

铬在缓解反刍动物热应激中的应用进展

范德誉，郭勇庆*

(华南农业大学动物科学学院，广东广州 510642)

摘要：热应激是全球变暖背景下反刍动物养殖业面临的重要挑战，严重影响其生产性能、免疫功能和繁殖效率。铬作为动物必需的微量元素，在调节糖脂代谢、增强抗氧化能力和维持免疫功能等方面发挥关键作用。本文综述热应激对反刍动物的危害及其机制，介绍铬的来源、种类及其在热应激条件下的应用效果；重点阐述补充铬对反刍动物产奶性能、生长性能和繁殖性能的改善作用，并从增强胰岛素敏感性、调控葡萄糖代谢、提升抗氧化能力、增强免疫功能和改善瘤胃微生物群落等方面探讨其作用机制；分析当前研究存在的铬源可比性不足、剂量标准缺失等问题，并展望未来研究方向，旨在为缓解反刍动物热应激提供理论依据与实践参考。

关键词：反刍动物；热应激；铬；抗氧化；胰岛素敏感性；瘤胃微生物

文章编号：1671-4393(2026)06-0003-09

DOI:10.12377/1671-4393.26.06.01

Research Progress on the Application of Chromium in Alleviating Heat Stress in Ruminants

FAN Deyu, GUO Yongqing*

(College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong 510642)

Abstract: Heat stress poses a significant challenge to the ruminant livestock industry under the context of global warming, severely impacting animal production performance, immune function, and reproductive efficiency. Chromium, as an essential trace element for animals, plays a key role in regulating glucose and lipid metabolism, enhancing antioxidant capacity, and maintaining immune function. This review summarized the detrimental effects of heat stress on ruminants and its underlying mechanisms, and introduced the sources, types, and application effects of chromium under heat stress conditions. It focused on the ameliorative effects of chromium supplementation on the lactation performance, growth performance, and reproductive performance of ruminants. Furthermore,

基金项目：广州市科技计划重点研发项目（2024B03J1375）；广东省公益慈善基金会（CLPF2021007Z）

作者简介：范德誉（2005-），男，江西赣州人，在读本科，研究方向为动物营养与饲料科学。

***通信作者：**郭勇庆（1981-），男，河北邯郸人，博士，副教授，研究方向为反刍动物营养与健康养殖。

the review explored the mechanisms of action, including enhancing insulin sensitivity, regulating glucose metabolism, improving antioxidant capacity, boosting immune function, and modulating the rumen microbiota. This review also analyzed existing research limitations, such as insufficient comparability among different chromium sources and the lack of standardized dosage, and proposed future research directions, aiming to provide a theoretical basis and practical reference for alleviating heat stress in ruminants.

Keywords: ruminants; heat stress; chromium; antioxidant; insulin sensitivity; rumen microbiota

随着全球气候变化加剧，极端高温天气发生频繁和持续时间延长，热应激已成为反刍动物养殖业面临的严峻挑战之一。当环境温度超过动物机体调节范围时，产热与散热失衡，引起体温过高，进而导致热应激，造成反刍动物生产性能下降、繁殖功能受损、免疫功能抑制以及内分泌失调等问题^[1, 2]。热应激一方面影响畜产品产量，降低生产效益；另一方面，增加传染病的发病风险，给养殖业带来较大的经济损失。

铬是机体葡萄糖耐量因子的重要组成部分，参与胰岛素信号通路调控，同时在抗氧化防御、免疫功能维持中发挥协同作用^[3]。在热应激状态下，反刍动物体内代谢率升高，铬的排泄量增加，而饲料中的铬含量较低，无法满足机体应激状态下的需求，进而引起铬缺乏，加剧热应激的危害^[4]。研究表明，热应激条件下给反刍动物补充铬，可改善生产性能和机体代谢^[5]；但不同铬源的作用效果、添加方式及具体调控机制存在差异。因此，本文阐述了热应激对反刍动物的危害及影响机制，重点探讨补充铬缓解热应激的作用效果与机制，为降低反刍动物热应激的影响及调控措施提供参考。

1 热应激对反刍动物的影响

1.1 热应激的危害

热应激指恒温动物处于高温高湿环境时，环境温度高于舒适区上限而产生的非特异性应答反应^[6]。当饲养环境的温度湿度指数（THI）超过74时，反刍动物开始产生热应激反应^[7]。荟萃分析结果表明，轻、中度的热应激可引起奶牛的干物质采食量（DMI）

下降19.3%、能量校正乳产量下降17.9%、乳蛋白率下降3.9%^[8]。Rashamol等^[9]研究发现，热应激可引起马拉巴里山羊的肠系膜淋巴结免疫相关基因表达显著下调，滤泡区域淋巴细胞密度减少，滤泡中心结构退化，表明热应激对免疫功能造成了实质性的破坏。Adjassin等^[10]研究指出，萨能山羊的繁殖力和多胎率与THI均呈显著负相关，萨能×红马拉迪杂交山羊的受胎率和多胎率均与THI呈极显著负相关。因此，热应激会制约反刍动物生产性能的发挥，并破坏免疫性能，降低繁殖性能。

1.2 热应激危害的机制

反刍动物发生热应激后，通常会引起体温升高和能量摄入减少，机体为了维持体温稳态，能量消耗增加，出现能量负平衡，进而导致生产性能下降。Antanaitis等^[11]对荷斯坦牛的行为进行监测，发现热应激奶牛的每个食团咀嚼次数和每分钟咀嚼次数显著减少，进一步得出反刍时间减少，消化代谢效率降低，同时其活动量增加，能量消耗提高，进而导致能量负平衡。从微观上来看，热应激的危害是通过一系列分子和细胞层面的级联反应导致的。一方面，热应激会刺激活性氧（Reactive Oxygen Species, ROS）的过量产生，ROS是细胞呼吸过程中氧代谢的副产物，当ROS的产生与抗氧化防御系统的清除能力失衡时，就会引发氧化应激。Murata等^[12]以奶牛子宫内皮细胞为对象，在热应激条件下培养12 h后，细胞内ROS水平显著增加，这直接诱导氧化应激的发生。另一方面，热应激会增加细胞内热负荷，扰乱内质网的正常蛋白质折叠环境，使错误折叠蛋白质积累，进而激活内质网应激反

应，加剧细胞功能障碍^[13]。

此外，热应激还会导致机体激素分泌发生紊乱。热应激状态下的反刍动物血液中皮质醇水平升高，导致胰岛素抵抗与免疫力下降。Chen等^[14]研究表明，在相同热应激条件下，热敏感组荷斯坦牛的血清皮质醇和葡萄糖水平均显著高于耐热组牛，引起糖代谢异常，加剧能量负平衡。Rebez等^[15]研究指出，处于热应激状态的绵羊血浆皮质醇浓度显著升高，外周血单核细胞中白细胞介素-2（IL-2）、肿瘤坏死因子- α （TNF- α ）、 β 干扰素（IFN- β ）等免疫因子的基因表达量显著下降。热应激还会导致生殖激素紊乱，施安等^[16]研究得出，处于慢性热应激的能繁母牛血清中孕酮（P4）含量显著降低。Zou等^[17]研究发现，热应激下湖羊下丘脑-垂体-卵巢轴功能的基因表达出现差异，这使得湖羊血清中的促卵泡生成素（FSH）、促黄体生成素（LH）、雌二醇（E2）、P4均显著降低。因此，热应激引起的生殖激素的紊乱可造成反刍动物繁殖性能的下降。

2 铬的来源和种类

铬在自然界中常见的价态包括三价铬（Cr³⁺）和六价铬（Cr⁶⁺）。其中Cr³⁺是反刍动物机体必需的微量元素活性形态，参与机体葡萄糖、脂质与蛋白质代谢的调控，改善畜禽繁殖性能^[18,19]；对于Cr⁶⁺，已有大量研究表明它具有强氧化性，是已知的毒素、诱变剂和致癌物，目前已被严格禁止在饲料中添加^[20, 21]。

反刍动物饲料中铬的来源主要包括天然饲料成分和人工添加的补充剂。天然饲料来源是反刍动物铬摄入的基础来源，常用的饲料原料中均含有铬。王京等^[22]研究指出，2022年我国反刍动物饲料中铬含量的平均值为0.272 mg/kg DM。Spears等^[23]研究指出，绝大多数反刍动物常用饲料原料的铬含量低于0.50 mg/kg DM。在一般情况下，天然饲料成分中的铬已能够满足反刍动物的日常需求，但处于应激状态的反刍动物会出现铬代谢需求提升和铬排出量增加，导致铬缺乏^[24]。此时，就需要添加一定的铬补

充剂。

铬制剂按化学形态可分为无机铬和有机铬，两种形态的铬在生物利用率及生理活性上差异较大。无机铬主要为三氯化铬（CrCl₃），在动物机体内很难被吸收。研究指出，动物对无机铬的吸收率仅为0.4%~3.0%，而对有机铬的吸收率可达10%~25%^[5]。因此，铬常以有机的形式补充在饲料中。常添加于饲料中的有机铬包括丙酸铬、吡啶甲酸铬、蛋氨酸铬、酵母铬、烟酸铬等，这些有机铬均为Cr³⁺与有机配体形成的稳定螯合物，可保护铬离子在瘤胃内不被络合失活，从而顺利地肠道中被吸收。

此外，随着纳米技术的发展，铬纳米颗粒逐渐运用于动物饲料的研究。铬纳米颗粒是指尺寸在1~100 nm的铬颗粒，其粒径小、比表面积大，更易通过动物肠道黏膜^[25]。但相关文献表明，饲喂铬纳米颗粒易导致铬在畜禽组织中蓄积，并通过肉、蛋等产品传递给人，存在食品安全风险^[25]。

3 铬对热应激反刍动物的影响

3.1 铬对热应激反刍动物产奶性能的影响

奶畜在热应激条件下产奶性能显著降低，而大量研究表明，在奶畜日粮中补充适量的铬可以有效减少热应激下奶畜的产奶性能损失。张梓昕等^[26]的研究指出补充8 mg/d·头丙酸铬可使处于轻度热应激状态的荷斯坦牛产奶量提高11.21%，乳汁体细胞数显著降低，乳品质得到改善。张会会等^[27]研究发现，在尼里-拉菲水牛日粮中添加3 mg/d·头的烟酸铬能显著提升水牛的产奶量，但该处理对乳蛋白率、乳脂率、乳总固形物及非脂固形物等乳成分指标未产生明显影响；Wo等^[28]持续8周给热应激的荷斯坦牛日粮中补充酵母铬，使日粮铬水平达到0.36 mg/kg DM，结果显示，热应激奶牛的产奶量显著提升，乳蛋白和乳糖含量也显著增加；Zhang等^[29]研究表明，在轻度热应激的荷斯坦牛日粮中分别添加4 mg/d·头与8 mg/d·头的丙酸铬，均显著改善奶牛的产奶量；Asadi等^[30]在热应激的阿夫沙里羊日粮中分别添加3 mg/kg DM无机铬、蛋氨酸铬和铬纳米颗粒，结果显

示添加蛋氨酸铬和铬纳米颗粒分别使母羊的日产奶量显著提升，其中蛋氨酸铬组提高0.20 kg/d，铬纳米颗粒组提高0.35 kg/d。但也有不同的结果，Soffa等^[31]给热应激荷斯坦牛连续24 d补充饲喂丙酸铬，使日粮中铬水平达12 mg Cr/d·头，结果显示奶牛的产奶量未受显著影响。上述大多研究表明，补充铬对热应激反刍动物产奶性能具有一定的改善作用，但该改善效果受补充时长、剂量水平影响，短期高剂量补饲易超出机体代谢耐受与有效作用区间，因而无法实现产奶性能的有效提升。

3.2 铬对热应激反刍动物生长性能的影响

对于热应激的肉牛与肉羊，铬具有改善生长性能和饲料转化效率的潜力。Spears等^[32]在安格斯杂交阉牛日粮中以丙酸铬的形式补充铬水平至0.25 mg Cr/kg DM，结果显示，阉牛平均日增重显著提升，料肉比显著降低，并且背最长肌面积也显著增加，而皮下脂肪厚度、大理石纹评分未受影响，说明增重主要体现在肌肉而非脂肪；Kargar等^[33]给热应激的荷

斯坦犊牛连续91 d补充蛋氨酸铬，使日粮中铬水平达0.05 mg Cr/kg BW^{0.75}后，犊牛采食量与平均日增重显著提高，臀宽显著增加；Seifalinasab等^[34]研究发现，给处于重度热应激环境育肥期克尔马尼公羔羊补充3 mg /kg DM的蛋氨酸铬，羔羊的初末体重、日增重未受显著影响，但料重比降低了21.5%，饲料利用效率得到了显著提升。因此，反刍动物发生热应激后，补充铬能起到改善生长性能的作用，但相关研究缺乏高剂量组，其安全上限有待进一步探究。

3.3 铬对热应激反刍动物繁殖性能的影响

补充铬能调控热应激时反刍动物的繁殖性能。Soltan^[35]在热应激荷斯坦牛补充酵母铬基有机三价铬制剂3 mg /d·头，结果显示铬处理组奶牛28 d妊娠率显著提高；El-Zaher等^[36]给热应激巴拉迪母山羊以胶囊形式长期补饲0.8 mg/d·头的CrCl₃后，显著提高母羊的受胎率和生育率，以及羔羊出生体重；Soffa等^[31]针对产后早期处于热应激的荷斯坦牛采用短期补饲方案，产后24 d内每日补饲12 mg丙酸铬，

表 1 铬对热应激反刍动物的影响

Table 1 Effects of Chromium on Ruminants Under Heat Stress

铬源	剂量	动物品种	效果	参考文献
丙酸铬	8 mg/d·头	荷斯坦牛	产奶量提高 11.21%、降低乳体细胞数。	[26]
	4、8 mg/ d·头	荷斯坦牛	显著减少产奶量损失，但乳成分无显著差异。	[29]
	12 mg Cr/d·头	荷斯坦牛	干物质采食量、产奶量均无显著差异，6~9 mm 小卵泡平均直径显著增大，血浆孕酮与平均黄体体积比值显著升高。	[31]
	0.25 mg Cr/kg DM	安格斯杂交牛	平均日增重显著提升，料肉比显著降低，背最长肌面积显著增加。	[32]
酵母铬	0.36 mg Cr/kg DM	荷斯坦牛	显著提高奶牛产奶量、乳蛋白、乳糖、总固形物、乳蛋白率、乳糖率。	[28]
	3 mg Cr/d·头	荷斯坦牛	产奶量显著提升，乳脂、乳蛋白、乳糖含量与对照组无显著差异，早期受胎率显著提升，后期无差异。	[35]
蛋氨酸铬	3 mg/kg DM	阿夫沙里羊	母羊的干物质采食量与产奶量显著提升，母羊所产羔羊初生体重显著增加。	[30]
	0.05 mg Cr/kg BW ^{0.75}	荷斯坦牛	采食量与平均日增重显著提高，臀宽显著增加。	[33]
	3 mg/kg DM	克尔马尼羊	初末重、日增重无差异，但料重比降低 21.5%，饲料利用效率显著提升。	[34]
烟酸铬	3 mg/d·头	尼里 - 拉菲水牛	显著提升水牛的产奶量，但乳蛋白率、乳脂率、总固形物和非脂固形物无明显变化。	[27]
铬纳米颗粒	3 mg/kg DM	阿夫沙里羊	母羊的干物质采食量与产奶量显著提升，所产羔羊的初生体重显著增加，42 日龄的羔羊体重显著高于对照组。	[30]
CrCl ₃	0.8 mg/d·头	巴拉迪山羊	显著提高母羊的受胎率、生育率和繁殖力，羔羊出生体重显著升高	[36]

通过高剂量铬添加在产后窗口期快速激活繁殖生理通路,短期内调控卵泡与黄体功能,结果显示奶牛6~9 mm小卵泡的平均直径显著增大,血浆孕酮与平均黄体体积的比值显著升高,这能有效增加妊娠识别以及后续妊娠建立的概率。上述研究说明,补充铬能改善热应激母畜的繁殖性能。此外,采用短期高剂量的补铬方案,可在产后快速缓解热应激对繁殖系统的负面影响,但目前对于高剂量补铬的长期安全性及其剂量阈值尚未明确。另外,目前针对公畜的相关研究较少,有待进一步探究。

4 铬对热应激反刍动物影响的作用机制

4.1 增强胰岛素敏感性与调控葡萄糖代谢

热应激时反刍动物虽可自发提高胰岛素敏感性,但这种代偿性调节仍不足以弥补代谢能量消耗,也没能让体内关键组织高效吸收利用葡萄糖。Xie等^[37]研究表明,热应激荷斯坦牛肝脏中胰岛素介导的蛋白激酶B磷酸化比例在各时期均显著升高,但热应激仍导致其产奶量下降30%,并且进入-4.5 Mcal/d的能量负平衡状态;此外,其血糖曲线下面积(Area Under the Curve, AUC)显著升高,说明热应激下荷斯坦牛仅依靠自身调节能力,无法有效缓解热应激导致的生产性能下降。

铬作为葡萄糖耐受因子的重要成分,可以调控胰岛素信号通路。补充铬可以增强热应激反刍动物的胰岛素敏感性,降低血糖。Kircheva等^[38]通过计算化学建模与能量分析,证实三价铬离子与铬调素特异性结合,形成稳定的全铬调素;该物质可以结合到胰岛素激活的胰岛素受体上,提高其激酶活性^[39],增强胰岛素敏感性,但这一机制仅基于计算化学模拟与体外细胞实验验证,缺乏在反刍动物体内的活体实验。Hung等^[40]给热应激的美利奴波尔杂交绵羊补充400 mg/kg DM和800 mg/kg DM的纳米吡啶甲酸铬,结果表明血浆葡萄糖AUC与血浆胰岛素AUC均显著减少;此外,介导炎症反应与胰岛素抵抗的c-Jun氨基末端激酶(c-Jun N-terminal kinase, JNK)基因的表达量显著下调。进一步证实,给热应激反刍

动物补充铬可增强其胰岛素敏感性,进而优化能量利用、减少代谢产热、维持代谢稳态,改善生长性能,以缓解热应激。但在张李文等^[41]的研究中,给处于热应激条件下的围产期荷斯坦牛补充8 g/d·头铬含量1%的酵母铬,结果显示奶牛的血糖及热休克蛋白70(Heat Shock Protein 70, HSP70) mRNA的含量无显著变化。这说明铬增强胰岛素敏感性的效果可能因铬的种类与剂量,或因反刍动物的种类不同而有一定的差异。

另一方面,补充铬可调控热应激反刍动物的葡萄糖代谢,稳定代谢相关基因表达。Ribeiro等^[42]研究发现,给热应激吉罗兰多奶牛的日粮中添加0.5 mg/kg DM的吡啶甲酸铬25 d后,奶牛肝脏中葡萄糖转运蛋白2(Glucose Transporter 2, GLUT2)基因、葡萄糖-6-磷酸酶(Glucose-6-Phosphatase, G6Pase)基因、生长激素(Growth Hormone, GH)基因的mRNA丰度均显著下调,抑制了热应激奶牛肝脏中葡萄糖的过度生成及向血液的释放,同时减少了生长激素受体对胰岛素信号的干扰,进而强化胰岛素信号放大效应以提升细胞葡萄糖摄取效率,实现对热应激状态下反刍动物葡萄糖代谢的调控。但目前研究采用的铬源较单一,且尚未明确GH基因表达量下调的负面影响,可靠性还有待进一步确认。

4.2 增强抗氧化能力

热应激会诱导反刍动物机体产生过量ROS引发氧化损伤,铬作为一种具有抗氧化功能的微量元素,在热应激条件下可以增强机体抗氧化能力。为了应对氧化应激,机体会产生多种抗氧化酶,如超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GSH-Px)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)等^[43, 44]。目前已有大量研究发现,补充铬可以提高反刍动物机体抗氧化酶的表达水平及活性,缓解氧化应激。马翊暄等^[45]在热应激荷斯坦牛日粮中补充6 mg/d蛋氨酸铬,结果显示,奶牛血清中SOD活性和总抗氧化能力显著增加,丙二醛(Malondialdehyde, MDA)浓度显著降低。Wang等^[46]给重度热应激状态下的荷斯

坦牛补充的4 mg/d丙酸铬，结果发现铬处理后的奶牛血清中GSH-Px和SOD活性显著提升。Seifalinasab等^[34]研究表明，给热应激状态下克尔马尼育肥羔羊补充3 mg/kg DM蛋氨酸铬后，红细胞内的GSH-Px和SOD活性显著提高，总抗氧化能力呈上升趋势。但也有不同的结果，Zhang等^[29]连续45 d给轻度热应激的荷斯坦牛补充了8 mg/d·头丙酸铬后，血浆中的MDA、SOD和GSH-Px水平均未表现出显著差异，可能是由于丙酸铬通过源头减少ROS生成缓解氧化应激，而非调节抗氧化酶活性，且轻度热应激背景下机体无需启动酶促代偿机制。由上述研究可知，给热应激反刍动物补充一定量的铬制剂，能够提升机体血液中抗氧化酶活性，提高机体抗氧化能力，减轻热应激引发的氧化损伤，而轻度热应激刺激强度较低，不足以促使机体抗氧化酶系统产生显著应答，此时铬对酶活性的提升作用不明显。

4.3 提升机体免疫功能

在热应激状态下，反刍动物的免疫系统会受到抑制，主要机制为热应激可导致血液中皮质醇水平升高，高浓度的皮质醇会引起免疫抑制，而在日粮中补充铬制剂可缓解相应的免疫抑制。Lalhriatpuui等^[47]在两组孟加拉山羊日粮中分别添加1.0 mg/kg DM 无机铬($\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)与1.0 mg/kg DM有机铬(酵母铬)，饲喂150 d后发现，无机铬组与有机铬组山羊血浆中皮质醇均显著降低，其中有机铬组皮质醇水平降幅较大，中性粒细胞吞噬活性也有显著的改善；Sandoval-Lozano等^[48]给热应激的卡塔丁羔羊补充酵母铬，结果显示，羔羊血浆中皮质醇水平显著下降，其中0.8 mg/kg DM剂量的酵母铬效果最显著。虽然日粮中添加铬可以降低羊的血液皮质醇水平，但该结论在牛类反刍动物中难以复现。Ferreira等^[49]的研究表明，给处于热应激状态的安格斯杂交肉牛基础日粮中补充丙酸铬，使日粮中铬水平达0.5 mg/kg DM后，肉牛血浆皮质醇水平并未显著降低；Malik等^[50]通过多水平荟萃分析评估了铬补充对奶牛血清皮质醇浓度的作用，结果显示，补充铬组与对照组奶牛的血清皮质醇水平并无显著差

异。该差异可能是由于牛体型较大而对铬的需求量更高，低剂量下效果不明显。此外，不同铬源吸收效率的差异也会导致实验结果的差异，未来可在牛中开展更高剂量以及不同铬源的比较研究加以验证。

4.4 改善瘤胃微生物群落

作为反刍动物特有的消化代谢器官，瘤胃微生物生态系统的稳态是实现饲料高效利用及机体健康的重要前提。当反刍动物处于热应激状态时，易引起瘤胃内环境不稳定，导致瘤胃微生物活性与群落结构失衡^[51]，补充铬可一定程度上缓解这一负面效应。Zhao等^[52]给热应激的荷斯坦牛补充含31.3%丙酸铬的制剂10 g/d，结果显示，奶牛瘤胃中的挥发性脂肪酸(VFAs)浓度显著升高；Shan等^[53]以酵母铬为铬源，给热应激荷斯坦牛日粮中补充0.36 mg/kg DM的铬后，显著提高了瘤胃中奥尔森氏菌属、毛螺菌科UCG-002属、沙特尔沃思氏菌属等有益菌的相对丰度，同时，肠杆菌属、大肠埃希氏菌-志贺氏菌属、口腔杆菌属等有害菌的相对丰度显著降低；Zhang等^[29]给轻度热应激的荷斯坦牛分别补充4 mg/d·头与8 mg/d·头的丙酸铬，结果显示随着丙酸铬补充剂量的增加，瘤胃微生物群落的物种丰度呈现出上升趋势；张梓昕^[54]的研究指出给轻度热应激的荷斯坦牛补充4 mg/d·头的丙酸铬能显著减少奶牛瘤胃VFAs浓度的降低。因此，在热应激条件下，补充铬能够有效调节瘤胃微生物的群落结构，改善瘤胃发酵功能及能量供应水平，从而改善反刍动物的生产性能。

5 现有研究的局限性与展望

综上所述，现有研究已初步证明热应激会严重影响反刍动物的生产、免疫及繁殖性能，而补充铬可通过调控糖代谢、增强抗氧化能力、改善免疫功能与瘤胃微生态等途径来缓解热应激产生的负面影响。但是，目前研究仍存在铬源的可比性不足、剂量标准化缺失、多因素互作研究匮乏等问题。未来研究中需关注不同铬源的代谢差异，明确饲料中铬制剂添加的安全上限，加强铬与其他抗应激因子协

同作用的研究,为反刍动物热应激调控及铬制剂的合理应用提供参考。

参考文献

- [1] Ellett M D, Rhoads R P, Hanigan M D, et al. Relationships between gastrointestinal permeability, heat stress, and milk production in lactating dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107 (7) : 5190-5203.
- [2] Oliveira C P, Sousa F C de, Silva A L da, et al. Heat Stress in Dairy Cows: Impacts, Identification, and Mitigation Strategies—A Review[J]. *Animals*, 2025, 15 (2) : 249.
- [3] 钟文迪, 刘金洋, 魏子维, 等. 微量元素铬的作用机制及其在奶牛生产中的应用[J]. *饲料研究*, 2023, 46 (24) : 129-132.
- [4] Nair P M, Anil, Anand V M, et al. A review on the effects of micronutrients in heat stress alleviation in dairy animals [J]. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2022, 41 (36) : 59-68.
- [5] 王帅, 马悦, 黄坚, 等. 铬对奶畜热应激的调控作用及其研究进展[J]. *家畜生态学报*, 2024, 45 (4) : 92-96.
- [6] 许静雯, 卞安萍, 黄婧雯, 等. 山羊热应激的研究进展[J]. *广东畜牧兽医科技*, 2024, 49 (5) : 7-13.
- [7] Islam M S, Mondal A K, Auwal M R, et al. Analysis of the climatic trends and heat stress periods for ruminants rearing in Bangladesh[J]. *Veterinary and Animal Science*, 2024, 24: 100359.
- [8] Chen L, Thorup V M, Kudahl A B, et al. Effects of heat stress on feed intake, milk yield, milk composition, and feed efficiency in dairy cows: A meta-analysis[J]. *Journal of Dairy Science*, 2024, 107 (5) : 3207-3218.
- [9] Rashamol V P, Sejian V, Bagath M, et al. Effect of heat stress on the quantitative expression patterns of different cytokine genes in Malabari goats[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2019, 63 (8) : 1005-1013.
- [10] Adjassin J S, Assani A S, Bani A A, et al. Impact of heat stress on reproductive performances in dairy goats under tropical sub-humid environment[J]. *Heliyon*, 2022, 8 (2) : e08971.
- [11] Antanaitis R, Džermeikaitė K, Bepalovaitė A, et al. Assessment of ruminating, eating, and locomotion behavior during heat stress in dairy cattle by using advanced technological monitoring[J]. *Animals*, 2023, 13 (18) : 2825.
- [12] Murata H, Kunii H, Kusama K, et al. Heat stress induces oxidative stress and activates the KEAP1-NFE2L2-ARE pathway in bovine endometrial epithelial cells†[J]. *Biology of Reproduction*, 2021, 105 (5) : 1114-1125.
- [13] Looor J J, Lopreiato V, Palombo V, et al. Physiological impact of amino acids during heat stress in ruminants[J]. *Animal Frontiers*, 2023, 13 (5) : 69-80.
- [14] Chen X Y, Shu H, Sun F Y, et al. Impact of heat stress on blood, production, and physiological indicators in heat-tolerant and heat-sensitive dairy cows[J]. *Animals*, 2023, 13 (16) : 2562.
- [15] Rebez E B, Devaraj C, Ninan J, et al. Effect of heat stress and herbal products supplementation on the immune response related gene expression patterns in Kenguri ewes[J]. *Small Ruminant Research*, 2025, 248: 107503.
- [16] 施安, 王建东, 侯鹏霞, 等. 慢性冷热应激对繁殖母牛血清指标的影响[J]. *中国饲料*, 2023 (19) : 23-28.
- [17] Zou J W, Wei L L, Liang Y S, et al. Impact of heat stress on gene expression in the hypothalamic-pituitary-ovarian axis of Hu sheep[J]. *Animals*, 2025, 15 (15) : 2189.
- [18] 穆蕊, 刘波, 陈雅湘, 等. 三价铬对畜禽繁殖性能的影响及其作用机制[J]. *中国饲料*, 2020 (3) : 41-45.
- [19] 马雪琴, 马玉林, 徐晓锋, 等. 有机铬的生物学功能及其在动物营养中的应用研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2025, 52 (12) : 5715-5725.
- [20] Katarzyna Ż, Sławomir J K. The effect of chromium on ruminant health[J]. *Journal of Elementology*, 2020, 25 (3) : 893-903.
- [21] Thompson C M, Aardema M J, Heintz M M, et al. A review of mammalian in vivo genotoxicity of hexavalent chromium: implications for oral carcinogenicity risk assessment[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2021, 51 (10) : 820-849.
- [22] 王京, 刘骥玮, 梁海军, 等. 2022-2023年我国饲料产品与饲料原料镉和铬调查分析[J]. *中国饲料*, 2024 (23) : 397-406.
- [23] Spears J W, Lloyd K E, Krafka K. Chromium concentrations in ruminant feed ingredients[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100 (5) : 3584-3590.
- [24] 刘丽, 祝铁钢, 孙庆余, 等. 铬的生理功能及其在反刍动物生产中的应用研究进展[J]. *饲料研究*, 2021, 44 (22) : 153-156.
- [25] Hill E K, Li J L. Current and future prospects for nanotechnology in animal production[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2017, 8 (1) : 26.
- [26] 张梓昕, 袁洋, 赵晨旭, 等. 丙酸铬在缓解奶牛热应激中的效果[J]. *中国兽医杂志*, 2023, 59 (7) .
- [27] 张会会, 李孟伟, 唐振华, 等. 不同水平烟酸铬对热应激状态下水牛泌乳性能、抗氧化性能和瘤胃微生物多样性的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2020, 47 (5) : 1381-1391.
- [28] Wo Y Q L, Ma F T, Shan Q, et al. Plasma metabolic

- profiling reveals that chromium yeast alleviates the negative effects of heat stress in mid-lactation dairy cows[J]. *Animal Nutrition*, 2023, 13: 401-410.
- [29] Zhang B H, Wen Y Q, Zhang Z X, et al. Effects of chromium propionate supplementation on production performance, blood parameters, ruminal fermentation indices, and microbial diversity in heat-stressed Holstein dairy cows[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2025, 12: 1651670.
- [30] Asadi M, Ghoorchi T, Toghdory A H. Effect of dietary supplementation with different forms of chromium on feed intake, milk production and composition, blood parameters of Afshari ewes in transition period under the influence of heat stress[J]. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 2025, 76 (1): 8575-8588.
- [31] Soffa D R, Stewart J W, Arneson A G, et al. Reproductive and lactational responses of multiparous dairy cattle to short-term postpartum chromium supplementation during the summer months[J]. *JDS Communications*, 2023, 4 (2): 161-165.
- [32] Spears J W, Loh H Y, Lloyd K E, et al. Trace mineral source and chromium propionate supplementation affect performance and carcass characteristics in feedlot steers[J]. *Journal of Animal Science*, 2024, 102: skae106.
- [33] Kargar S, Mousavi F, Karimi-Dehkordi S, et al. Growth performance, feeding behavior, health status, and blood metabolites of environmentally heat-loaded Holstein dairy calves fed diets supplemented with chromium[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101 (11): 9876-9887.
- [34] Seifalinasab A, Mousaie A, Doomary H. Dietary high chromium-methionine supplementation in summer-exposed finishing lambs: impacts on feed intake, growth performance, and blood cells, antioxidants, and minerals[J]. *Biological Trace Element Research*, 2022, 200 (1): 156-163.
- [35] Soltan M A. Effect of dietary chromium supplementation on productive and reproductive performance of early lactating dairy cows under heat stress[J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2010, 94 (2): 264-272.
- [36] El-Zaher H M, Eid S Y, El-Sayed A I M, et al. Impacts of chromium and selenium-E on cortisol levels, reproductive and productive efficiency of Baladi female goats under subtropical conditions[J]. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences*, 2020, 12 (1): 39-50.
- [37] Xie G, Cole L C, Zhao L D, et al. Skeletal muscle and hepatic insulin signaling is maintained in heat-stressed lactating Holstein cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99 (5): 4032-4042.
- [38] Kircheva N, Toshev N, Dudev T. Holo-chromodulin: competition between the native Cr^{3+} and other biogenic cations (Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , and Zn^{2+}) for the binding sites[J]. *Metallomics*, 2022, 14 (10): mfac082.
- [39] Sadri H, Larki N N, Kolahian S. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of leucine, zinc, and chromium, alone and in combination, in rats with type 2 diabetes[J]. *Biological Trace Element Research*, 2017, 180 (2): 246-254.
- [40] Hung A T, Leury B J, Sabin M A, et al. Nano-chromium picolinate and heat stress enhance insulin sensitivity in cross-bred sheep[J]. *Animal Nutrition*, 2023, 13: 173-184.
- [41] 张李文, 陈慧君, 王超, 等. 酵母铬和二氢吡啶对热应激围产期奶牛生理生化指标及HSP70 mRNA表达量的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2024, 43 (2): 188-196.
- [42] Ribeiro L S, Brandão F Z, Carnevali L de R, et al. Chromium supplementation modulates glucose metabolism in heat-stressed Girolando dairy cows[J]. *Semin: Ciências Agrárias*, 2020, 41 (5): 2445-2452.
- [43] Ayemele A G, Tilahun M, Lingling S, et al. Oxidative stress in dairy cows: insights into the mechanistic mode of actions and mitigating strategies[J]. *Antioxidants*, 2021, 10 (12): 1918.
- [44] Zeng J, Cai J, Wang D M, et al. Heat stress affects dairy cow health status through blood oxygen availability[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2023, 14 (1): 112.
- [45] 马翊暄, 沈宜钊, 李妍, 等. 夏季补饲蛋氨酸铬对干奶牛热应激状态、抗氧化能力和被动免疫转移能力的影响[J]. *动物营养学报*, 2022, 34 (9): 5852-5865.
- [46] Wang M M, Yang J Z, Shen Y Z, et al. Effects of chromium propionate supplementation on lactation performance, nutrient digestibility, rumen fermentation patterns, and antioxidant status in Holstein cows under heat stress[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2023, 305: 115765.
- [47] Lalhriatpuii M, Chatterjee A, Dutta T K, et al. The effects of dietary inorganic and organic chromium supplementation on blood metabolites, hormones, and mineral composition of blood and internal organs in black Bengal goats[J]. *Biological Trace Element Research*, 2024, 202 (6): 2547-2563.
- [48] Sandoval-Lozano E, Barragán I S R, Sandoval-Lozano A, et al. Effects of chromium yeast supplementation on serum hsp60 and hsp70, mRNA expression in heat-stressed lambs[J]. *Veterinary Sciences*, 2025, 12 (9): 801.
- [49] Ferreira M L, Vedovatto M, Siqueira I P, et al. Effects of shade and chromium propionate supplementation during gestation of beef cows under heat stress: cow thermotolerance, cow-calf performance, and physiological responses[J]. *Journal of Animal Science*, 2025, 103: skaf280.

- [50] Malik M I, Jonker A, Raboisson D, et al. Effects of dietary chromium supplementation on blood biochemical parameters in dairy cows: A multilevel meta-analytical approach[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107 (1) : 301-316.
- [51] Ban B, Ki S, Kim S, et al. Sucrose supplementation mitigates heat stress-induced alterations in rumen metabolism and immunity in dairy cows[J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1) : 41758.
- [52] Zhao C X, Shen B Y, Huang Y, et al. Effects of chromium propionate and calcium propionate on lactation performance and rumen microbiota in postpartum heat-stressed Holstein dairy cows[J]. Microorganisms, 2023, 11 (7) : 1625.
- [53] Shan Q, Ma F, Huang Q, et al. Chromium yeast promotes milk protein synthesis by regulating ruminal microbiota and amino acid metabolites in heat-stressed dairy cows[J]. Animal Nutrition, 2025, 20: 120-130.
- [54] 张梓昕. 丙酸铬在缓解奶牛热应激中的应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.