

天然植物提取物防治热应激研究现状 及其功能性食品应用开发展望

谭若曦, 许佳新, 张丽冰, 马博文, 李鹏飞, 王欣*, 吕欣*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨陵 712100)

摘要: 热应激是因长时间暴露于高温环境引发的一系列生理、生化和行为适应性反应的总称, 严重时可导致多器官损伤甚至危及生命。我国幅员辽阔, 涵盖大面积高温高湿区域, 随着全球气候变暖加剧, 热应激对于特殊地域人群公共营养健康的影响日益突出。天然植物资源在传统膳食中被广泛应用于热应激的防治, 其提取物因安全、营养、多靶点调节等优势, 在这类功能性食品开发中展现出广阔前景。因此, 本文基于热应激对机体主要损伤机制的系统梳理, 归纳分析了具有防治热应激功能的植物提取物活性成分及其关键作用机制, 并在此基础上分析了植物提取物在功能性食品开发中面临的活性成分稳定性、食品加工难点、标准质量控制体系缺失等关键问题, 并从组方协同、剂型设计优化、标准化质量控制方法等方面提出了未来发展方向, 以期防治热应激功能性食品的未来研发提供理论参考。

关键词: 热应激; 植物提取物; 活性成分; 功能性食品

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0644

Research Status of Natural Plant Extracts for the Prevention and Treatment of Heat Stress and Prospects for Their Development and Application in Functional Foods

TAN Ruoxi, XU Jiaxin, ZHANG Libing, MA Bowen, LI Pengfei, WANG Xin*, LYU Xin*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Heat stress is a general term for a series of physiological, biochemical, and behavioral adaptive responses caused by prolonged exposure to high-temperature environments. Severe heat stress can lead to multiple organ damage or even life-threatening consequences. China has a vast territory covering large areas with high temperature and high humidity. With the intensification of global climate warming, the impact of heat stress on the public nutritional health of populations in specific regions has become increasingly prominent. Natural plant resources are widely used in traditional diets for the prevention and treatment of heat stress. Their extracts show broad prospects in the development of such functional foods due to their advantages of safety, nutrition, and multi-target regulation. Therefore, based on a systematic review of the main damage mechanisms of heat stress on the body, this paper summarizes and analyzes the active ingredients of plant extracts with heat stress prevention and treatment functions and their key mechanisms of action. On this basis, key challenges in the development of functional foods from plant extracts are analyzed, including the stability of active ingredients, food processing difficulties, and the lack of standardized quality control systems. Future development directions are proposed in terms of formula synergy, formulation design optimization, and standardized quality control methods, aiming to provide theoretical references for the future research and development of functional foods for heat stress prevention and treatment.

Keywords: heat stress; plant extracts; active ingredients; functional foods

我国地域辽阔, 从南到北跨越六个温度带, 气候类型复杂。其中海南岛、长江流域及四川盆地等高温高湿、

收稿日期: 2026-04-24; 修回日期: 2026-06-18; 接受日期: 2026-06-18

作者简介: 谭若曦 (2004-), 女, 本科生, 研究方向: 植物天然产物提取及其活性开发, E-mail: tanruoxi@nwfafu.edu.cn

通讯作者: 王欣 (1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 功能食品开发及食品加工及副产物高值利用, E-mail: wangxin_2018@nwsuaf.edu.cn; 共同通讯作者:

吕欣 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能食品开发, E-mail: xinlu@nwsuaf.edu.cn

静风闷热地区易引发机体热应激,且随全球变暖加剧。热应激是指由于长时间暴露在高温环境中而引起的一系列生理、生化和行为适应性反应的总和,常伴随高湿环境,使机体获得的热量超过自身的散热能力^[1],机体正常热平衡被破坏并出现生理机能紊乱^[2]。其主要表现为体温升高、心率加快、水盐代谢紊乱、氧化应激损伤及炎症反应等,轻度会导致疲劳、注意力下降、工作效率降低等,而长期或重度暴露则可能引发热射病、多器官功能损伤,甚至危及生命^[3]。

目前的热应激防治措施主要包括物理降温、补液和药物治疗三种:物理降温通过冷水浴等迅速降低机体体温以维持机体热平衡并减少热损伤;补液是指向机体补充水分和电解质来维持体液平衡,防止机体过度散热导致的脱水和电解质紊乱;而药物治疗则借助镇静剂、维生素及中草药等维持机体正常代谢与功能,缓解热应激造成的伤害^[4-7]。其中物理降温与补液措施以缓解热应激外在症状为主,难以修复细胞损伤及炎症等病理问题^[8];药物治疗虽然效果相对显著,但针对性药物种类仍十分缺乏,且药物副作用和机体抗药性的产生限制了其日常使用范围^[9]。因此,探究新型、安全、高效的热应激防治手段,对完善热应激防控体系具有重要研究意义。

我国天然植物资源丰富,在中医药与传统膳食中扮演了重要角色。南方人民在适应高温高湿环境的长期过程中,形成了以植物提取物为特色的消暑饮食传统,如凉茶、金银花露、酸梅汤等,具有清热解暑、生津止渴的功效^[10],能缓解机体轻度热不适症状。这些植物提取物中富含多糖、多酚、皂苷等活性成分,可通过抗氧化、抗炎、调节代谢等途径减轻热应激损伤,且相较化学药物具备营养补充、安全性高、副作用小等优势,在功能食品开发中前景广阔^[11,12]。然而针对热应激防治,当前市场上以植物提取物为核心成分的功能性食品种类较少,整体研究与开发亟待加强。

综上所述,本文在系统梳理热应激对机体主要损伤机制的基础上,分析归纳了具有防治热应激功能的植物种类、活性成分及作用机制等信息与当前的研究现状及应用进展,并结合高温高湿地区居民的特殊营养需求探讨以植物提取物为核心的功能食品开发方向。同时明确植物提取物在防治热应激中的关键作用靶点与功效基础,为产品研发中功效保障、剂型设计等关键技术研发提供参考,以期推动防治热应激功能食品的开发与应用。

1 热应激对机体主要损伤机制

热应激会引发机体组织、器官的代谢紊乱与功能障碍^[11,13],其对机体的热损伤机制是一个复杂的过程,明确热应激对机体的损伤机制是防治热应激危害的基础与前提,如图1所示,本文系统的梳理了热应激对机体的损伤作用机制,为热应激的有效防治提供基础信息。

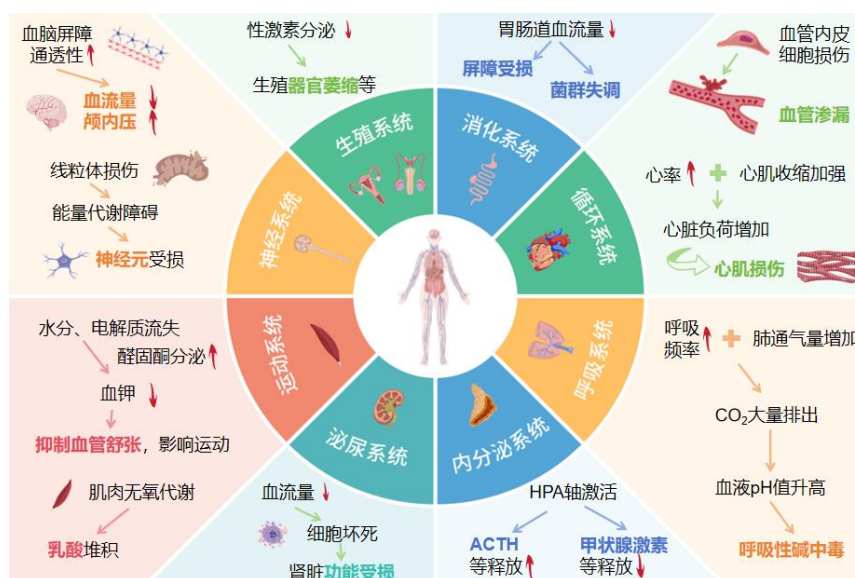


图1 热应激对机体的主要损伤机制

Fig.1 Main damage mechanisms of heat stress on the body

1.1 消化系统

消化系统是热应激损伤的早期靶点之一,其损伤主要体现在胃肠道黏膜损伤和胃肠道菌群失调这两个方面^[14]。

当机体处于热应激状态时,大量血液流向体表以增加散热而流经胃肠道的血流量显著减少,从而导致肠黏膜缺血缺氧,肠道黏膜上皮细胞受损且再生能力下降,不能及时更新,最终导致肠道屏障受损。肠黏膜受损后,原本紧密的细胞连接出现缝隙,肠道通透性增加,肠道内病原体和内毒素得以穿过肠壁进入血液循环^[15,16],可能引发全身性炎症反应甚至多器官衰竭。

其次,热应激会破坏肠道菌群的平衡^[8],有益菌如乳酸杆菌、双歧杆菌水平减降低,而致病菌群数量增加^[17];且肠黏膜的损伤会大大增加机体被致病菌侵袭的概率^[14],进一步破坏肠道健康。已有研究表明,在热应激条件下沙门氏菌更容易打破肉鸡肠黏膜屏障,进而进入脾脏并诱发炎症反应^[18]。

此外,热应激还可抑制胃肠道蠕动和消化液分泌,使机体消化功能受到抑制。消化系统血流的减少除了会减少唾液、胃液、胰液和胆汁等消化液分泌,还会减弱胃肠道蠕动能力,导致食物排空延迟,引起腹胀、食欲不振,进一步造成营养摄入不足和消化吸收不良^[19,20]。

1.2 循环系统

在高温环境下,机体为了增强散热充分调动循环系统。当热负荷超过调节极限时体温失控升高,将直接损伤血管内皮细胞,导致毛细血管渗漏、凝血系统激活,可能引发全身炎症反应综合征,出现微循环障碍,进而导致弥漫性血管内凝血和多器官功能障碍综合征^[13]。与此同时,脱水导致的血液浓缩和粘稠化加大了血流阻力,更易形成血栓,引发血管阻塞、器官缺血或坏死,严重时可导致猝死;在微循环中,血液粘稠与血细胞变形能力的下降可能导致微小血管堵塞,加剧组织缺氧。

心脏是维持血液循环和调节体温的核心器官^[20],机体依靠其收缩与舒张完成泵血功能,为各组织器官提供营养与氧气,完成物质和气体交换。心脏对热敏感,当机体遭受热应激刺激时,心脏是遭受损伤的首要器官,其损伤也是导致动物死亡的重要因素。热应激引起的交感-肾上腺髓质轴兴奋使得机体心率加快、心肌收缩加强,显著增加心脏的负荷,极易导致心肌损伤。而高温条件下大量出汗丢失的水分和随汗液排出流失的钠、钾等电解质导致的血容量下降会进一步减少流经各组织器官的血流量,机体通过代偿性作用加快心率并增加心输出量,持续加重心脏负担^[14]。

1.3 呼吸系统

呼吸系统既是机体散热的重要参与者,也是热刺激下极易受损的靶器官。动物在热应激环境下通过加快呼吸频率、增多肺通气量来增加呼吸道的蒸发与对流散热^[21],而伴随过快呼吸频率排出的大量 CO₂ 导致血液中碳酸浓度下降、pH 值升高,易引发呼吸性碱中毒,损伤组织器官^[22]。且高频率呼吸大大提高了呼吸肌的运动强度,肌肉运动大量产热对呼吸系统造成二次伤害^[14]。

1.4 内分泌系统

热应激对内分泌系统的损伤本质上是高温刺激下机体神经-内分泌网络从代偿走向失代偿的过程,它通过扰乱激素的合成、分泌与调节破坏内分泌系统的整体平衡。当机体核心体温升高时,外周神经将热刺激传入中枢神经系统,激活下丘脑-垂体-肾上腺轴,下丘脑分泌促肾上腺皮质激素释放激素(Corticotropin-releasing Hormone, CRH)以刺激垂体前叶分泌促肾上腺皮质激素(Adrenocorticotrophic Hormone, ACTH),使血液中 ACTH 水平升高并经血液循环流入肾上腺,皮质激素的合成与释放增加,以增强机体对不利环境的抵抗能力^[23]。下丘脑-垂体-甲状腺轴与下丘脑-垂体-性腺轴同样受到影响^[24],高温下机体内甲状腺激素分泌减少以降低体内基础代谢产热,维持产热与散热平衡^[22];血浆孕酮、睾酮和雌二醇等性激素水平降低,影响动物生殖功能^[25]。

1.5 泌尿系统

肾脏是机体调节体液和排泄废物的器官,其主要功能是生成尿液并通过滤过作用排除血液中的代谢废物和多余水分。高温环境下内脏与皮肤间的血流重新分配和脱水导致的机体有效循环血容量减少使得肾脏血流量急剧下降,细胞因缺氧而发生坏死;且细胞代谢产生的废物及有毒物质无法及时排出、滞留体内,严重影响肾脏功能,造成泌尿器官的损伤^[14,26]。

1.6 运动系统

高温下机体大量出汗会导致水分和电解质严重流失,醛固酮分泌增加促使机体进一步保钠排钾,造成血钾水平降低。低钾血症严重时会抑制血管舒张,造成肌痉挛、肌肉缺血,进而导致肌肉溶解^[27],影响动物运动能力。其次,在高温环境下肌肉需要大量血液供应以散热和维持运动,但全身血容量却因脱水而下降,导致肌肉组织缺血缺氧,能量代谢紊乱。细胞无氧代谢增强,乳酸堆积^[28],肌肉能量合成效率降低,表现为收缩无力、易疲劳,严重时丧失运动能力。热打击对肌细胞还具有直接的细胞毒效应,过高的温度会使骨骼肌细胞中酶的活性降低、能量代谢障碍、功能蛋白变性,继而出现细胞膜完整性受损^[29]。

1.7 神经系统

中枢神经系统对高温和缺血缺氧敏感^[30],其损伤是多机制共同作用的结果。热损伤可直接导致血脑屏障通透性增加,引发血管源性脑水肿并造成脑血流量减少、颅内压增高;同时,热损伤触发的全身炎症反应会释放大炎症因子,直接或间接损伤神经细胞与血管内皮细胞,进一步引发细胞性和血管性脑水肿;高热还会造成血管内皮细胞损伤,促进脑内微血栓形成,导致脑血流量减少、脑灌注不足,引发广泛的脑缺血缺氧;此外,热可直接造成神经细胞线粒体损伤,导致能量代谢障碍,引发细胞水肿、凋亡甚至坏死;而热应激导致的肠屏障损伤会使内毒素入血,进一步放大炎症反应,形成肠损伤-炎症-脑损伤的恶性循环,最终加剧中枢神经系统的病理损害^[31]。

1.8 生殖系统

对雄性而言,其生殖器官睾丸对温度极为敏感,通常需要低于体温的环境才能正常生精^[32]。热应激会使雄性动物睾丸萎缩、生精小管结构损伤,导致精子浓度和活力下降、畸形率升高、睾酮分泌减少^[33,34]。而热应激对雌性生殖器官的主要影响在于损伤子宫、影响卵泡发育等方面,也会导致促性腺激素分泌紊乱,引发排卵障碍、月经周期异常等问题。卵母细胞质量下降、母体受孕率降低,即使成功妊娠,高温刺激也会影响胚胎着床和发育^[21,23]。

综上所述,热应激对机体的损伤具有全身性、多系统、级联放大的特点。其早期以胃肠道、循环、呼吸等系统的急性缺血缺氧与功能紊乱为主,进而引发氧化应激过度、炎症反应失控、肠道屏障破坏、内毒素入血等病理过程;随后损伤由外周向中枢、生殖、内分泌、泌尿、运动等系统扩散,导致神经-内分泌-免疫网络紊乱、组织器官结构性损伤与代谢衰竭。整体表现为从代偿适应、功能紊乱、器质性损伤最后多器官衰竭的递进式损伤链条,是高温环境下机体健康受损与热相关疾病发生发展的核心病理基础。

2 天然植物提取物在热应激防治中的应用与该类功能性食品开发现状

植物提取物是指通过水提法、醇提法或超临界流体萃取等手段从植物中提取得到的活性成分,来源广泛、毒副小、不易残留、功能多样的优势使其成为国内外研究者探究防治热应激新策略的重要原料来源^[12]。已有研究表明,许多植物提取物具有显著的热应激防治效果,其来源广泛,涵盖了传统中草药(人参、白术、黄连、绞股蓝等)、药食同源植物(姜黄、金银花、黄芪、薄荷、肉桂、山楂等)及果蔬(西瓜、番茄、辣椒等)等诸多类别(详见表1)。

表 1 常见植物提取物活性成分类别、功能、关键机制、主要检测指标与评价模型

Table 1 Categories, functions, key mechanisms, main detection indicators, and evaluation models of active ingredients in common plant extracts							
类别	活性成分	来源	主要功效	功效评价模型	关键作用机制	主要检测指标	参考文献
多酚类	姜黄素、绿豆多酚、绿原酸、苦参总黄酮、二氢杨梅素、原儿茶酸、牡荆素、黄芩苷等	姜黄、绿豆、金银花、苦参、显齿蛇葡萄、杜仲、山楂、黄芩等	抗氧化、调控热休克蛋白表达、抗炎、改善线粒体功能、增强肠道屏障等	奶牛乳腺上皮细胞、人结直肠腺癌细胞（Caco-2 细胞）、雄性昆明种小鼠、肉鸡			[10,35-41]
多糖类	黄芪多糖、白术多糖、茶多糖、蒲公英多糖、绞股蓝多糖等	黄芪、白术、茶叶、蒲公英、绞股蓝等	抗氧化、抗炎、调节代谢、调节肠道菌群、增强免疫力等	荷斯坦牛、鸡、西门塔尔牛、DLY 三元杂交猪、昆明雌性小白鼠		ROS、MDA、ATP、ATP 酶、热休克	[42-46]
皂苷类	人参皂苷、酸枣仁皂苷等	人参、酸枣等	抗氧化、神经内分泌调控等	雄性 C57 小鼠、小鼠精母细胞（GC-2spd(ts)）、爱拔益加肉鸡	激活 Nrf2、TRPV1/PKA/UCP2、Keap1/Nrf2，抑制 NF-κB、NLRP3、	蛋白、凋亡相关蛋白、抗氧化酶、炎症因子、线粒体膜电位、紧密连接蛋白、	[33,47]
挥发油类	肉桂醛、薄荷精油等	肉桂、薄荷等	抗氧化、增强肠道屏障、增强免疫力、抗炎等	817 肉公鸡、DLY 三元杂交猪	TLR4/p38、JNK/p38MAPK、Fas/FasL 信号通路。降低 ROS 水平、葡萄糖与氨基酸代谢调控等	激素、血清代谢物、免疫指标、肠道形态与通透性、细胞活力、核心体温、肠道菌群等	[48,49]
生物碱类	甜菜碱、小檗碱等	甜菜、黄连等	抗氧化、调节肠道菌群、提高消化酶活性、神经内分泌调控、调控热休克蛋白表达、抗炎等	山羊胎盘滋养层细胞（GTCs）、爱拔益加肉鸡、ICR 小鼠、大鼠肾上腺嗜铬细胞（PC12 细胞）			[50,51]
其它	西瓜籽多肽、番茄红素、L-茶氨酸、辣椒素等	西瓜、番茄、茶叶、辣椒等	抗氧化、抗炎、神经内分泌调控、调控热休克蛋白表达、提高消化酶活性、增强肠道屏障、调节肠道菌群等	SD 雄性大鼠、人肝癌细胞（HepG2 细胞）、雄性 ICR 小鼠、雄性 C57 小鼠			[8,52-54]

2.1 热应激防治活性成分主要类别及其活性

2.1.1 多酚类

植物多酚是植物的次生代谢产物,结构上包括1个或多个含有至少1个羟基取代基的芳香环,它是植物提取物中最常见的主要活性成分之一,广泛存在于蔬菜、水果、谷物及草本植物中^[55],具有抗氧化、抗菌、缓解炎症、调节糖脂代谢等多重功效^[56]。多酚类化合物富含酚羟基,能够直接与细胞中过量积累的自由基发生反应并使其转化为较稳定的分子结构,从而减少氧化损伤^[57,58];它还能螯合铁离子、铜离子等金属离子以降低其催化活性,减少氧化还原反应中自由基产生的同时提高机体内源性抗氧化酶的活性^[56,59],具有强抗氧化活性,可有效防治热应激。如姜黄素通过维持线粒体膜电位,调控热休克转录因子1(*Heat Shock Transcription Factor 1*, *HSF1*)和热休克蛋白70(*Heat Shock Protein 70*, *HSP70*)表达,激活核因子E2相关因子2(*Nuclear Factor Erythroid 2 Related Factor 2*, *Nrf2*)信号通路等途径减轻热应激所致的奶牛乳腺上皮细胞氧化应激与凋亡^[35];绿原酸在促进热应激条件下奶牛乳腺上皮细胞的总抗氧化能力、超氧化物歧化酶(*Superoxide Dismutase*, *SOD*)、过氧化氢酶(*Catalase*, *CAT*)和谷胱甘肽过氧化物酶(*Glutathione Peroxidase*, *GSH-Px*)水平恢复的同时减少活性氧(*Reactive Oxygen Species*, *ROS*)的产生,缓解热应激引起的细胞氧化应激^[36];苦参总黄酮通过抑制肿瘤坏死因子- α (*Tumor Necrosis Factor- α* , *TNF- α*)和白介素17(*Interleukin-17*, *IL-17*)的表达,降低一氧化氮(*Nitric Oxide*, *NO*)水平及增加ATP酶活性来提高抗氧化能力,改善生精功能,对热应激引起的小鼠睾丸组织损伤发挥改善作用^[37]。

2.1.2 多糖类

植物多糖又称植物多聚糖,是植物细胞代谢产生的聚合度超过10个的聚糖,由相同或不同的单糖通过 α -或 β -糖苷键连接而成,广泛存在于植物的根、茎、叶及果实中,具有增强免疫力、调节血糖和血脂、抗氧化、抗凝血及改善肠道菌群等多种生物活性^[60,61]。蒲公英多糖能显著提高热应激下三元杂交猪血清中总蛋白与白蛋白含量、总抗氧化能力和SOD活性,降低尿素氮和丙二醛(*Malondialdehyde*, *MDA*)含量;绞股蓝多糖可改善热应激昆明雌性小白鼠卵巢中促性腺激素释放激素(*Gonadotropin Releasing Hormone*, *GnRH*)、雌二醇(*Estradiol*, *E2*)和孕酮(*Progesterone*, *P4*)等生殖激素水平,正向调节下丘脑-垂体-卵巢轴,缓解卵巢损伤^[46]。

2.1.3 皂苷类

皂苷是一类由皂苷元与糖链通过糖苷键连接形成的化合物,主要分布于人参、甘草等陆地高等植物中,其生物活性主要包括抗炎、抗氧化和抗衰老等^[62,63]。以酸枣仁皂苷为例,它能作用于下丘脑,对4、6周龄热应激肉鸡下丘脑神经肽Y(*Neuropeptide Y*, *NPY*)、刺鼠相关蛋白(*Agouti-related Protein*, *AgRP*)、黑素受体4(*Melanocortin 4 Receptor*, *MC4R*)、阿片黑素细胞皮质素原(*Proopiomelanocortin*, *POMC*)和4-氨基丁酸A型 $\alpha 1$ 受体(γ -*Aminobutyric Acid A Receptor $\alpha 1$* , *GABA_{A- $\alpha 1$}*)等采食基因表达有调控作用,缓解了热应激造成的负效应^[47];人参皂苷Rg1防治热应激小鼠睾丸损伤的活性则与调控Nrf2抗氧化信号通路相关^[33]。

2.1.4 挥发油类

挥发油也称为精油,是存在于植物体内的一类具有挥发性、可随水蒸气蒸馏、与水不相混溶的油状液体。其主要成分包括醇类、萜类、酯类等挥发性小分子化合物,常见的提取方法有水蒸气蒸馏法和超临界流体萃取等。挥发油具有多方面的生物活性,常用于治疗和缓解多种疾病,如抗菌、抗炎、促进消化等。肉桂醛被证实能缓解热应激下肉鸡直肠温度的升高,提高机体抗氧化能力,并通过改善肠道通透性和形态结构来维持肠道健康^[48];薄荷提取物可以改善热应激条件下断奶仔猪生长性能,提高血清抗氧化和免疫性能,对炎症和热应激相关基因表达量具有显著影响^[49]。

2.1.5 生物碱

生物碱是一类含氮的碱性有机化合物,大多具有复杂的环状结构,氮素多包含在环内,有显著的生物活性,是中草药中重要的有效成分之一,同样具有抗炎抗菌抗氧化,增强免疫功能和降血压等作用。添加1 mmol L⁻¹甜菜碱可通过提高对热应激山羊胎盘滋养层细胞的抗氧化能力、减少脂质过氧化进而缓解热应激诱导的细胞凋亡^[50];而小檗碱不仅可以通过抑菌抗炎作用产生解热效应,还可以通过抑制TNF- α 的表达调节由于物理环境导致的体温变化^[51]。

2.1.6 其它

除了上述化合物种类,植物提取物中一些其他类别的活性成分也能缓解动物的热应激损伤。如西瓜籽多肽能

通过抗氧化、炎症、凋亡、热休克反应等多途径提高大鼠的热应激耐受性,有效调控大鼠肝脏热应激损伤^[8];而辣椒素补充通过激活瞬时受体电位香草酸亚型 1 (*Transient Receptor Potential Vanilloid 1, TRPV1*)/蛋白激酶 A (*Protein Kinase A, PKA*)/线粒体解偶联蛋白 2 (*Uncoupling protein 2, UCP2*)和 kelch 样 ECH 相关蛋白 1 (*Kelch-like ECH-associated Protein 1, Keap1*)/Nrf2 代谢途径等方式提高了热应激 C57 小鼠的肠道抗氧化能力,并抑制其炎症反应^[54]。

上述各类活性成分均展现出防治热应激的潜力,但它们在安全性、稳定性、食品加工适配性等方面存在显著差异,需根据具体应用需求进行合理选择。多酚类化合物普遍存在热稳定性差、易氧化等问题,在食品开发中更适合采用低温加工或微胶囊技术以提高其稳定性^[64,65];多糖则以低毒性、高生物利用度和稳定性为优势,易于加工和改性、具有良好溶解性^[66,67];多数皂苷味苦,限制了其在口服液或软饮中的应用,且热处理、酸碱、内源酶易引发皂苷水解或异构,部分具有溶血活性等副作用^[68,69];挥发油则因含有丰富的芳香化合物,挥发性强、水溶性差、遇光热氧易变质,难以直接配制成水基药剂,需采用微胶囊封装或纳米乳化等技术以保持活性^[70,71];生物碱类难溶于水,pH 值变化会导致其结构发生复杂变化进而影响功能,且部分具有生理毒性,高剂量使用时存在安全风险^[72,73],需严格控制剂量。

2.2 热应激防治功能评价模型

2.2.1 动物模型

动物模型是评价植物提取物防治热应激功效的核心工具,能够综合反映提取物对热应激动物生产性能、生理机能、组织损伤及整体健康的影响。现有研究中以鸡、猪、反刍动物(牛、羊)等经济动物和老鼠为主要模型动物,通过人工气候室或季节性自然高温构建热应激环境,系统评价提取物的干预效果。鸡等家禽因体温高、代谢旺盛、无汗腺,对热应激极为敏感^[11],是研究植物提取物抗热应激效果的常用模型之一;猪和反刍动物(牛、羊)等经济动物常用于研究植物提取物缓解热应激对生长性能、生殖机能及泌乳性能损伤等;而老鼠模型因其成本低、周期短、遗传背景清晰的特点广泛用于初步功效筛选和机制验证^[74]。

2.2.2 细胞模型

细胞模型通过体外模拟高温环境,可以在排除神经体液调节干扰的条件下直接观察提取物对特定细胞类型的保护作用,并从基因和蛋白水平解析其作用靶点,是研究植物提取物防治热应激分子机制的高效工具,常用动物原代细胞和永生化细胞系。

2.3 该类功能性食品开发进展

现有研究已证实多种天然植物提取物具备良好的热应激防治功效,但其功效评价与应用研究多集中于鸡、猪、反刍动物等经济动物模型,相关人体试验与临床营养研究较为匮乏,部分提取物中核心功效物质及其作用机制尚未明确,难以有效支撑其功能食品的开发与产业化应用。整体而言,植物提取物在热应激防治功能食品领域的研究仍处于初步探索阶段,现有研究多局限于单一植物原料或特定单体活性成分的功效验证,多种活性成分配伍的协同作用研究较少,且功效验证与机制探究以细胞和动物实验为主,缺乏人群干预数据支撑。目前针对热应激的专用功能性食品品类较为稀缺,亟需推动相关基础研究成果向应用端快速转化,加快完善该领域的产业化开发体系。

3 天然植物提取物防治热应激潜在作用机制

3.1 抗氧化

小球藻多糖可显著增强 SOD、GSH-PX、CAT 等抗氧化酶活性,抑制脂质过氧化物 MDA 生成,缓解热应激暴露对果蝇造成的氧化应激损伤,增强其抗逆能力^[61]。姜黄素不仅能通过上调细胞抗氧化防御的核心调节因子 Nrf2 和血红素加氧酶-1 (*Heme Oxygenase -1, HO-1*) 蛋白表达来发挥其抗氧化作用,减轻热应激引起的鹌鹑肝脏氧化损伤^[75];还能显著降低 Keap1 的表达,增加 Nrf2 的活性和其下游抗氧化基因 HO-1、醌氧化还原酶 1 (*NAD(P)H: Quinone Oxidoreductase 1, NQO1*) 的表达水平,增强热应激奶牛乳腺上皮细胞的抗氧化能力^[35]。原花青素 B2 同样能够降低热应激引发的高 ROS 活性,提高抗氧化剂谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 的含量,减轻热应激诱导的

牛卵母细胞氧化应激^[76]。

3.2 抗炎

苦参黄酮能降低热应激小鼠睾丸组织中 TNF- α 、IL-17 及 NO 的水平,抑制热应激导致的炎症反应^[37]。补充 200 mg kg⁻¹ 的 L-茶氨酸显著改善了热应激小鼠肝脏组织中胞质空泡化、水肿、坏死和中性粒细胞浸润等炎症反应,降低了由热应激引起的小鼠肝脏组织中白细胞介素-1 β (Interleukin-1 β , IL-1 β)、白细胞介素-6 (Interleukin-6, IL-6)、TNF- α 三种炎症因子 mRNA 水平的升高,同时降低了诱导型一氧化氮合酶 (Inducible Nitric Oxide Synthase, iNOS) 与环氧酶-2 (Cyclooxygenase-2, COX-2) 炎症介质的转录水平,改善系统性炎症^[53]。

3.3 诱导热休克蛋白表达

薄荷提取物处理被证实能显著上调热应激下断奶仔猪体内背最长肌组织中 HSP70 基因的表达,进而增强其热耐受能力^[51];芍药苷可通过激活 HSF1,诱导热休克蛋白 (Heat Shock Proteins, Hsps) 表达,促进应激状态下蛋白质正确折叠,增强细胞耐热性^[13]。

3.4 保护肠道屏障

饲料中添加 400 mg kg⁻¹ 肉桂醛能显著提高热应激肉鸡空肠绒毛高度,有提高空肠绒毛高度、隐窝深度及绒毛比值的趋势。其对肠道形态的改善可能得益于其自身的抑菌和抗氧化作用,通过减少大肠杆菌和沙门氏菌等致病菌的数量来提高肠绒毛的再生能力;提高肉鸡小肠内能给肠道提供能量并刺激肠上皮细胞的增生与分化的丁酸含量,从而发挥其维持肠道健康的作用^[48]。博落回提取物处理显著升高了热应激小鼠空肠中紧密连接蛋白和闭锁连接蛋白的 mRNA 丰度,通过加强肠粘膜的紧密连接缓解了热应激导致的小鼠肠道屏障损伤^[17]。

3.5 增强免疫力

膳食补充 500 mg kg⁻¹ 白藜芦醇能改善热应激状态下黄羽肉鸡胸腺、脾脏和法氏囊等免疫器官的生长指数下降,显著提升血清中补体 3 水平,改善其免疫功能^[77];而日粮中添加 1 600 mg kg⁻¹ 蒲公英多糖能显著提高仔猪血清中免疫球蛋白 A、G 和溶菌酶含量,增强机体免疫力^[45]。

3.6 其它

除上述作用机制外,天然植物提取物还可能通过调节机体糖脂代谢和激素水平等方式缓解机体热应激损伤。如白藜芦醇可以激活猪腺苷酸活化蛋白激酶 (Adenosine Monophosphate Activated Protein Kinase, AMPK) 通路促进葡萄糖摄取,改善热应激下的能量负平衡^[78];黄芪多糖干预后热应激荷斯坦牛血清中的甲状腺激素三碘甲状腺原氨酸 (Thyroid Hormone Triiodothyronine, T3) 和甲状腺素 (Thyroxine, T4) 水平显著升高,通过葡萄糖代谢和氨基酸代谢调控其能量代谢^[43]。

综上所述,植物提取物能够通过抗氧化、抗炎、诱导热休克蛋白表达等多重靶点,多个通路作用形成协同防御网络,有效缓解热应激造成的机体损伤,其营养与功能兼具的优势为其作为防治热应激功能性食品开发提供了有利支撑。然而目前植物提取物防治热应激作用机制研究仍处于动物水平,缺乏临床实验数据,同时提取物中功能物质组成复杂,其协同作用机制研究相对较少,未能有效促进相关终端产品的开发^[11]。

4 植物提取物类功能性食品开发现状

4.1 产品开发一般流程

如图 2 所示,植物提取物类功能性食品的一般开发流程通常包括以下几个核心步骤:首先进行市场调研与原料筛选/配方设计,在明确产品目标功能并确保所选植物原料符合国家相关法规的基础上,开展原料筛选与活性成分研究,通过文献调研和预实验确定主要功效成分及其提取工艺;其次进行提取与制剂开发,优化温度、时间、料液比等提取条件,并将浓缩干燥后的提取物通过制粒、压片或填充胶囊等方式制成方便食用的剂型;完成产品功效验证与安全性评估,最后根据产品形态调整配方,以解决提取物可能存在的苦味、吸湿性或稳定性问题。

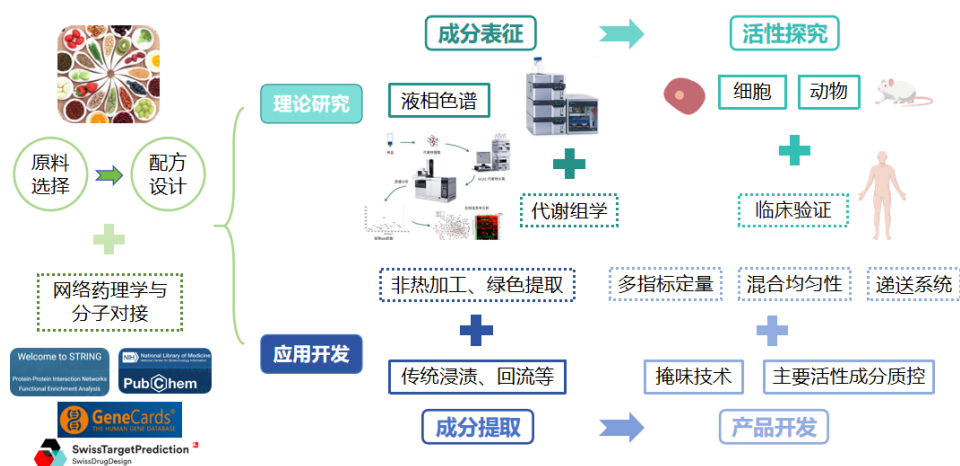


图2 植物提取物类功能性食品开发流程与展望

Fig.2 Development process and prospects of plant extract-based functional foods

4.2 产品剂型的多样性

目前以天然植物提取物为原料的功能性食品的产品剂型丰富,主要包括固体饮料、功能性软饮、压片糖果、凝胶软糖、胶囊五类,不同剂型的选择由提取物的理化特性、感官属性及目标人群的使用场景共同决定。如图3所示,各类剂型在工艺特点、适用成分及生物利用度方面各有侧重,合理选择剂型是产品成功开发的关键。

①固体饮料适合水溶性好、热稳定性尚可的活性成分,其加工工艺简单、便于携带、储存稳定性较好;但需用水冲调,外出场景中使用不便,部分热敏性成分在喷雾干燥或造粒过程中也可能损失;生产时应注意控制水分活度,防止吸潮结块,并可采用微囊化或包合技术提高易氧化成分的稳定性。②而功能性软饮适合溶解性佳、pH与热加工稳定性强的提取物,其优点为开盖即饮,契合高温作业、运动或户外场景的即时补水与防暑需求;然而软饮加工常涉及高温灭菌及较长的货架期,对活性成分的稳定性要求较高,植物提取物固有的特殊风味难以完全掩盖,需通过环糊精包合、添加剂等掩味技术改善风味。③压片糖果适用于流动性好、吸湿性低、可压性强的提取物,其无需冲调、口腔快速崩解释放的优点使部分成分可通过口腔黏膜吸收,减少首过效应;但压片过程通常需要较高的压力,对提取物粉体的可压性和润滑性有较高要求,且需添加填充剂、粘合剂、润滑剂等较多辅料,可能导致单位质量中活性成分含量相对较低;开发时需关注片剂的硬度、崩解时限及口感,避免砂砾感与苦味残留。④低苦低涩、与胶体兼容性好的提取物则适于凝胶软糖剂型设计,其口感愉悦、咀嚼性强,消费者接受度高,尤其适合儿童、老年人及对吞咽片剂有困难的人群;但凝胶软糖的加工涉及高温溶胶、浇注、干燥等步骤,对热敏性成分影响较大;同时软糖中水分活度较高,需添加防腐剂或采用低水分活度配方以延长保质期,开发时需筛选合适的胶体体系,平衡弹性、口感与释放特性。⑤胶囊是保护稳定性差、生物利用度低的活性成分的理想剂型,尤其适用于脂溶性成分、强苦味生物碱、易氧化及有刺激性气味的提取物,能有效掩盖不良气味和口感,并通过包埋技术显著提升成分在体内的溶解与吸收效率;但产品体积较大,部分人群吞咽困难,生产成本相对较高。

此外,近年来出现的双层片等复合剂型及口腔速溶膜、泡腾片等个性化剂型进一步拓宽了植物提取物在热应激防治功能食品中的应用空间。随着制剂技术的进步,更多创新剂型将不断涌现,推动植物提取物类功能性食品向高效、便捷、美味的方向发展。



图3 目前植物提取物类功能性食品主要类别及其特点

Fig.3 Main categories and characteristics of current functional foods based on plant extracts

4.3 目前产品开发案例与痛点

当前植物提取物已广泛应用于功能性食品领域，如灵芝多糖和黄芪提取物等复配后通过激活巨噬细胞及促进淋巴细胞增殖发挥免疫调节作用，用于增强免疫力类产品中；红曲提取物和绞股蓝皂苷等成分可有效抑制胆固醇合成，常添加于辅助降低血脂产品中^[79]。但该类功能性食品中存在以下问题：①许多活性成分在产品加工和储存过程中易受光、热、氧等因素影响而发生降解或失活，其关键功效物质的保效问题需要关注。如以花青素为活性成分的软糖须控制熬糖温度，减少高温下降解损失；为保留枸杞中的类胡萝卜素成分应优先采用非热力或低温加工技术以减少降解，合理添加抗氧化剂，并注意酸性环境可能诱导的异构化反应^[80]。②提取物的特殊口感与气味、提取物与辅料之间的相容性问题等。如黄连主要生物活性成分小檗碱属于生物碱类，味感较苦^[81]；小球藻提取液具有海藻类植物的特殊腥味^[82]，限制了其在食品中的直接应用；而迷迭香酸与食品辅料硬脂酸镁、交联羧甲基纤维素钠混合后在等温胁迫试验中活性成分显著损失，具有明确的化学不相容性^[83]。③由于植物提取物为混合物，其成分组成十分复杂，功效成分的定量检测方法开发困难，缺乏标准品且检测成本高^[11]。④植物提取物行业是我国近年来的新兴产业，尚缺乏完善的政策法规引导。且其作为新食品原料的审批周期长、门槛高，必须完成成分分析、卫生学检验、毒理学安全性评价，经国家卫健委审查公告后才可使用^[84]。

综上所述，目前植物提取物在功能食品中有这广泛的开发和应用，形成了一定的开发流程及多样化的产品剂型，但是相关理论基础研究、应用研究及法律法规方面还存在诸多问题，在一定程度上限制了植物提取物类功能产品的开发和推广。

5 植物提取物在热应激防治功能食品中的应用展望

虽然植物提取物在功能性食品开发过程中面临着诸多问题，但其在防治热应激方面的应用前景不可忽视，未来需聚焦以下几个方面的研究：

(1) 协同组方开发。未来的配方开发应从简单的成分叠加转向系统化的机制互补与靶点互作，如利用网络药理学和通路富集分析深入挖掘具有调节体温、保护肠道屏障、抑制炎症反应及抗氧化应激等多重活性的植物提取物及其核心靶点，并按照不同作用机制进行多靶点互补配伍。采用等效线分析、联合指数或响应面法等手段定量评价不同配比的协同效应，筛选协同作用强且安全性高的优化组合，同时可结合人工智能大数据模型针对不同人群进行配方调整，从而实现从经验配伍向数据驱动、靶向精准的协同组方设计，实现多成分间的协同增效，为开发高效、安全的复方热应激防治功能食品提供物质基础。

(2) 制剂技术突破。针对植物提取物中热敏性成分易降解、生物利用度低等瓶颈，可利用纳米包埋、环糊精包合、微胶囊化等制剂手段，显著提高活性成分在高温加工与储存过程中的稳定性，同时改善其在体内的溶解与吸收效率。此外还需开发适用于高温环境下快速起效的递送系统，如口腔速溶膜、即饮型纳米乳剂。

(3) 标准化评价模型构建。建立模拟高温环境的标准化体外细胞模型与动物热应激模型, 结合人体试验系统评价植物提取物对核心体温、心率、HSP70 表达及炎症因子等关键指标的影响。通过多剂量、多时间点的干预研究明确产品量效关系与作用窗口, 为其功能宣称提供科学依据。

(4) 其它。开发符合高温作业、运动及户外场景需求的凝胶状即食剂、便携式含片等功能食品形态, 同时兼顾口感清爽与携带便捷性; 借助网络药理学、人工智能辅助配方设计, 实现针对体力劳动者、运动员、老年群体等不同人群的个性化营养干预; 推动建立热应激防护功能食品的行业评价标准与法规规范, 明确技术要求与功能宣称依据, 加速植物提取物在热衰竭防治领域的产业化转化。

6 结论

综上所述, 本文从具有防治热应激功能的植物提取物种类、活性成分类别、主要功效和潜在作用机制等方面系统梳理了天然植物提取物在缓解机体热应激方面的研究进展。现有研究表明, 植物提取物及其活性成分可通过抗氧化、抗炎、诱导热休克蛋白表达、保护肠道屏障、增强免疫力等多重途径发挥协同防御作用, 在动物模型中展现出良好的热应激防治潜力。然而目前相关研究大都基于动物模型, 人体临床试验及人群营养干预研究极为匮乏, 导致植物提取物向防治热应激功能性食品的临床转化面临多重瓶颈与风险: ①动物与人类在热应激生理响应、代谢特征及剂量反应关系上存在显著差异, 动物实验的有效剂量难以直接外推至人体; ②植物提取物中活性成分的体内吸收、生物利用度及长期安全性缺乏系统的人体评估, 存在潜在的个体差异与不良反应风险; ③现有功效评价标准不统一, 缺乏基于人体核心体温、热耐受时间、炎症标志物等关键临床验证数据, 严重制约了相关功能性食品的研发进程与产业化应用。未来研究应在持续深化植物提取物机制研究的基础上, 加快推动抗热应激功效的人体临床试验, 明确有效剂量范围、安全阈值及作用窗口期, 并建立标准化评价体系。以期充分开发利用我国丰富的植物资源, 为防治热应激功能性食品的临床转化与推广应用提供科学依据, 帮助特殊职业工作者及高温地带居民应对热应激导致的机体损伤。

参考文献

- [1] COLLIER R J, BAUMGARD L H, ZIMBELMAN R B, et al. Heat stress: physiology of acclimation and adaptation [J]. *Animal Frontiers*, 2019, 9(1): 12-19.
- [2] SCHULTE P A, BHATTACHARYA A, BUTLER C R, et al. Advancing the framework for considering the effects of climate change on worker safety and health [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2016, 13(11): 847-865.
- [3] 程青. 丹参酮 IIA 磺酸钠抑制热应激诱导的血管内皮细胞凋亡的机制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [4] SORENSEN C, HESS J. Treatment and prevention of heat-related illness [J]. *New England Journal of Medicine*, 2022, 387(15): 1404-1413.
- [5] WEST J W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle [J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(6): 2131-2144.
- [6] MAUGHAN R J, SHIRREFFS S M. Dehydration and rehydration in competitive sport [J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2010, 20: 40-47.
- [7] 高芳. 减少禽类热应激的药物[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2009, 14: 75.
- [8] 陈思梦. 西瓜籽多肽提高肝肠热应激耐受性的途径及其分子机制[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [9] 张艳, 孙武, 李升升, 等. 浅析抗生素发展史及替抗时代下的应对措施[J]. *中国畜禽种业*, 2023, 19(1): 22-24.
- [10] 于飞, 吴彤, 冯玉超, 等. 绿豆多酚在煮制加工中的变化规律及其对热应激诱导的 Caco-2 细胞凋亡的调控作用[J]. *食品工业科技*, 2026, 47(1): 1-15.
- [11] 樊霞, 冯玉超, 魏佩玲, 等. 天然植物对畜禽热应激调控机理研究进展[J]. *饲料工业*, 2025, 46(4): 1-9.
- [12] MANUELIAN C L, PITINO R, SIMONI M, et al. Plant feed additives as natural alternatives to the use of synthetic antioxidant vitamins on livestock mammals' performances, health, and oxidative status: a review of the literature in the last 20 years [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(9): 1461.
- [13] 孔令娇, 万宝云, 赵珊珊, 等. 中药活性成分缓解血管内皮细胞热应激损伤的研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2026, 53(2): 573-586.
- [14] 殷斌. Vitamin C-Na 诱导 Hsps 表达保护心肌抵抗热应激损伤的作用及机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [15] KARL J P, HATCH A M, ARCIDIACONO S M, et al. Effects of psychological, environmental and physical stressors on the gut

- microbiota [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2013.
- [16] SHI N, LI N, DUAN X W, et al. Interaction between the gut microbiome and mucosal immune system [J]. *Military Medical Research*, 2017, 4: 14.
- [17] 王明灿. 博落回提取物对小鼠和黄羽肉鸡的抗热应激作用研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022.
- [18] QUINTEIRO W M, GOMES A V S, PINHEIRO M L, et al. Heat stress impairs performance and induces intestinal inflammation in broiler chickens infected with *Salmonella Enteritidis* [J]. *Avian Pathology*, 2012, 41(5): 421-427.
- [19] 蔡超, 杨岸奇, 曲湘勇, 等. 热应激对畜禽胃肠道的影响及机制[J]. *中国饲料*, 2013, 17: 5-7+11.
- [20] 董嘉琪. 生脉散调控应激颗粒-氧化应激-线粒体内质网互作改善热应激大鼠心肌损伤的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2025.
- [21] 何金霞, 陈寒冰, 付明燕, 等. 热应激对实验动物生理功能的影响[J]. *吉林医药学院学报*, 2019, 40(5): 368-370.
- [22] 曹铮. 富硒女贞子缓解奶牛热应激效果的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- [23] 张峰, 马书林, 王昆, 等. 热应激对畜禽的影响及措施调控[J]. *河北农业科学*, 2009, 13(4): 84-88.
- [24] 刘晓燕, 崔玉鹏, 杨云霜, 等. 升温诱发高血压大鼠脑梗塞发病的神经内分泌机制[J]. *现代生物医学进展*, 2011, 11(08): 1428-1431.
- [25] ROZENBOIM I, TAKO E, GAL-GARBER O, et al. The effect of heat stress on ovarian function of laying hens [J]. *Poultry Science*, 2007, 86(8): 1760-1765.
- [26] 鲍恩东, 龚远英, J. Hartung, 等. 肉鸡热应激病理损伤与应激蛋白(HSP70)相关性研究[J]. *中国农业科学*, 2004, 2: 301-305.
- [27] HUERTA-ALARDÍN A L, VARON J, MARIK P E. Bench-to-bedside review: rhabdomyolysis - an overview for clinicians [J]. *Critical Care*, 2005, 9(2): 158-169.
- [28] HAN B Y, MENG Y Q, TIAN H N, et al. Effects of acute hypoxic stress on physiological and hepatic metabolic responses of triploid rainbow trout (*Oncorhynchus Mykiss*) [J]. *Frontiers in Physiology*, 2022, 13: 921709.
- [29] 潘志国, 耿焱, 刘灏, 等. 热打击对培养人骨骼肌细胞的损伤和释放 IL-6、TNF- α 的影响[J]. *实用医学杂志*, 2012, 28(9): 1405-1407.
- [30] 张云, 吴士文. 热射病的神经影像学进展[J]. *中华灾害救援医学*, 2016, 4(4): 231-234.
- [31] YONEDA K, HOSOMI S, ITO H, et al. How can heatstroke damage the brain? a mini review [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2024, 18: 1437216.
- [32] HU S Q, LIU D L, LI C R, et al. Wuzi-Yanzong prescription alleviates spermatogenesis disorder induced by heat stress dependent on *Akt*, *NF- κ B* signaling pathway [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 18824.
- [33] 黄寅虎, 汪子铃, 杜坤航, 等. 人参皂苷 Rg1 减轻热应激致小鼠睾丸损伤的机制研究[J]. *陆军军医大学学报*, 2024, 46(10): 1123-1131.
- [34] BAIN A R, NYBO L, AINSLIE P N. Cerebral vascular control and metabolism in heat stress [J]. *Comprehensive Physiology*, 2015, 5(3): 1345-1380.
- [35] 伏庭书, 周宏达, 王苗, 等. 姜黄素缓解热应激诱导的奶牛乳腺上皮细胞氧化应激与凋亡的作用研究[J]. *畜牧兽医学报*, 2025, 56(12): 6411-6421.
- [36] HUANG Q, SHAN Q, MA F T, et al. Chlorogenic acid mitigates heat stress-induced oxidative damage in bovine mammary epithelial cells by inhibiting *NF- κ B*-mediated *NLRP3* inflammasome activation via upregulating the *Nrf2* signaling pathway [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 301: 140133.
- [37] 来永巍, 路倩, 叶超, 等. 苦参总黄酮对热应激导致的小鼠生殖功能障碍的治疗作用及机制[J]. *中国现代应用药学*, 2023, 40(24): 3368-3376.
- [38] WANG H L, XING G D, QIAN Y, et al. Dihydromyricetin attenuates heat stress-induced apoptosis in dairy cow mammary epithelial cells through suppressing mitochondrial dysfunction [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 214: 112078.
- [39] WANG S Y, WANG X, GAO Y, et al. Protocatechuic acid attenuates intestinal inflammation through *TLR4/p38* and *NF- κ B* pathways in heat-stressed broilers [J]. *Poultry Science*, 2024, 103(12): 104424.
- [40] WU T, SHENG Y A, TIAN Y, et al. Vitexin regulates heat shock protein expression by modulating ROS levels thereby protecting against heat-stress-induced apoptosis [J]. *Molecules*, 2023, 28(22): 7639.
- [41] SUI J X, FENG Y N, LI H T, et al. Baicalin protects mouse testis from injury induced by heat stress [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2019, 82: 63-69.
- [42] ZENG H F, XI Y M, LI Y Q, et al. Analysis of astragalus polysaccharide intervention in heat-stressed dairy cows' serum metabolomics [J]. *Animals*, 2020, 10(4): 574.

- [43] XU D N, LI B X, CAO N, et al. The protective effects of polysaccharide of *Atractylodes Macrocephala* Koidz (PAMK) on the chicken spleen under heat stress via antagonizing apoptosis and restoring the immune function [J]. *Oncotarget*, 2017, 8(41): 70394-70405.
- [44] LI F, XU J, XIE M, et al. Regulatory effects of tea polysaccharides on hepatic inflammation, gut microbiota dysbiosis, and serum metabolomic signatures in beef cattle under heat stress [J]. *Frontiers in Physiology*, 2024, 15: 1460414.
- [45] 张金叶.蒲公英多糖对热应激仔猪生长性能、血清生化指标和免疫指标的影响[J].*中国饲料*,2024,20:132-135.
- [46] 陈蕾晓,何欢,欧阳露,等.绞股蓝多糖对热应激小鼠卵巢氧化损伤的保护作用[J].*湖北农业科学*,2025,64(2):144-149.
- [47] 任钊.酸枣仁皂苷对热应激肉鸡下丘脑采食相关基因表达影响的研究[D].锦州:锦州医科大学,2016.
- [48] 陈乐乐,陈博,伍新珍,等.肉桂醛对热应激肉鸡生长性能、抗氧化能力和肠道健康的影响[J].*动物营养学报*,2024,36(9):5642-5655.
- [49] 费枫,刘锐.薄荷提取物对热应激下断奶仔猪生长性能、血清抗氧化能力及炎症因子的影响[J].*饲料研究*,2023,46(4):25-30.
- [50] 熊永洁,李冰,孙诗昂,等.甜菜碱对热应激山羊胎盘滋养层细胞增殖、凋亡及抗氧化功能的影响[J].*饲料工业*,2025,46(6):95-100.
- [51] 姜敬非.小檗碱对热应激体温的调节及其 HSP70-TNF α 表达的作用[D].北京:清华大学,2016.
- [52] WEI L S, GAO S L, LV Y, et al. Lycopene regulates the JNK/p38MAPK signalling pathway and alleviates reproductive oxidative stress and apoptosis induced by heat stress in male rats [J]. *Journal of Functional Foods*, 2026, 140: 107258.
- [53] 蔡敏.L-茶氨酸改善小鼠热应激性肝炎及化学性结肠炎的作用及实验研究[D].合肥:安徽农业大学,2020.
- [54] LI Z H, ZHANG J F, CHENG K, et al. Capsaicin alleviates the intestinal oxidative stress via activation of TRPV1/PKA/UCP2 and Keap1/Nrf2 pathways in heat-stressed mice [J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 108: 105749.
- [55] RUDRAPAL M, RAKSHIT G, SINGH R P, et al. Dietary polyphenols: review on chemistry/sources, bioavailability/metabolism, antioxidant effects, and their role in disease management [J]. *Antioxidants*, 2024, 13(4): 429.
- [56] 郭旭明,陈静龙,陶诗煜,等.植物多酚的生物学功能及其在肉鸡热应激中的作用研究进展[J].*动物营养学报*,2026,38(2):846-854.
- [57] CROZIER A, JAGANATH I B, CLIFFORD M N. Dietary phenolics: Chemistry, bioavailability and effects on health [J]. *Natural Product Reports*, 2009, 26(8): 1001-1043.
- [58] GULCIN I. Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview [J]. *Archives of Toxicology*, 2020, 94(3): 651-715.
- [59] SANDOVAL-ACUÑA C, FERREIRA J, SPEISKY H. Polyphenols and mitochondria: an update on their increasingly emerging ROS-scavenging independent actions [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2014, 559: 75-90.
- [60] 赵惠存.五味子藤茎多糖的提取纯化、结构鉴定及抗热应激活性研究[D].长春:吉林农业大学,2024.
- [61] 常媛媛.小球藻多糖对果蝇热应激反应的影响及其分子机制研究[D].合肥:合肥工业大学,2024.
- [62] ZHU A N, DUAN Z G, CHEN Y R, et al. Ginsenoside Rh4 delays skeletal muscle aging through SIRT1 pathway [J]. *Phytomedicine*, 2023, 118: 154906.
- [63] KIM A, PARK S M, KIM N S, et al. Ginsenoside Rc, an active component of panax ginseng, alleviates oxidative stress-induced muscle atrophy via improvement of mitochondrial biogenesis [J]. *Antioxidants*, 2023, 12(8): 1576.
- [64] BERTELLI A, BIAGI M, CORSINI M, et al. Polyphenols: from theory to practice [J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2595.
- [65] BINKOWSKA W, SZPICER A, STELMASIAK A, et al. Microencapsulation of polyphenols and their application in food technology [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2024, 14(24): 11954.
- [66] HUANG Y C, ZHANG C, XUE H K, et al. Research progress on the structure-activity relationship and action mechanisms of polysaccharides with immunomodulatory activity [J]. *Journal of Functional Foods*, 2025, 134: 107072.
- [67] 杨文萱,徐佳漫,郑君娜,等.食源性多糖生物活性及其在食品加工中的应用研究进展[J].*食品安全导刊*,2025,11:179-186.
- [68] TIMILSENA Y P, PHOSANAM A, STOCKMANN R. Perspectives on saponins: food functionality and applications [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(17): 13538.
- [69] WU Y H, ZHENG H, ZHENG T, et al. Quantitative changes and transformation mechanisms of saponin components in Chinese herbal medicines during storage and processing: a review [J]. *Molecules*, 2024, 29(18):4486.
- [70] BARRADAS T N, SILVA K G D E. Nanoemulsions of essential oils to improve solubility, stability and permeability: a review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(2): 1153-1171.
- [71] ENGLISH M, OKAGU O D, STEPHENS K, et al. Flavour encapsulation: a comparative analysis of relevant techniques, physiochemical characterisation, stability, and food applications [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1019211.
- [72] 史素娟,方宁,王寒,等.植物生物碱研究现状及其生物合成技术发展前景[J].*中国烟草科学*,2026,47(1):124-130.

- [73] 尹田鹏,王玺晶,汪泽.pH 对生物碱结构和性质的影响及其在药物研究中的作用[J/OL].大学化学,1-10[2026-06-10].
- [74] 刘琴,陈芳,朱以良,等.热射病动物模型的研究进展[J].实验动物科学,2023,40(5):86-89.
- [75] SAHIN K, ORHAN C, TUZCU Z, et al. Curcumin ameliorates heat stress via inhibition of oxidative stress and modulation of *Nrf2/HO-1* pathway in quail [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(11): 4035-4041.
- [76] 朱肖亭,闵佳,张志浩,等.原花青素减轻热应激诱导的牛卵母细胞氧化应激[J].江西农业大学学报,2024,46(6):1544-1551.
- [77] HE S P, YU Q F, HE Y J, et al. Dietary resveratrol supplementation inhibits heat stress-induced high-activated innate immunity and inflammatory response in spleen of yellow-feather broilers [J]. Poultry Science, 2019, 98(12): 6378-6387.
- [78] MENG Q W, LI J W, WANG C S, et al. Biological function of resveratrol and its application in animal production: a review [J]. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2023, 14(1): 25.
- [79] 余永英,高小林,赵蓉,等.植物提取物在功能性食品中的应用及生物安全性评价[J].食品安全导刊,2026,20(5): 157-160.
- [80] 司原琦,付雨,刘洪宇.我国保健食品剂型分析及优化研究[J].食品与发酵工业,2026,52(13):454-461.
- [81] 赵祥君,秦焕云,邵冰梅,等.中药苦味呈现机制、掩味技术及其评价方法研究进展[J].中成药,2024,46(1):170-176.
- [82] 庞庭才,胡上英,林美芳,等.小球藻发酵饮料加工工艺[J].食品与发酵工业,2014,40(11):260-264.
- [83] VERAS K S, FACHEL F N S, PITTOL V, et al. Compatibility study of rosmarinic acid with excipients used in pharmaceutical solid dosage forms using thermal and non-thermal techniques [J]. Saudi Pharmaceutical Journal, 2019, 27(8): 1138-1145.
- [84] 龙伽雯,李跃辉.新食品原料的审批及应用现状研究[J].食品与发酵工业,2025,51(8): 394-404.