升补钙效率和整体效益。未来的研发可探索不同钙盐（如氯化钙、丙酸钙、硫酸钙）的优化组合比例，以平衡钙的利用效率、适口性及对瘤胃环境的影响。添加维生素D及其活性代谢物（如25-羟维生素D、1, 25-二羟维生素D）是另一个重要方向，旨在通过增强肠道对钙的吸收和骨骼钙的动员，从生理上改善钙的调节能力。此外，结合益生菌、益生元等添加剂以改善肠道健康和吸收功能，也可能间接提升钙的利用效率。未来需要在此基础上实现更精细化的风险分层。例如，结合前述的多维度数据，将奶牛划分为不同风险等级（如极高危、高危、中危、低危），并为每个等级制定差异化的干预方案（包括钙剂类型、剂量、补充时机和是否联合其他代谢调节剂）。同时，效果评估指标也应从单一的“临床低血钙发病率”，扩展到包括亚临床低血钙症发生率、产后疾病（如子宫炎、乳房炎）发病率、泌乳性能、繁殖表现以及最终的经济回报等更全面的维度。通过严格的田间试验和经济学分析，才能明确这种精准靶向干预在何种具体牧场情景（如不同牛群结构、管理水平、饲料资源）下能带来最大的投资回报，从而推动该理念的广泛应用与持续优化^[5]。

参考文献

- [1] Soleimani A, Amirghasemi F, Al-Shami A, et al. Towards sustainable and humane dairy farming: A low-cost electrochemical sensor for on-site diagnosis of milk fever[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, 259: 116321.
- [2] Zwierzchowski G, Zhang G, Tobolski D, et al. Metabolomic fingerprinting of milk fever cows: Pre- and postpartum metabolite alterations[J]. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 2024, 38 (6): 3384-3397.
- [3] Seminara J A, Callero K R, An S, et al. Predicting dyscalcemia status in early-lactation multiparous Holstein cows using milk weight and constituent analysis from a single milking at 4 days in milk[J]. *Journal of Dairy Science*, 2025, 108 (9): 10073-10083.
- [4] Khan SM, Khan RU, Naz S, et al. Interaction of blood calcium with milk yield, energy metabolites, subclinical mastitis, and reproductive performance in crossbred dairy cows[J]. *Reproduction in Domestic Animals*, 2024, 59 (4): e14557.
- [5] 高巍, 石磊. 阴离子盐预防奶牛产乳热的机理及应用[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2006, 24 (5): 563-566.
- [6] Vallejo-Timaran D A, Reyes J, Gilbert R O, et al. Incidence, clinical patterns, and risk factors of postpartum uterine diseases in dairy cows from high-altitude tropical herds[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (8): 9016-9026.
- [7] Valldecabres A, Silva-Del-Rio N. Association of low serum calcium concentration after calving with productive and reproductive performance in multiparous Jersey cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (11): 11983-11994.
- [8] Khol J L, Moser K, Miklis A, et al. Etiology, therapy and prophylaxis of bovine parturient paresis (hypocalcaemia) [J]. *Tierärztliche Praxis Ausgabe G: Großtiere - Nutztiere*, 2020, 48 (3): 173-182.
- [9] Wächter S, Cohrs I, Golbeck L, et al. Effects of restricted dietary phosphorus supply to dry cows on periparturient calcium status[J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105 (1): 748-760.
- [10] Melendez P, Chelikani P K. Review: Dietary cation-anion difference to prevent hypocalcemia with emphasis on over-acidification in prepartum dairy cows[J]. *Animal*, 2022, 16 (10): 100645.
- [11] Couto Serrenho R, Bruinje T C, Morrison E I, et al. Controlled trial of the effect of negative dietary cation-anion difference prepartum diets on milk production, reproductive performance, and culling of dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (6): 6919-6928.

- [12] Glosson K M, Zhang X, Bascom S S, et al. Negative dietary cation-anion difference and amount of calcium in prepartum diets: Effects on milk production, blood calcium, and health[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103 (8) : 7039-7054.
- [13] Rajaeerad A, Ghorbani G R, Khorvash M, et al. Low potassium diets with different levels of calcium in comparison with different anionic diets fed to prepartum dairy cows: Effects on sorting behaviour, total tract digestibility, energy metabolism, oxidative status and hormonal response[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2021, 105 (1) : 14-25.
- [14] McFarlane W J, Renaud D L, Reedman C N, et al. A scoping review of the analytical literature concerning nonambulatory dairy cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105 (3) : 2544-2557.
- [15] Weber J, Prusseit J, Staufenbiel R. Effects of calcium supplementation, incomplete milking, and vitamin D₃ injection on serum total calcium concentration during the first 24 hours after parturition in dairy cows fed an anionic diet during late gestation[J]. *American Journal of Veterinary Research*, 2021, 82 (8) : 634-643.
- [16] Seely C R, Wilbur C N, Fang K M, et al. Effects of timing of oral calcium administration on milk production in high-producing early-lactation Holstein cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107 (3) : 1620-1629.
- [17] Hernandez L L, McArt J A A. Perspective: Transient postparturient hypocalcemia—A lactation-induced phenomenon of high-producing dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106 (12) : 8177-8180.
- [18] Vieira-Neto A, Negro G, Zimpel R, et al. Effects of injectable calcitriol on mineral metabolism and postpartum health and performance in dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (1) : 683-701.
- [19] Ramella K D C L, Cucunubo Santos L G, Patelli T H C, et al. Effects of postpartum treatment with oral calcium formate on serum calcium, serum metabolites, and the occurrence of diseases at the beginning of lactation of high-producing dairy cows[J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 2020, 185: 105180.
- [20] Suzuki K, Kondo N, Takagi K, et al. Validation of the bovine blood calcium checker as a rapid and simple measuring tool for the ionized calcium concentration in cattle[J]. *Journal of Veterinary Medical Science*, 2021, 83 (5) : 767-774.
- [21] Hendriks S J, Huzzey J M, Kuhn-Sherlock B, et al. Associations between lying behavior and activity and hypocalcemia in grazing dairy cows during the transition period[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103 (11) : 10530-10546.
- [22] Goff J P, Hohman A, Timms L L. Effect of subclinical and clinical hypocalcemia and dietary cation-anion difference on rumination activity in periparturient dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103 (3) : 2591-2601.
- [23] Barraclough R A C, Shaw D J, Thorup VM, et al. The behavior of dairy cattle in the transition period: Effects of blood calcium status[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103 (11) : 10604-10613.
- [24] Menichetti B T, Piñeiro J M, Barragan A A, et al. Association of prepartum lying time with nonesterified fatty acids and stillbirth in prepartum dairy heifers and cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103 (12) : 11782-11794.
- [25] Verhoef W, Zuidhof S, Ralston B, et al. Dissolution Rates of Calcium Boluses and Their Effects on Serum Calcium in Dairy Cattle[J]. *Veterinary Medicine: Research and Reports*, 2021, 12: 23-32.
- [26] Pinedo P, Manríquez D, Marotta N, et al. Effect of oral calcium administration on metabolic status and uterine health of dairy cows with reduced postpartum rumination and eating time[J]. *BMC Veterinary Research*, 2021, 17 (1) : 178.
- [27] Horst E A, Kvidera S K, Baumgard L H. Invited review: The influence of immune activation on transition cow health and performance—A critical evaluation of traditional dogmas[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (8) : 8380-8410.
- [28] Valdecabres A, Silva-Del-Río N. Effects of postpartum oral calcium supplementation on milk yield, milk composition, and reproduction in multiparous Jersey and Jersey × Holstein crossbreed cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (1) : 795-805.
- [29] Elisabeth Andrée O'Hara a, A K H, Renée Bge b, et al. An observational study of the dry period length and its relation to milk yield, health, and fertility in two dairy cow breeds[J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 2019, 175: 104876.