

热应激对奶牛繁殖性能的影响及综合调控

艾合买提·买买提

(哈密市伊州区柳树沟乡农业发展服务中心, 新疆哈密 839000)

摘要: 本文综述热应激影响奶牛繁殖性能的内在机制、科学评估方法及综合缓解策略。深入剖析了热应激通过诱导氧化应激、扰乱内分泌稳态、损害卵母细胞质量与胚胎发育及干扰表观遗传编程等多重路径损害繁殖力的生理与分子机制; 探讨了基于温湿指数、生理指标(如直肠温度、呼吸频率)及行为变化的热应激评估体系, 并分析了其与受胎率、产后首次排卵间隔等关键繁殖性能的关联; 综合评述了当前通过遗传选择、精准营养调控、环境改善以及新兴生物技术缓解热应激负面影响的研究进展与潜力, 为牧场构建高效热应激应对体系、提升奶牛繁殖效率提供理论依据与实践指导。

关键词: 热应激; 奶牛; 繁殖性能; 温湿指数; 氧化应激; 表观遗传; 缓解策略

文章编号: 1671-4393(2026)06-0057-08

DOI:10.12377/1671-4393.26.06.07

Impact of Heat Stress on Reproductive Performance in Dairy Cows and Integrated Mitigation Strategies

Aihemati Maimaiti

(Agriculture Development Service Center of Liushugou Township, Yizhou District, Hami Xinjiang 839000)

Abstract: This paper reviewed the intrinsic mechanisms through which heat stress affected reproductive performance in dairy cows, scientific assessment methods, and integrated mitigation strategies. It provided an in-depth analysis of the physiological and molecular mechanisms by which heat stress impairs fertility through multiple pathways, including inducing oxidative stress, disrupting endocrine homeostasis, impairing oocyte quality and embryonic development, and interfering with epigenetic programming. The paper explored heat stress assessment systems based on the temperature-humidity index, physiological indicators (such as rectal temperature and respiratory rate), and behavioral changes, and analyzed their associations with key reproductive traits

作者简介: 艾合买提·买买提 (1982-), 男, 新疆哈密人, 本科, 兽医师, 研究方向为畜牧兽医技术、畜禽健康养殖及废弃物资源化利用。

such as conception rate and the interval to first postpartum ovulation. It comprehensively reviewed current research progress and the potential of strategies to mitigate the negative effects of heat stress, including genetic selection, precise nutritional regulation, environmental improvements, and emerging biotechnologies, offering theoretical foundations and practical guidance for dairy farms to establish efficient heat stress response systems and enhance reproductive efficiency.

Keywords: heat stress; dairy cow; reproductive performance; temperature-humidity index; oxidative stress; epigenetics; mitigation strategy

热应激是当奶牛所处环境温度超过其热中性区时，机体为维持稳态而产生的一系列生理和行为适应性反应^[1]。随着全球气候变暖趋势加剧，热应激对奶牛繁殖性能的负面影响日益突出，已成为畜牧业面临的核心挑战之一。值得关注的是，热应激不仅会直接损害当代奶牛的繁殖性能，还可能通过复杂的分子调控机制，对后代繁殖性能产生长期甚至跨代的不利影响^[2]，这对牛群的长期遗传进展和繁殖效率构成严重威胁。因此，了解热应激影响奶牛繁殖性能的多层次机制，建立科学的评估方法并制定有效的缓解策略，具有重要的理论与实践意义。本文围绕热应激损害奶牛繁殖性能的核心路径，从生理机制、分子基础、评估方法及综合防控策略等维度进行系统阐述，以期改善热应激奶牛的繁殖管理提供全面视角。

1 热应激影响奶牛繁殖性能的生理与内分泌机制

1.1 卵母细胞与胚胎发育损伤

热应激对奶牛繁殖性能的损害首先体现在对卵母细胞与胚胎发育的直接损伤上。卵巢中的卵泡及其包裹的卵母细胞对高温极度敏感。热应激会损害卵母细胞的发育能力，这种损害涉及细胞核与胞质的成熟障碍、线粒体功能紊乱以及细胞凋亡的诱导，即热应激会破坏卵母细胞的胞质成熟，表现为线粒体功能异常和活性氧（ROS）含量升高，这直接削弱了卵母细胞的受精能力和后续的胚胎发育潜能^[3]。研究表明，在卵泡发生的早期阶段，卵母细胞就可能受到热应激的损害，并

且这种敏感性一直持续到排卵前后，这种质量下降是卵泡发生模式改变以及体温升高对卵母细胞直接作用的结果^[4]。

热应激会造成奶牛生理环境紊乱，损害卵母细胞的发育潜能，影响着床前胚胎的发育^[5]。早期胚胎对热应激极为敏感，尤其是在受精后的前7天，在这期间，胚胎对热应激的敏感性发生快速变化，从2~4细胞期的非常敏感逐渐过渡到桑椹胚期的基本耐受^[4]。高温会直接干扰胚胎的基因表达、细胞分化和囊胚形成。研究证实，在体外胚胎生产过程中，无论是在卵母细胞成熟、受精还是合子阶段施加热应激，都会损害胚胎发育，表现为卵裂率和囊胚率下降^[6]。这种发育受损伴随着胚胎干扰素- τ （IFNT）基因和蛋白表达的降低，以及活性氧水平的升高和氧化应激的增加^[7]。除了直接作用，热应激还通过改变母体生殖道内环境，间接影响配子运输、受精及胚胎早期发育。例如，热应激会改变输卵管功能，可能导致受精失败和早期胚胎死亡^[7]。这些综合性的损伤机制最终导致胚胎存活率和着床成功率显著降低。

1.2 生殖内分泌轴紊乱

热应激对奶牛繁殖性能的另一个核心影响是导致生殖内分泌轴紊乱。暴露于热应激的奶牛会经历一系列生理反应和内分泌改变，这些变化最终会损害其生殖功能。热应激会激活下丘脑-垂体-肾上腺轴（HPA轴），导致皮质醇等应激激素分泌增加，进而抑制下丘脑促性腺激素释放激素（GnRH）的脉冲式分泌，导致垂体前叶对GnRH的反应性降低，进而减少促黄体素（LH）和促卵泡素（FSH）

的合成与释放，进一步影响卵巢功能，表现为卵泡发育减弱、类固醇激素生成减少及血浆孕酮含量降低^[8]。这些内分泌紊乱与发情行为受损、卵母细胞发育能力下降和胚胎存活率降低密切相关。热应激不仅影响促性腺激素的分泌，还会降低卵巢本身对促性腺激素的敏感性，从而影响雌激素和孕酮的合成与分泌。这种影响具有持续性，即使热应激结束后，其效应仍会延续到凉爽的秋季，表现为类固醇生成受损、卵母细胞发育能力低下和生育力持续下降^[3]。

从分子机制看，热应激在关键生殖组织中引发复杂的分子反应。这些分子层面的改变构成内分泌紊乱的细胞基础。为应对这些挑战，研究者探索通过调节奶牛的内分泌环境来缓解热应激影响的可能途径。例如，补充特定的矿物或营养物质可能通过提升雌激素和孕酮等激素水平来改善热应激奶牛的受胎率，尽管这种方法尚未完全付诸实践^[4]。此外，定时人工授精、激素处理和胚胎移植等辅助生殖技术也被开发出来，作为在热应激期间避免或减轻内分泌及卵母细胞损伤的有效管理策略^[7, 8]。

2 热应激损害繁殖性能的分子与细胞学基础

2.1 氧化应激与细胞损伤

热应激是导致奶牛繁殖性能下降的关键环境因素，其核心机制之一是诱导机体发生氧化应激，进而对生殖细胞造成直接损伤。当奶牛处于高温环境时，为维持体温恒定，其基础代谢率与产热增加，导致体内氧化还原态失衡，产生过量的活性氧（ROS），进而损害卵母细胞和精子的质量，并干扰激素平衡^[9]。作为细胞应对热损伤的保护性反应，热休克蛋白（如HSP70）的表达会上调，但HSP70的持续高表达也可能干扰正常的细胞信号传导和凋亡途径，对细胞功能产生复杂影响^[10]。氧化应激的标志物，如丙二醛（MDA）水平升高，已被证实与繁殖性能下降直接相关，在早期妊娠奶牛中，热应激组的MDA水平显著高于舒适组，且与较低的受胎率

相关联^[11]。因此，增强机体的抗氧化能力是缓解热应激繁殖损害的重要途径。营养调控是有效的策略之一，例如补充植物多酚提取物可以富集脂肪组织中的Nrf2介导的氧化应激反应通路蛋白，改善奶牛在热应激下的表现和福利^[12]。同样，补充瘤胃保护性锌-蛋氨酸复合物能改善氧化状态，表现为更高的总抗氧化状态和更低的MDA水平，从而维持热应激期奶牛的产奶性能和繁殖状态^[13]。这些研究表明，通过营养干预调控氧化应激，是保护生殖细胞免受热损伤、提升繁殖效率的关键。

2.2 表观遗传编程与跨代效应

母牛在妊娠期遭受热应激，其影响远不止于当代，更可能通过表观遗传修饰机制对后代的生殖系统发育产生深远编程效应，即“胎儿起源假说”在热应激领域的具体体现。研究表明，干奶期热应激的母牛，其后代在出生后可能表现出卵巢储备功能下降、初情期延迟以及终身繁殖性能降低等问题，例如，在夏季（热应激）干奶的母牛，其妊娠期缩短，所产犊牛的血清中氧化应激和炎症反应指标升高，且母牛本身产后健康问题（如子宫炎）的发生率更高，产奶量损失更大^[14]。这提示热应激对胎儿发育的干扰具有阶段性敏感期。这种效应甚至可能具有跨代遗传特性，即祖母代经历的热应激，可能通过表观遗传记忆影响孙代的性状^[15]。

研究证实，干奶期热应激会改变母牛体内的炎症、氧化和代谢状态，并影响其获得性免疫，如降低初乳中免疫球蛋白G（IgG）的浓度^[15]。虽然该研究未发现宫内热应激直接影响后代犊牛在摄入初乳前的淋巴细胞百分比，但犊牛出生后即表现出更高的氧化应激和炎症指标，表明其已受到宫内环境的不利编程^[14]。这些发现强调了干奶期即妊娠后期，热应激管理对于奶牛群体遗传改良的极端重要性。通过为干奶期奶牛提供有效的降温措施，不仅可以改善当代母牛的围产期健康和繁殖恢复，更能优化后代的生殖系统发育编程，从根源上提升牛群的终身繁殖效率和遗传潜力，打破热应激造成的跨代恶性循环。

3 热应激的评估及其与繁殖性能的关联分析

3.1 环境与生理评估指标

温湿指数（THI）是评估奶牛热应激程度最常用的环境指标，其阈值研究对于精准管理至关重要。例如，在荷斯坦牛中，当THI达到76时，产奶量、乳脂蛋白比和受胎率开始显著下降^[16]。这表明THI 76是影响奶牛繁殖性能的一个关键阈值。然而，THI并非唯一的评估工具，其他热指数如综合气候指数（CCI）和有效温度指数（ETIC）也被用于评估，其中CCI在预测实际热应激水平及与生理反应（如体表温度）的相关性方面表现出色^[17]。

为了更精确评估个体热应激反应，生理指标如直肠温度、呼吸频率、唾液分泌指数以及血清皮质醇和热休克蛋白70（HSP70）浓度被用作直接的生物标志物^[18]。研究表明，热应激下奶牛的呼吸频率和体表温度显著升高，且这些指标与环境温度（Ta）高度相关，其中Ta与呼吸频率和体表温度的相关系数分别可达0.580和0.849^[17]。此外，血清HSP70和皮质醇浓度的升高是奶牛应对热应激的典型生理反应^[19]。除了生理指标，行为变化是热应激的早期敏感指标。在热应激条件下，奶牛会减少采食时间、增加站立时间，同时缩短反刍和休息时间，而这些行为的改变可以通过精准畜牧业传感器，如自动挤奶系统（AMS）、反刍项圈等进行实时监测。

3.2 繁殖性能指标对热应激的响应

热应激对奶牛繁殖性能的影响是深远且多方面的，显著降低了首次配种受胎率（FSCR）和总受胎率，并增加了每次受孕所需的配种次数。一项针对荷斯坦牛的大规模研究发现，在干奶期经历严重热应激（THI>80）的奶牛，其首次配种受胎率可急剧降至3.4%，而中度热应激（THI70~80）和无热应激（THI<70）组的受胎率分别为7.3%和9.5%；同样，所有配次的总受胎率在无热应激组最高（60.2%），而在严重热应激组最低（42.6%），且严重热应激组

每次受孕所需的平均配种次数显著增加^[20]。热应激还会延长产后生理周期，扰乱正常的发情周期。它显著延长了产后首次排卵间隔和产犊至受孕间隔，从而增加了空怀天数和产犊间隔^[21]。这种影响可能与热应激导致的能量负平衡、代谢紊乱以及子宫健康问题有关，这些问题共同阻碍了产后卵巢功能的及时恢复^[22]。值得注意的是，热应激对繁殖的影响存在显著的品种差异。研究表明，娟珊牛在THI>75时表现出比荷斯坦牛更强的繁殖耐热性，这种差异与其卵母细胞对热损伤的抵抗力更强有关；体外实验表明，在热应激条件下，荷斯坦牛的卵母细胞虽然核成熟率与娟珊牛无差异，但其胞质成熟受损更严重，表现为活性氧（ROS）水平更高、线粒体分布异常，这可能是其受胎率在高温下下降更陡峭的重要原因^[23]。

4 提升奶牛繁殖耐热性的遗传与营养策略

4.1 遗传选择与分子标记辅助育种

繁殖耐热性在奶牛中具有遗传基础，但其遗传力普遍较低。一项针对荷斯坦牛的研究利用多性状线性重复力模型分析发现，热应激条件下奶牛受胎率的遗传力估计值为2%~3%^[24]。这一低遗传力表明，环境因素对繁殖性能的影响巨大，使得通过传统育种方法进行遗传改良的进程相对缓慢^[25]。更为复杂的是，一般繁殖性能与耐热繁殖能力之间存在不利的遗传相关，其相关系数范围在-0.82~-0.35^[36]。这种负相关关系意味着，单纯选择提高一般繁殖性能的奶牛，可能会无意中降低其对热应激的耐受性，这为同时改良这两个性状带来了显著的挑战^[26]。因此，在育种规划中需要采用更为精细的策略来平衡生产性能与耐热性。

全基因组关联研究（GWAS）为解析热应激下繁殖性能的遗传机制提供了有力工具。通过GWAS，研究人员已在多个基因组区域鉴定出与热应激下受胎率显著相关的位点。例如，在荷斯坦牛中，发现了位于BTA1、BTA10、BTA11、BTA17、BTA21和BTA23上的多个基因组区域，这些区域包

含了一系列候选基因，如BRWD1、EXD2、EPAS1和NOS1等^[24]。这些基因的功能涉及广泛的生殖过程及细胞对热应激的反应，例如NOS1参与一氧化氮合成，可能在调节生殖道血流和胚胎着床中发挥作用。这些发现为通过分子标记辅助育种来改善奶牛的耐热繁殖能力奠定了重要的遗传学基础。

利用特定的分子标记进行基因组选择是提高奶牛耐热繁殖力的前瞻性策略。抗缪勒管激素（AMH）是反映卵巢储备和卵泡发育潜力的重要指标，但直接关于AMH基因在奶牛热应激中作用的研究在文献中未详细阐述，而分子标记辅助选择的原理已得到广泛应用^[27]。例如，在奶牛上，寻找与耐热性相关的关键基因并开发其分子标记是当前研究的热点。有研究通过关联分析发现，促甲状腺激素释放激素（TRH）、催乳素（PRL）及其受体（PRLR）基因的特定SNP位点与奶牛的繁殖性能及热应激反应性状显著相关^[28]。这些基因的有利单倍型可作为潜在的分子标记，用于筛选在热应激条件下仍能维持较好繁殖性能的个体，从而通过基因组选择实现对耐热繁殖力的快速遗传改良。

4.2 营养调控与添加剂应用

4.2.1 矿物质

补充关键矿物质是缓解热应激对奶牛繁殖负面影响的有效营养策略之一。热应激会导致奶牛体内矿物质大量流失，并扰乱内分泌平衡。尽管文献中未直接详述硒、铜、钾、镁、磷等矿物质对卵巢激素分泌的具体影响，但热应激对繁殖的整体损害机制已被广泛认知。热应激会引发全身性生理适应，包括代谢改变和氧化应激加剧，这些都会间接影响生殖功能^[29]。矿物质如硒是谷胱甘肽过氧化物酶的重要组成部分，在抗氧化防御中起着核心作用。而氧化应激是热应激损害卵母细胞和胚胎质量的关键因素^[30]。因此，通过日粮补充这些矿物质，理论上可以增强机体的抗氧化能力，保护生殖细胞免受氧化损伤，并可能通过稳定内分泌环境来改善雌激素和孕酮的分泌，从而最终提高受胎率。这需要结合具体的饲养试验数据来进一步验证和优化补充方案。

4.2.2 瘤胃保护胆碱（RPC）

添加瘤胃保护胆碱（RPC）是改善围产期奶牛代谢状态、间接支持繁殖性能的一种营养干预措施。围产期是奶牛能量负平衡和代谢疾病的高发期，而热应激会加剧这一阶段的生理挑战。RPC作为甲基供体和磷脂合成的组成部分，有助于肝脏脂肪代谢，预防脂肪肝，并改善能量平衡。一项关于热应激对奶牛影响的综述指出，热应激会导致干物质摄入量减少、代谢热负荷增加，从而引发一系列生理调整^[26]。在这种背景下，补充RPC可能通过改善肝脏功能和能量代谢，为维持正常的繁殖活动提供支持。然而，其效果并非绝对，会受到热应激强度、奶牛遗传背景以及整体饲养管理水平的综合影响。例如，遗传上耐热性更强的品种或个体可能从营养干预中获益更多。因此，在实际应用中，需要根据牛群的具体情况评估RPC添加的经济性和有效性。

4.2.3 植物提取物

使用植物提取物或多草药配方为处理热应激相关的繁殖障碍提供了潜在的天然解决方案。热应激常导致奶牛产后乏情期延长、发情表现不明显以及黄体功能受损。植物提取物中含有的多种生物活性成分，如多酚、黄酮类化合物和皂苷，具有抗氧化特性，可以帮助缓解热应激诱导的氧化应激，从而保护卵母细胞和胚胎^[31, 32]。同时，某些植物成分可能通过调节“下丘脑-垂体-性腺轴”的内分泌功能，影响促性腺激素的分泌，进而诱导发情并改善黄体功能，提高孕酮水平^[33]。例如，一些草药被认为具有植物雌激素活性或能够影响类固醇激素的代谢。虽然具体的植物配方及其在奶牛上的应用效果还需要进一步探索，但该领域的研究为开发替代或辅助于传统激素处理的方案提供了新思路，旨在更自然地恢复和改善热应激奶牛的繁殖周期。

5 综合管理与未来展望

5.1 环境管理与降温技术

物理降温是缓解奶牛热应激最基本且必需的核

心策略。高效的冷却系统对于维持夏季生产性能至关重要，研究证实，自动喷淋系统（SP）能有效降低奶牛体温，并显著提高干物质采食量（DMI）、产奶量及乳脂含量^[34]。这表明，通过技术手段主动干预奶牛所处的热环境，可直接改善其生理状态和生产表现。一项在巴基斯坦亚热带夏季进行的研究进一步比较了不同喷淋冷却方案的效果，发现每日进行四次冷却时段（4CS）的方案，尽管比连续冷却（CNT）方案节省了90%的用水，却能达到与CNT相似的产奶量，并且奶牛表现出更好的生理反应和福利状态（如更长的躺卧和采食时间）^[35]。这突显了优化降温技术参数（如频率和时长）在实现高效冷却与资源节约之间平衡的重要性。因此，风扇、喷淋和凉棚等物理降温措施不仅是任何旨在改善繁殖性能策略的先决条件，其科学设计与精准实施更是将夏季产奶量维持在接近冬季水平的关键。同时，优化饲养管理也是应对热应激不可或缺的一环。调整饲喂时间至一天中较为凉爽的时段，有助于减少因高温导致的采食抑制。保证充足、清洁的饮水供应是维持奶牛体温调节和基础代谢的基本需求。此外，提高日粮能量浓度和适口性，可以直接补偿因热应激而下降的采食量，为奶牛应对高温挑战提供必要的营养支持。这些综合性的环境与饲养管理措施，共同构成了抵御热应激的第一道防线。

5.2 瘤胃微生物组调控

瘤胃微生物的组成与功能与奶牛的热耐受性密切相关。研究表明，有效的降温措施不仅能改善奶牛的生产性能，还能正向调控其瘤胃微生物群落。例如，SP处理的奶牛，其瘤胃中纤维降解菌的相对丰度显著增加，这些细菌包括纤维杆菌属（*Fibrobacter*）、糖发酵菌属（*Saccharofermentans*）、毛螺菌属（*Lachnospira*）、假丁酸弧菌属（*Pseudobutyribrio*）、月形单胞菌属（*Selenomonas*）以及琥珀酸弧菌属（*Succinivibrio*）^[34]。这些微生物的增殖增强了纤维物质的降解能力，并促进了瘤胃发酵，具体表现为总挥发性脂肪酸（VFA）、乙酸、丙酸和丁酸水平的升高^[34]。这种以纤维降解菌和产短链脂肪酸菌

为主的稳定微生物群落，被认为是耐热奶牛的特征之一，其代谢活动有助于管理氧化应激并维持能量供应。此外，热应激还会通过改变瘤胃发酵模式影响乳成分，例如导致中短链脂肪酸（如C10:0和C14:1）浓度的增加，这反映了体内从头脂肪合成途径的增强和瘤胃发酵模式的转变^[36]。这些发现揭示了瘤胃微生物组在介导热应激反应中的核心作用。因此，通过外源性干预手段调控瘤胃微生态，有望成为提高奶牛整体抗热应激能力和繁殖韧性的新策略。补充益生菌、益生元或特定的饲料添加剂，旨在定向促进有益微生物菌群的定植与功能，增强瘤胃发酵的稳定性和效率，从而帮助奶牛在高温环境下维持更优的代谢健康和繁殖潜力。

5.3 繁殖管理程序优化

在热应激季节，奶牛的发情行为往往表现微弱或不规律，使得传统的发情观察和适时配种变得异常困难。此时，采用定时人工授精（FTAI）协议结合激素处理（如使用CIDR阴道栓进行同期化处理）成为一种有效的解决方案。该策略可以克服发情检测的难题，通过精确的激素程序控制卵泡发育和排卵时间，从而提高同期排卵率和受胎率。然而，单一的繁殖技术调整往往不足以完全抵消热应激带来的多重负面影响。因此，实施一个全面、多维的夏季繁殖管理方案显得至关重要。该方案的核心在于将高效的物理冷却、精准的营养补充、科学的激素处理以及持续的生理监测相结合。研究证实，高效的冷却系统是改善繁殖结局的先决条件，因为它能直接缓解核心体温升高对卵母细胞质量、胚胎发育和妊娠维持的损害^[34]。同时，需要加强营养管理，特别是通过调整日粮来应对采食量下降和代谢需求变化，为繁殖系统功能的正常发挥提供了物质基础。热应激会改变奶牛的代谢状态，进而影响乳脂脂肪酸组成，这间接反映了机体所处的应激水平和代谢调整^[36]。因此，对乳成分或血液指标进行监测，可以作为评估奶牛热应激程度和营养干预效果的辅助工具。综上所述，一个整合了环境控制、营养调控、繁殖技术和管理监测的综合策略，远比依赖任

何单一措施更能有效减轻热应激对奶牛繁殖性能的负面影响,保障夏季繁殖效率的稳定。

参考文献

- [1] 郑蒙蒙.热应激对奶牛机体的影响及预防应对措施[J].中国奶牛, 2025 (4): 5-9.
- [2] Huber E, Notaro U S, Recce S, et al.Fetal programming in dairy cows: Effect of heat stress on progeny fertility and associations with the hypothalamic-pituitary-adrenal axis functions[J].Animal Reproduction Science, 2020, 216: 106348.
- [3] Roth Z.Heat stress reduces maturation and developmental capacity in bovine oocytes[J].Reproduction, Fertility and Development, 2021, 33 (2): 66-75.
- [4] Hansen P J.Reproductive physiology of the heat-stressed dairy cow: Implications for fertility and assisted reproduction[J].Animal Reproduction, 2019, 16 (3): 497-507.
- [5] 徐竞宏, 王少华, 李爽, 等.热应激对奶牛卵母细胞及早期胚胎发育潜能的影响研究进展[J].中国畜牧杂志, 2024, 60 (5): 1-7.
- [6] Amaral C S, Koch J, Correa Júnior E E, et al.Heat stress on oocyte or zygote compromises embryo development, impairs interferon tau production and increases reactive oxygen species and oxidative stress in bovine embryos produced in vitro[J].Molecular Reproduction and Development, 2020, 87 (8): 899-909.
- [7] Baruselli P S, Ferreira R M, Vieira L M, et al.Use of embryo transfer to alleviate infertility caused by heat stress[J].Theriogenology, 2020, 155: 1-11.
- [8] Roth Z.Reproductive physiology and endocrinology responses of cows exposed to environmental heat stress - Experiences from the past and lessons for the present[J].Theriogenology, 2020, 155: 150-156.
- [9] 付建中, 陈玉武, 庄佳荣, 等.热应激对奶牛的损伤机制及调控措施的研究进展[J].饲料研究, 2025, 48 (5): 169-174.
- [10] Cartwright S L, McKechnie M, Schmied J, et al.Effect of in-vitro heat stress challenge on the function of blood mononuclear cells from dairy cattle ranked as high, average and low immune responders[J].BMC Veterinary Research, 2021, 17 (1): 233.
- [11] 贺秋月.热应激对初配期荷斯坦青年母牛繁殖性能和健康状况的影响[D].呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [12] Daddam J R, Daniel D, Kra G, et al.Plant polyphenol extract supplementation affects performance, welfare, and the Nrf2-oxidative stress response in adipose tissue of heat-stressed dairy cows[J].Journal of Dairy Science, 2023, 106 (12): 9807-9821.
- [13] 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].Frontiers in Veterinary Science, 2022, 9: 935939.
- [14] Akköse M, Vural M R.Effect of season during late gestation on metabolic alterations, inflammatory response, and oxidative stress status in dairy cows and offspring[J].Theriogenology, 2025, 249: 117601.
- [15] Akköse M, Kanca H, Hoşbul T, et al.The effect of dry-period heat stress on inflammatory, oxidative and metabolic alterations, and acquired immunity in dairy cows and offspring[J].The Veterinary Journal, 2026, 315: 106550.
- [16] Boonkum W, Teawyoneyong W, Chankitisakul V, et al.Impact of heat stress on milk yield, milk fat-to-protein ratio, and conception rate in Thai-Holstein dairy cattle: A phenotypic and genetic perspective[J].Animals (Basel), 2024, 14 (20) .
- [17] Yan G, Li H, Zhao W, et al.Evaluation of thermal indices based on their relationships with some physiological responses of housed lactating cows under heat stress[J].International Journal of Biometeorology, 2020, 64 (12): 2077-2091.
- [18] Li M, Wang Z, Ma Z, et al.Metagenomic analysis reveals microbial drivers of heat resistance in dairy cattle[J].Animal Microbiome, 2025, 7 (1): 35.
- [19] Liu S, Yue T, Ahmad M J, et al.Transcriptome analysis reveals potential regulatory genes related to heat tolerance in Holstein dairy cattle[J].Genes (Basel), 2020, 11 (1) .
- [20] Rodríguez-Godina I J, García J E, Morales J L, et al.Effect of heat stress during the dry period on milk yield and reproductive performance of Holstein cows[J].International Journal of Biometeorology, 2024, 68 (5): 883-890.
- [21] Triwutanon S, Rukkamsuk T.Factors affecting first ovulation in postpartum dairy cows under tropical conditions: A review[J].Open Veterinary Journal, 2023, 13 (12): 1536-1542.
- [22] Triwutanon S, Rukkamsuk T.Factors associated with negative energy balance in periparturient dairy cows raised under tropical climate of Thailand-A mini-review[J].Journal of Advanced Veterinary and Animal Research, 2021, 8 (3): 378-387.
- [23] Lee J, Kim D, Son J, et al.Effects of heat stress on conception in Holstein and Jersey cattle and oocyte maturation in vitro[J].Journal of Animal Science and Technology, 2023, 65 (2): 324-335.
- [24] Sigdel A, Liu L, Abdollahi-Arpanahi R, et al.Genetic

- dissection of reproductive performance of dairy cows under heat stress[J].Animal Genetics, 2020, 51 (4) : 511-520.
- [25] Fathoni A, Boonkum W, Chankitisakul V, et al.An appropriate genetic approach for improving reproductive traits in crossbred Thai-Holstein cattle under heat stress conditions[J]. Veterinary Sciences, 2022, 9 (4) .
- [26] Cartwright S L, Schmied J, Karrow N, et al.Impact of heat stress on dairy cattle and selection strategies for thermotolerance: A review[J].Frontiers in Veterinary Science, 2023, 10: 1198697.
- [27] 李荣岭.奶牛耐热性多组学分析及耐热基因鉴定[D].武汉: 华中农业大学, 2023.
- [28] Fang Q, Zhang H, Gao Q, et al.Association of genes TRH, PRL and PRLR with milk performance, reproductive traits and heat stress response in dairy cattle[J].International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26 (5) . DOI:10.3390/ijms26051963.
- [29] Rhoads M L.Review: Reproductive consequences of whole-body adaptations of dairy cattle to heat stress[J].Animal, 2023, 17 (Suppl 1) : 100847.
- [30] Khan A, Khan M Z, Umer S, et al.Cellular and molecular adaptation of bovine granulosa cells and oocytes under heat stress[J].Animals (Basel) , 2020, 10 (1) : 110.
- [31] Shaleh I, Kim S W, Park T S, et al.Mechanistic understanding of heat stress in cattle reproduction toward pharmacological strategies[J].Animal Bioscience, 2025.
- [32] 李志忠, 余淼, 吕继蓉, 等.植物精油缓解奶牛热应激效果的研究进展[J].中国乳业, 2023 (2) : 53-57.
- [33] Batool I, Kausar R, Hussain T.Heat stress-induced dysregulation of bovine reproduction: A focus on corpus luteum and progesterone perspectives[J].Journal of Thermal Biology, 2025, 131: 104201.
- [34] Liu E, Liu L, Zhang Z, et al.An automated sprinkler cooling system effectively alleviates heat stress in dairy cows[J].Animals (Basel) , 2024, 14 (17) : 2586.
- [35] Bah M, Javed K, Pasha T N, et al.Performance of Holstein cows subjected to different cooling sessions during subtropical summer[J].Animal Bioscience, 2022, 35 (11) : 1800-1807.
- [36] Martínez Díez E N, Muño Otero R, Castillo Rodríguez C, et al.Seasonal heat stress and the postpartum stage interactively influence milk fatty acid composition in Holstein dairy cows in Spain[J].Animals (Basel) , 2025, 15 (21) : 3119.