

李梦民, 刘滔, 罗婷, 等. 疲劳评价与食源性抗运动疲劳成分研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 394-402. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020177

LI Mengmin, LIU Tao, LUO Ting, et al. Research Progress of Fatigue Evaluation and Foodborne Anti-sport Fatigue Components[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 394-402. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020177

· 专题综述 ·

# 疲劳评价与食源性抗运动疲劳成分研究进展

李梦民<sup>1,2,3</sup>, 刘滔<sup>3,+</sup>, 罗婷<sup>2,4</sup>, 王豆<sup>2,4</sup>, 欧昌荣<sup>1,\*</sup>, 杨桂玲<sup>1,2,3,4,\*</sup>

- (1. 宁波大学食品科学与工程学院, 省部共建农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 浙江宁波 315832;  
2. 浙江省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 省部共建农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室, 浙江杭州 310021;  
3. 湘湖实验室, 浙江杭州 311231;  
4. 农业农村部农业转基因生物溯源重点实验室, 浙江杭州 310021)

**摘要:** 运动性疲劳会导致机体产生体力匮乏、注意力下降、工作能力降低等现象, 而食源性抗运动疲劳活性成分来源广泛并具有显著缓解效果, 在功能食品开发、医疗保健应用等领域具备广阔发展前景。本文首先综述了机体内乳酸、糖原、乳酸脱氢酶、尿素氮等与运动性疲劳程度紧密相关的评价指标, 其次, 基于运动性疲劳的主要缓解途径包括提高机体能量储备、清除代谢产物、维持氧化还原平衡、抑制炎症反应、缓解神经中枢疲劳等方式, 本文罗列了具有显著抗运动疲劳潜力的食源性活性成分, 并总结了不同成分复合缓解疲劳的相互作用, 以期食源性复合抗疲劳功能食品和保健品的开发利用提供理论参考。

**关键词:** 运动性疲劳, 食源性, 疲劳指标, 抗疲劳途径, 相互作用

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)02-0394-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020177



本文网刊:

## Research Progress of Fatigue Evaluation and Foodborne Anti-sport Fatigue Components

LI Mengmin<sup>1,2,3</sup>, LIU Tao<sup>3,+</sup>, LUO Ting<sup>2,4</sup>, WANG Dou<sup>2,4</sup>, OU Changrong<sup>1,\*</sup>, YANG Guilin<sup>1,2,3,4,\*</sup>

- (1. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, College of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315832, China;  
2. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, Institute of Agro-product Safety and Nutrition, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China;  
3. Xianghu Laboratory, Hangzhou 311231, China;  
4. Key Laboratory of Traceability for Agricultural Genetically Modified Organisms, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310021, China)

**Abstract:** Exercise-induced fatigue can result in physical deprivation, diminished concentration, and decreased work capacity, etc. Food-derived anti-fatigue agents, originating from diverse sources, possess substantial potential to alleviate these effects and hold broad prospects for development in functional food and healthcare sectors. This paper overviews biomarkers such as lactate, glycogen, lactate dehydrogenase, and urea nitrogen, which are intimately linked to the severity of exercise fatigue. The primary mechanisms for mitigating exercise fatigue include enhancing energy reserves, clearing metabolites, preserving redox balance, curbing inflammation, and reducing central nervous system fatigue. The review also

收稿日期: 2024-02-23 +并列第一作者

作者简介: 李梦民 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品开发, E-mail: li15755835199@163.com。

刘滔 (1991-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 功能食品开发应用, E-mail: liutao@xhlab.ac.cn。

\* 通信作者: 欧昌荣 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工与风味研究, E-mail: ouchangrong@nbu.edu.cn。

杨桂玲 (1976-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品质量安全风险评估, E-mail: guilingchina2008@163.com。

lists food-borne active ingredients with significant anti-fatigue potential and discusses their synergistic interactions in alleviating fatigue, to provide a theoretical foundation for the development and application of food-borne anti-fatigue foods and health products.

**Key words:** exercise fatigue; food-borne; fatigue biomarkers; anti-fatigue mechanisms; interactions

疲劳是人类生活中的普遍生理现象,而运动性疲劳是指在生理过程中,机体不能在特定水平下持续其功能或不能维持预定的运动强度的现象,它不仅会使机体产生体力匮乏现象,还会对精神方面产生影响,本文后续均以疲劳指代运动性疲劳。躯体性疲劳对于人体的影响较为直观,主要体现在睡眠不足、肢体肌肉组织酸痛、食欲下降等方面,而精神疲劳则更容易受到压力的影响并加重疲劳程度,最终导致个体陷入抑郁状态、滋生其他心理健康疾病<sup>[1-2]</sup>。此外,疲劳的产生也伴随着不可预测性和持久性等特点<sup>[3]</sup>,比如一般的轻度疲劳可通过能量补充和适当休息即可得到缓解,但长时间的重度运动或超负荷工作所导致的重度疲劳,仅靠自身干预很难及时恢复到正常状态,需要采用合理的方法缓解和消除疲劳极为重要。

目前,缓解疲劳的方式主要包括推拿按摩<sup>[4]</sup>、针灸疗法<sup>[5]</sup>、膳食营养补充等<sup>[6]</sup>,其中膳食营养补充除了搭配合理的日常饮食之外,还可通过摄入富含抗疲劳成分的物质来缓解疲劳。当前已有许多研究表明多种食源性活性成分具有显著抗疲劳效果,这些活性成分按照化合物结构可以分为多糖类、生物活性肽类、多酚类、黄酮类等<sup>[7]</sup>。例如茶多酚和黑枸杞提取物在小鼠负重力竭游泳实验中显著提高了小鼠耐力和抗疲劳能力<sup>[8]</sup>,还有一些食源性物质如人参<sup>[9]</sup>、枸杞<sup>[10]</sup>、蔓菁等有着不亚于药物的抗疲劳能力<sup>[11]</sup>。食源性抗疲劳活性物质可通过调节人体内环境平衡,提高机体抗氧化能力、改善肠道菌群等途径缓解机体疲劳和维持人体健康,具有广阔的开发利用前景。本文主要从疲劳评价相关指标、食源性成分缓解疲劳的不同途径和食源性成分复合相互作用机制三个方面进行综述,对食源性成分抗疲劳相关作用机制归类分析,并对成分之间复合相互作用效果进行探讨,为抗疲劳复合食品和保健品的开发提供理论参考。

## 1 疲劳评价相关指标

疲劳是在机体进行强烈的体力劳动后发出的休息信号,运动强度的高低会引起不同程度的疲劳,通过对疲劳程度进行评价,不仅可以明确机体目前疲劳状态,还可以作为食源性成分抗疲劳效果的评价标准。目前所采用的评价疲劳方法主要是通过大鼠或小鼠进行各种耐力实验,然后结合其血清中糖原、乳酸等生理生化指标的改变进行分析评价<sup>[12]</sup>,再通过机体能量储备、肌肉损伤程度、代谢物含量等方面的变化对疲劳程度进行更全面的评定。

### 1.1 运动耐力评价模型

运动耐力的提高是抗疲劳效果最有力的表现,而运动耐力下降是疲劳程度最直接、最客观的指标。目前实验多采用小鼠作为测评对象,测试方法包括负重游泳实验、跑步机运动实验、握力实验、转棒实验、悬尾实验等<sup>[13-14]</sup>。其中负重游泳实验和跑步机运动实验是目前广泛使用的运动耐力测试方法,两种实验方法均是为了反映实验动物运动耐力和疲劳程度,而动物运动时间和距离的长短可作为评价疲劳的指标。此外,动物耐力评价模型(表 1)还可用来筛选某些药物或活性成分所具备的抗疲劳效果<sup>[15]</sup>。例如 Li 等<sup>[16]</sup>利用小鼠负重游泳模型测定了小麦胚白蛋白抗疲劳活性,发现高浓度处理组小鼠较模型组游泳时间延长了 61.18%,表明小麦胚白蛋白的良好抗疲劳效果。Zhang 等<sup>[17]</sup>采用小鼠跑台实验模型和小鼠握力实验研究了干燥温度对余甘子抗疲劳活性的影响,结果显示,当余甘子干燥温度在 100 ℃ 时,给药小鼠跑步时间和抓握力相较于对照组显著提高,根据小鼠运动能力的变化,发现干燥温度的提高可以强化余甘子抗疲劳作用。在动物疲劳模型中,斑马鱼幼鱼疲劳模型具有实验个体易获取、数量庞大及实验操作便捷等优点<sup>[18]</sup>。王玉等<sup>[19]</sup>采用亚硫酸钠试剂在水中营造缺氧环境,导致斑马鱼幼鱼在水中游泳能力下

表 1 疲劳模型构建及评价标准

Table 1 Fatigue modeling and evaluation criteria

疲劳评价模型	疲劳模型构建方法	适用范围	评价标准	参考文献
小鼠负重力竭游泳模型	小鼠尾巴负重,观察在水中游泳时间	食源性成分或药物	根据游泳时间长短判断小鼠运动能力	[20]
小鼠跑轮模型	老鼠置于滚轮或跑步机上奔跑,观察一定时间跑动距离	食源性成分或药物	根据跑步机运动距离,判断小鼠运动能力	[21]
小鼠握力实验模型	使小鼠四肢抓在一根钢丝上,记录悬挂时间	食源性成分或药物	根据小鼠悬挂时间判断小鼠四肢运动能力	[22]
小鼠转棒实验模型	将小鼠置于一个悬空且缓慢滚动的圆柱上,强迫其移动,记录在转棒上时间	食源性成分或药物	根据小鼠在转棒上坚持的时间判断小鼠运动能力	[23]
小鼠悬尾实验模型	将小鼠尾巴固定使身体悬空,观察小鼠挣扎时间	食源性成分或药物	根据小鼠挣扎时间判断其体力强弱	[24]
斑马鱼幼鱼疲劳模型	采用亚硫酸钠溶液营造缺氧环境,使斑马鱼幼鱼运动能力降低	可溶性食源性成分或药物	通过行为分析仪记录其在缺氧环境中游泳总距离,判断其运动能力	[19]

降,而经过鸡蛋清水解物处理的幼鱼游泳距离相较于模型组提高了72.5%,表明幼鱼因缺氧引起的疲劳得到了极大缓解。

## 1.2 糖原储备

糖原是葡萄糖的主要储存形式,可以快速代谢为葡萄糖,以满足机体突然的能量需求。在耐力运动中,糖原被分解以补充运动消耗的血糖,糖原的消耗不仅导致三磷酸腺苷(Adenosine Triphosphate, ATP)再生减少,还会损害肌肉的收缩活性<sup>[23]</sup>。当机体处于疲劳状态时,肝糖原和肌糖原都会显著减少,而提高糖原水平可以减轻疲劳状态。Lu等<sup>[25]</sup>对小鼠连续六周灌胃带鱼糖蛋白,发现小鼠力竭游泳时间显著延长,并且小鼠的肝糖原和肌糖原水平较对照组高出两倍以上,表明小鼠在运动时的能量供应得到改善,支撑了机体运动能量消耗。Peng等<sup>[26]</sup>将板栗花类黄酮分为三个不同梯次浓度,分别灌胃小鼠,研究对其力竭游泳耐力的影响,发现与对照组相比,小鼠力竭游泳时间均延长了30%以上,并且高浓度处理组小鼠的肝糖原和肌糖原水平较模型对照组升高了161.7%和56.2%,表明糖原储备含量的提高为小鼠运动提供了更多的能量,有助于机体维持运动状态。而当机体在短时间内进行大幅度的运动时,体内ATP和磷酸肌酸等高能磷酸化合物水平的下降是引起疲劳的主要因素,需要及时分解糖原,以补充机体能量所需<sup>[27]</sup>。例如灌胃了海龙肽的小鼠游泳时间显著高于对照组,在力竭游泳后,不仅糖原水平含量升高,ATP的含量也随之增加,表明能量的持续供应提高了机体抗疲劳能力<sup>[28]</sup>。

## 1.3 乳酸含量

乳酸是在无氧条件下糖酵解产生的。当运动过程中摄入的氧气不足时,身体无法及时将乳酸分解为水和二氧化碳,进而造成乳酸堆积,乳酸的积累量是评价疲劳发展速度和程度的重要指标<sup>[29]</sup>。过量的乳酸积累会降低肌肉pH,引起肌肉酸痛并造成肌肉收缩力减弱,降低机体的运动能力,当乳酸积累达到一定量时,甚至会发生乳酸中毒现象<sup>[30]</sup>。此外,乳酸的堆积还会抑制糖酵解的关键酶磷酸果糖激酶的活性,进而通过降低糖酵解的速度来影响ATP的再合成速度,导致机体能量供应不足产生疲劳<sup>[31-32]</sup>。

如果一种物质能抑制乳酸的积累,加速乳酸的清除,就会表现出抗疲劳的效果<sup>[33]</sup>。Liu等<sup>[34]</sup>通过灌胃的方式给予ICR小鼠不同剂量的花生寡肽,发现小鼠的游泳时间均高于模型组,并且在负重游泳20 min后,小鼠血清乳酸含量均处于较低水平,乳酸含量的降低表明肌肉细胞内pH的相对稳定,保证了肌肉运动功能,并延长了持续运动时间。也有研究表明,喂食了安康鱼肌肉水解肽的小鼠在运动后的机体乳酸水平和运动时间呈负相关<sup>[35]</sup>。

## 1.4 乳酸脱氢酶含量

乳酸脱氢酶(Lactate Dehydrogenase, LDH)是一

种催化丙酮酸和乳酸相互转化的酶,几乎存在于所有组织中,在心脏、肾脏和骨骼肌中浓度最高,但在血液中很低。而剧烈运动引起的肌肉损伤可导致LDH渗入血液,升高血液中LDH水平,对机体健康状态产生负面影响并加快疲劳的产生<sup>[36]</sup>。所以血液中LDH浓度能够反映肌肉纤维损伤情况,从而作为评价疲劳程度的间接指标<sup>[37]</sup>。Li等<sup>[33]</sup>发现从玛卡中提取的多糖可调节小鼠血清中LDH水平,改善小鼠运动能力,在小鼠负重力竭游泳实验中,游泳后的小鼠血清LDH含量恢复至正常水平,而对照组小鼠LDH含量显著升高且游泳时间较短,表明小鼠在运动过程中肌肉损伤状况已经发生或正在发生,导致机体产生疲劳。Wang等<sup>[11]</sup>通过对小鼠连续灌胃四周蔓菁水提物后,发现高浓度处理组小鼠在运动后血清LDH含量较模型对照组下降了40.45%,表明小鼠运动后肌肉受到损伤较轻,维持了肌肉运动的正常功能。Zhang等<sup>[38]</sup>发现灌胃了膨腹海马肽的小鼠在运动后血清中LDH含量降低且运动时间增加,通过对各组小鼠肌肉组织切片分析比较,发现未灌胃小鼠肌肉组织出现多处撕裂,导致小鼠机体运动能力降低且易产生疲劳感。也有研究发现机体抗氧化性的提高可以降低运动后LDH含量,例如铁皮石斛多糖可以通过降低因运动产生的活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)含量,防止红细胞膜结构的脂质因过氧化产生氧化损伤,减少LDH渗出并提高机体抗疲劳能力<sup>[39]</sup>。

## 1.5 血尿素氮含量

血尿素氮(Blood Urea Nitrogen, BUN)是蛋白质代谢的主要终产物,其浓度的高低反映了蛋白质分解的程度。BUN主要通过蛋白质和氨基酸的代谢产生,运动强度的增加会导致机体能量供应不足,从而促进肌肉组织蛋白质分解满足能量的需求,BUN的含量也因此增加,其含量可反映机体的疲劳程度<sup>[40]</sup>。此外,BUN在肝脏中被清除的主要途径是通过尿素循环将氨转化为尿素,但过量氨积累会加重疲劳程度<sup>[41]</sup>。Hsu等<sup>[42]</sup>将山羊肉蛋白制成补充剂灌胃给小鼠后,血清BUN水平最高下降了43.17%,并且抓握力和游泳时间均显著升高,这是由于小鼠机体尿素循环系统提高了对BUN的分解速度,降低了BUN对机体肝脏的负担,减轻了运动疲劳对机体产生的影响。Feng等<sup>[30]</sup>发现小鼠在运动后糖原水平和BUN水平呈现负相关,糖原水平越低则BUN含量越高,并导致疲劳程度加重;当提高小鼠体内糖原储存含量后,蛋白质的分解消耗降低,小鼠的运动能力也得到显著提高,表明运动导致蛋白质分解产生的BUN积累会加重疲劳现象。也有研究表明BUN可由谷氨酰胺合成酶进行转化代谢,如Ikarash等<sup>[43]</sup>发现以肝脏水解物为主要成分的Conclevan药剂可提高小鼠机体肝脏酶和谷氨酰胺合成酶的表达水平,当氨水平因运动升高而增加疲劳程度时,参与氨代谢的肝酶的

数量就会增加, 并通过降低机体氨浓度达到缓解疲劳的目的。

### 1.6 丙二醛含量

丙二醛(Malondialdehyde, MDA)是细胞内多不饱和脂肪酸过氧化的主要代谢物, 脂质过氧化是自由基介导细胞损伤的重要机制, 它可以直接破坏细胞膜并引发某些疾病, 因此 MDA 可以间接反映细胞损伤程度<sup>[44]</sup>。运动引起的细胞损伤会造成体力流失和肌肉损伤, 从而加速疲劳的产生, 因此可通过 MDA 含量推测机体疲劳程度<sup>[45]</sup>。例如 Chen 等<sup>[46]</sup>发现灌胃了带鱼糖蛋白的小鼠 MDA 水平显著降低, 随着浓度的增加下降率分别为 14.07%、25.04% 和 42.75%, 小鼠的力竭游泳时间也随之延长, 丙二醛含量的下降表明因力竭运动引起的机体氧化损伤得到改善, 有效降低了疲劳对机体带来的损伤。MDA 含量的高低反映了机体细胞受自由基攻击的严重程度, 而 SOD (Superoxide Dismutase, SOD) 活力的高低间接反应了机体清除氧自由基的能力, 因此两者测定结果相结合可更准确反应机体细胞氧化程度及损伤状况, 更准确定位运动后的疲劳程度<sup>[47]</sup>。有研究表明沙棘籽油可以提高力竭游泳小鼠肝脏中 SOD 活性并降低脂质过氧化产生 MDA 含量, 表明机体抗氧化防御系统活性的升高维持了机体内活性氧的平衡, 降低了细胞膜脂质氧化程度并抑制 MDA 的产生, 缓解了机体疲劳程度<sup>[48]</sup>。

## 2 食源性活性成分抗疲劳作用途径

疲劳的产生受到多方面因素影响, 例如过度运动、作息不规律、睡眠不足、精神紧张、心理压力大等现象都会导致疲劳, 疲劳会对机体内环境平衡、能

量供应以及免疫系统等方面产生负面影响, 导致机体运动能力下降甚至引发疾病。众多以动物负重游泳模型作为疲劳评价模型的研究表明(表 2), 一些食源性活性成分可以通过多种途径缓解疲劳, 如抗氧化、减少代谢物的积累、抗炎、能量代谢、肠道微生物调节等, 并且不同来源的抗疲劳活性物质缓解疲劳主要作用机制也各不相同。

### 2.1 提高机体能量储备

人类的一切活动离不开能量的支持, 能量的来源主要包括 ATP、糖类、脂肪、蛋白质等物质。当机体在短时间内高强度运动时, 能量的直接供给来自 ATP 的分解, ATP 分解后会由磷酸肌酸(Creatine Phosphate, CP)和二磷酸腺苷(Adenosine Diphosphate, ADP)重新合成, 保证机体活动能量充足的供应, 在进行长时间低强度运动时, 机体内糖原进行有氧氧化和无氧酵解, 随后被降解作为能量供给运动消耗和维持血糖平衡, 当能量的供应无法满足机体消耗时, 机体就会产生运动性疲劳<sup>[49]</sup>。而一些食源性成分可以通过增加糖原储备、升高 ATP 含量等方式调节能量代谢缓解机体疲劳。Li 等<sup>[29]</sup>研究发现苹果渣多糖可显著延长小鼠负重力竭游泳时间, 提高小鼠肝糖原和肌糖原水平且表现出一定的剂量依赖性, 其能通过上调糖原合成关键酶 GS 基因表达促进糖原合成, 提高机体糖原含量。另有研究表明北柴胡多糖通过促进疲劳小鼠 AMPK 蛋白磷酸化, 上调腓肠肌 PGC-1 $\alpha$  表达水平, 增强了小鼠骨骼肌功能和肌肉能量代谢, 使小鼠运动耐力得到延长<sup>[50]</sup>。枸杞多糖作为枸杞主要活性成分之一, 具有良好的抗疲劳、抗肿瘤、抗氧化等作用。Peng 等<sup>[51]</sup>连续四周通过灌胃每天给

表 2 食源性抗运动疲劳活性成分及主要来源

Table 2 Food-borne anti-exercise fatigue active ingredients and main sources

功能	活性成分	来源	剂量	评价模型	作用机理	参考文献
能量供应	苹果多糖	苹果	200 mg/kg	昆明种小鼠负重游泳	上调糖原合成酶基因水平, 增加糖原含量	[29]
	北柴胡多糖	北柴胡	200 mg/kg	小鼠负重游泳	上调腓肠肌 PGC-1 $\alpha$ 表达水平, 增强肌肉功能和肌肉能量代谢	[50]
	枸杞多糖	枸杞	120 mg/kg	大鼠负重游泳	通过 AMPK/PGC-1 $\alpha$ 信号通路改善线粒体功能, 提高能量代谢水平	[51]
减少代谢产物积累	银鲈蛋白	银鲈	1.98 g/kg	小鼠负重游泳	支链氨基酸转化为葡萄糖, 增加机体糖原储存	[67]
	水飞蓟素	乳蓟	100 mg/kg	小鼠负重游泳	减少血液中乳酸、氮等物质积累, 降低 BUN、BLA 含量	[54]
	蓝靛果多酚	蓝靛果	250 mg/kg	小鼠跑台模型	降低血清中 LDH、BUN 含量, 减少乳酸积累和蛋白质分解	[36]
	带鱼糖蛋白	带鱼	500 mg/kg	小鼠负重游泳	提高血清中 CAT、GPX 和 SOD 的活性, 降低 MDA 含量	[25]
氧化应激调节	三七发醇叶	三七叶	200 mg/kg	小鼠负重游泳	激活 Nrf2 通路和抗氧化系统抑制 ROS 水平	[68]
	蛹虫草酸性多糖	冬虫夏草	400 mg/kg	小鼠负重游泳	促进 PI3K、AKT 蛋白磷酸化和 Nrf2 核移位, 提高机体抗氧化能力	[57]
	蜜环菌子实体多糖	蜜环菌	100 mg/kg	小鼠跑台模型	改善肠道菌群, 提高产丁酸细菌丰富度, 调控氧化应激	[58]
抑制炎症反应	茶多酚	茶叶	400 mg/kg	小鼠负重游泳	降低小鼠血清中 IL-1 $\beta$ 、IL-2、IL-6 和 TNF- $\alpha$ 的含量	[8]
	玛卡酰胺	玛卡	10 mg/kg	小鼠握力测试	上调 HO-1 基因的表达, 降低血清中炎症因子 IL-1 $\beta$ 和 IL-6 的分泌	[59]
缓解神经疲劳	天麻素	天麻	200 mg/kg	小鼠负重游泳	促进 Nrf2 的磷酸化, 并正向调节其下游基因 HO-1 和 NQO1	[60]
	咖啡因	咖啡豆	6 mg/kg	昆明种小鼠负重游泳	兴奋中枢神经系统, 增加神经肌肉和神经元兴奋性的传导速度	[64]
	谷氨酸	谷类及动物大脑	50 mg/kg	大鼠负重游泳	中枢神经系统中主要的兴奋性神经递质, 增强神经传递速度	[66]

予大鼠 120、360 mg/kg 体重的枸杞多糖,发现枸杞多糖处理组相较于对照组显著延长了大鼠力竭游泳时间,提高大鼠肝糖原和肌糖原含量;研究结果显示,枸杞多糖通过 AMPK/PGC-1 $\alpha$  信号途径调控线粒体分裂,增加线粒体数量并改善线粒体结构,进一步改善机体能量代谢水平。可见 AMPK 和 PGC-1 $\alpha$  是参与能量代谢的关键调控因子,可通过升高血糖和改善线粒体功能等方式缓解机体疲劳<sup>[52]</sup>。

## 2.2 减少代谢产物积累

机体在运动的过程中除了能量的消耗外还伴随着大量代谢物质的产生,而当体内产生的大量代谢物质因不能及时清理而产生堆积时,将会对机体代谢功能造成影响,使人体更容易产生疲劳并降低运动能力。例如乳酸作为糖酵解的终产物,大量积累会导致肌肉组织和血液 pH 下降,一方面使能量供应相关酶活性降低导致体内能量供应的直接来源减少,另一方面减少 Ca<sup>2+</sup> 释放并影响肌肉收缩性。此外,当机体剧烈运动时还会升高骨骼肌中氨的浓度,继而激活磷酸果糖激酶,抑制丙酮酸氧化为乙酰辅酶 A,后促进血乳酸(Blood Lactic Acid, BLA)和肌肉乳酸、BUN、肌酸激酶(Creatine Kinase, CK)和 MDA 的产生<sup>[53]</sup>,导致体内环境失衡引发疲劳。因此及时清理机体代谢物质对缓解机体疲劳至关重要,水飞蓟素不仅是一种抗氧化剂,同时也是目前所发现最具肝疾疗效的类黄酮,并具有显著的抗疲劳效果。Jia 等<sup>[54]</sup>在饲料中添加 50、100 和 200 mg/kg 的水飞蓟素分别饲喂小鼠 4 周后,在负重游泳实验中,三组小鼠游泳时间较对照组小鼠分别延长了 37.5%、473.0% 和 274.9%,且小鼠血液中 BUN、BLA 以及 CK 的含量均显著降低,水飞蓟素通过升高小鼠机体糖原水平减少了因蛋白质被分解产生的 BUN 含量,并通过提高机体抗氧化能力减少了自由基对细胞膜等易损靶点的攻击,降低了 CK 的积累。此外,有研究表明铁皮石斛多糖可以提高小鼠 SOD 和 GSH-Px 水平,减少了因脂质氧化产生的 MDA 积累,增强了细胞膜结构的保护,降低了 LDH 和 CK 渗出到血液的含量,维持体内代谢物含量处于正常水平<sup>[39]</sup>。

## 2.3 维持机体氧化还原平衡

氧化应激与不同活性氧生成的氧化酶系统之间相互作用有关,细胞内 ROS 通常在内质网和线粒体中产生,主要包括如羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )、超氧化物(O<sub>2</sub> $\cdot^-$ )、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)等<sup>[55]</sup>。机体在正常情况下,体内的抗氧化系统会通过抗氧化酶调节自由基的生成和代谢,将机体维持在一个稳定的动态平衡中;但当机体运动时,自由基的生成速度大于被代谢掉的速度,会导致机体发生氧化应激损伤<sup>[56]</sup>。抗氧化剂可有效缓解体内氧化应激水平,摄入具有抗氧化活性的食源性成分可达到缓解疲劳的目的。Lu 等<sup>[25]</sup>研究发现带鱼糖蛋白具有良好的自由基清除能力,可以提高小鼠血清和大脑中抗氧化酶如过氧化氢酶(Catalase,

CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione Peroxidase, GPx)和 SOD 的活性,减少氧自由基的产生,降低小鼠机体在氧自由基作用下产生的脂质过氧化物含量,抑制脂质过氧化并发挥抗疲劳作用。此外,当发生氧化应激反应时,机体中的 PI3K/AKT 通路可通过上调 Nrf2/HO-1 通路表达促进对细胞的保护作用,而 Nrf2 是调控细胞氧化应激反应的重要转录因子。Bai 等<sup>[57]</sup>发现蛹虫草酸性多糖可通过促进 PI3K、AKT 蛋白磷酸化和 Nrf2 向细胞核转位,提高 HO-1 蛋白表达活性,最终抑制 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 诱导的氧化应激作用,达到缓解疲劳的作用。另有研究表明蜜环菌子实体多糖可改善小鼠肠道菌群分布,通过提高肠道产生丁酸菌群的丰度改善氧化应激产生的影响,减轻小鼠运动引起的疲劳<sup>[58]</sup>。

## 2.4 抑制炎症反应的发生

炎症的发生与机体氧化代谢的不平衡密切相关,过量的 ROS 可通过激活炎症转录因子、上调粘附分子、刺激趋化因子产生、炎症细胞募集等途径,促进 TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\beta$ 、IL-6 等炎症因子的产生,引起炎症损害血管细胞功能<sup>[55]</sup>,导致机体健康状况下降诱导疲劳发生。大量研究表明,多酚作为日常饮食中最常见的抗氧化剂,具有较好的抗氧化及抗炎作用,如茶多酚能显著降低小鼠血清中 IL-1 $\beta$ 、IL-2、IL-6 和 TNF- $\alpha$  的含量,并通过 IL-1 $\beta$  和 IL-2 增加自然杀伤细胞的活性,促进各种炎症细胞分泌炎症介质,加速疲劳的消除<sup>[8]</sup>。而过量的急性剧烈运动则会促进肝组织炎性细胞因子的释放,并诱发急性肝损伤。Zhu 等<sup>[59]</sup>发现玛卡酰胺可通过上调 HO-1 基因的表达,抑制血清中炎症因子 IL-1 $\beta$  和 IL-6 的分泌,显著抑制小鼠运动诱导的肝组织变化。另有研究表明,灌胃了天麻素的小鼠在负重游泳实验中,炎症因子 IL-1 $\beta$ 、TNF- $\alpha$  和 IL-6 的表达水平分别降低了 1.41 倍、1.01 倍和 1.15 倍,其通过促进 Nrf2 的磷酸化并正向调节了其下游基因 HO-1 和 NQO1,提高了机体的抗氧化能力并抑制了炎症反应的发生<sup>[60]</sup>。此外,除了通过调节 ROS 含量改善炎症外,抗炎细胞因子 IL-10 可以负向调节 TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\beta$  和 IL-6 的活性。例如 Duan 等<sup>[61]</sup>发现木犀草素-6-c-新橙皮苷可以抑制因运动引起的 IL-10 表达下调,使肝脏和骨骼肌的促炎因子水平恢复正常,降低炎症的发生概率并减轻机体疲劳程度。并且有研究发现调节免疫应答的转录因子 NF- $\kappa$ B 是促炎细胞因子释放的重要因子,海参肽可以通过抑制力竭游泳大鼠 NF- $\kappa$ B 的激活,减少炎性细胞因子的释放并发挥抗疲劳效果<sup>[62]</sup>。

## 2.5 缓解中枢神经疲劳

中枢疲劳发生的部位起于大脑,止于脊髓运动神经元,中枢神经系统机能的变化会影响运动神经的兴奋性,导致脑细胞工作发放频率下降。在进行长时间运动时,神经系统原有的动力定型就会受到破坏,进一步导致皮质功能发生紊乱,导致中枢疲劳。并且

在运动过程中, 如乙酰胆碱、5-羟色胺、 $\gamma$ -氨基丁酸、多巴胺、氨等物质水平的变化也会影响中枢神经系统的功能, 导致运动性疲劳的产生<sup>[63]</sup>。通过摄入调节中枢神经疲劳的食源性成分可缓解这一现象, 如咖啡因是一种甲基黄嘌呤, 能够通过兴奋中枢神经系统进而改善机体疲劳状态, Zeng 等<sup>[64]</sup>将牛蒡子素、咖啡因和葡萄糖制成复合制剂, 采用小鼠跑台模型检测抗疲劳作用, 在给药 0.5 h 后进行空地试验, 发现灌胃复合制剂与灌胃咖啡因的小鼠移动距离无明显差异, 但均显著大于对照组小鼠运动距离; 研究发现复合制剂通过咖啡因成分兴奋小鼠中枢神经系统, 由于咖啡因可与大脑中腺苷受体结合, 使腺苷无法抑制神经元活动, 使大脑中的神经元放电增加, 进而提升机体运动能力。此外, 谷氨酸作为中枢神经系统中主要的兴奋性神经递质, 既是唯一可作为脑细胞供能物质的氨基酸类, 又是神经中枢及大脑皮质的重要补剂。研究表明脑源性神经营养因子 (Brain-Derived Neuro Trophic Factor, BDNF) 信号通路通过调节突触摄取谷氨酸, 对下丘脑腹内侧核 (Ventromedial Hypothalamus, VMH) 神经元活性和能量稳态发挥重要动态调控作用<sup>[65]</sup>。当 VMH 星形胶质细胞谷氨酸摄取下降时, 星形胶质细胞的葡萄糖摄取也会减少, 导致神经元代谢底物和谷氨酰胺供应减少, 突触前末端的谷氨酸释放也减少, 降低机体大脑信息处理速度, 最终产生精神疲惫<sup>[66]</sup>, 因此, 适当摄入谷氨酸及富含谷氨酸的食物可缓解神经疲劳。

### 3 食源性抗疲劳成分复合相互作用

疲劳是一种多机制介导的现象, 根据缓解疲劳主要作用方式, 将多种抗疲劳成分进行分类和组合, 新的组合物可从多个途径发挥其抗疲劳作用。成分之间的相互作用主要表现为协同、加和或拮抗作用, 协同即多种化合物复配使用时产生的效果大于同一剂量单一物质的效果, 加和即其效果等于或接近于同一剂量的单一物质的效果, 拮抗则指化合物复配时产生的效果小于同一剂量单一物质的效果<sup>[69]</sup>。

#### 3.1 食源性抗疲劳成分复合协同增效作用

目前对于食源性抗疲劳成分的开发, 包括单一成分的抗疲劳效果测定和多成分之间的组合发挥抗疲劳作用, 并且成分之间的协同作用将会提高其组合物的抗疲劳能力。目前的研究中, 成分之间可通过改善机体各项生理指标, 调节相关信号通路表达因子水平, 进而发挥协同作用, 主要包括能量调节、调节机体氧化应激和抑制炎症反应等方面, 不同成分通过强化彼此共同抗疲劳作用靶点或进行功效互补, 使复合后成分抗疲劳功效显著提高<sup>[69-70]</sup>。如 Ruan 等<sup>[71]</sup>将魔芋葡甘聚糖和二氢杨梅素组合成复合物, 连续灌胃小鼠六周, 结果发现复合物处理组小鼠的负重耐力游泳时间延长了 132.83%, 显著高于魔芋葡甘聚糖 (36.84%) 和二氢杨梅素 (74.38%) 单独处理, 并且魔芋葡甘聚糖本身不含氧化还原基团, 抗氧化作用并不

明显, 但二者的复合物显著增强了 SOD、GPX 和 CAT 酶活性, 提高了小鼠在力竭游泳运动中的抗氧化能力。刘书伟等<sup>[72]</sup>探索了 1-抗坏血酸与槟榔提取液混合处理后对小鼠的抗疲劳作用, 其中混合处理组显著降低小鼠肌肉乳酸及血清 MDA 水平, 抑制了小鼠肌肉收缩力下降和脂质过氧化等现象发生, 表明两者混合处理极大程度上缓解了小鼠疲劳。

对各个成分的主要功效进行分类后, 将多种成分进行复合可发挥更全面的抗疲劳作用。如 Chen 等<sup>[21]</sup>对  $\beta$ -丙氨酸、异亮氨酸、槲皮素、甜菜碱、左旋肉碱等物质的抗疲劳方式进行归类分析后, 将各成分制成混合制剂并连续灌胃小鼠 7 d, 评估该配方对小鼠急性运动后的抗疲劳效果; 结果显示与对照组相比, 小鼠力竭游泳时间增加 14%, 跑步运动距离增加 20%, 研究表明左旋肉碱和槲皮素可促进脂肪酸氧化, 混合制剂通过提高机体对脂肪酸的利用, 减少了对糖原的消耗。此外, 混合制剂中槲皮素成分可以提高自由基清除效果, 能够增强小鼠机体抗氧化能力,  $\beta$ -丙氨酸成分增加了肌肉中肌肽的含量, 缓解了氧化应激引起的肌肉损伤。因此先对食源性成分作用机制展开分析, 再进行组合能够取得更全面的协同效果。但目前对于抗疲劳成分协同增效研究依然较少, 相关分子机制仍需要进一步研究。这对于深入研究食源性抗疲劳相互作用机制具有重要的意义, 可以为完善平衡膳食模式和维持人体健康提供理论依据。

#### 3.2 食源性抗疲劳成分复合拮抗抑制作用

食源性抗疲劳成分之间的拮抗作用会降低成分复合后的生成物吸收率和生物利用度。如人参皂苷 Re 和复合维生素 B 都是广泛使用的营养补充剂, 为了充分发挥它们的抗疲劳和提神效果通常一起服用, Chen 等<sup>[73]</sup>研究了复合维生素 B 对人参皂苷 Re 的抗疲劳活性和生物利用度的影响, 结果发现服用了人参皂苷 Re 的小鼠力竭游泳时间显著延长, 小鼠肝糖原水平升高, BUN、乳酸水平下降, 但对照组和混合处理组小鼠在在负重游泳后各项生理指标并无明显差异, 研究表明复合维生素 B 可影响人参皂苷 Re 的抗疲劳效果, 并导致人参皂苷 Re 的生物利用度降低。此外, 相对于小分子抗氧化物, 含有多个糖苷或其他取代基的大分子抗氧化物在复配时, 产生的空间位阻效应可能影响相互作用<sup>[74]</sup>。有研究表明将抗坏血酸与绿茶提取物以不同比例混合后对其抗氧化活性进行测定, 发现不同质量配比下成分之间相互作用有差异, 多数混合物表现出加和或拮抗的作用<sup>[69]</sup>。因此, 在研究抗疲劳成分的选择配合时一定要注意成分之间的相互作用, 或许单一的各个成分均具有显著的抗疲劳效果, 但当将它们组合在一起时也许会显现拮抗作用, 进而影响组合配方的总体效果。

## 4 结论与展望

疲劳的产生受到多种机制的调控和影响, 利用动物模型从耐力上的直观评价, 再结合各种生理生化

指标的评定,可以更加准确评价机体疲劳程度。并且随着对疲劳产生机制认识的深入,关于疲劳的研究也向着更加关键的信号通路调控及酶基因表达层面延伸,单一因素的致疲劳理论已经逐渐被综合性疲劳理论所替代。目前,国内外对于食源性抗疲劳成分的研究热点主要在于对食源性抗疲劳活性成分的筛选或者对已报道的抗疲劳活性成分进行复配,组合出抗疲劳效果更显著的复合配方。但在该领域的研究仍然存在一些不足, a.对于已开发的抗疲劳产品多数只采用了动物模型对抗疲劳效果进行评价,而对于人体方面的抗疲劳数据研究相对匮乏。 b.大部分实验研究只对抗疲劳活性成分进行了初步的抗疲劳效果评价,而更深层次的抗疲劳相关机制及作用靶点仍需要进一步研究。 c.对于成分之间复合的协同或拮抗作用机制研究较少。因此,在未来的研究中如何更准确评价疲劳程度、分析各成分之间的协同增效作用关系以及更全面的阐明抗疲劳机制仍是需要研究的重点。将运动疲劳产生机制与缓解方式相结合,以食源性抗疲劳成分为物质基础,然后根据不同人群、不同环境、不同疲劳程度进行产品开发,期待复配出更多可供选择具有针对性的绿色高效抗运动疲劳的食品或保健品。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] SEO J W, LEE J, JEON S, et al. Fatigue and somatization in shift-workers: Effects of depression and sleep[J]. *Journal of Psychosomatic Research*, 2023, 173: 111467.
- [2] KUNASEGARAN K, ISMAIL A M H, RAMASAMY S, et al. Understanding mental fatigue and its detection: A comparative analysis of assessments and tools[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e15744.
- [3] 李学芬, 郭承军, 马艳妮, 等. 中药及经典名方在抗运动性疲劳方面的应用及研究进展[J]. *亚太传统医药*, 2023, 19(10): 206-10. [LI X F, GUO C J, MA Y N, et al. Application and research progress of traditional Chinese medicine and classic prescriptions in anti-sport fatigue[J]. *Asia-Pacific Traditional Medicine*, 2023, 19(10): 206-210.]
- [4] 李庆喆, 张伟, 董玲. 运动性疲劳消除的研究进展[J]. *中国疗养医学*, 2022, 31(6): 577-9. [LI Q Z, ZHANG W, DONG L. Advances in the study of exercise fatigue elimination[J]. *Chinese Convalescent Medicine*, 2022, 31(6): 577-579.]
- [5] 付志彬, 唐小梅. 中医药抗运动性疲劳的研究进展[J]. *国外医药(抗生素分册)*, 2022, 43(3): 196-200. [FU Z B, TANG X M. Research progress of chinese medicine against exercise fatigue[J]. *Foreign Medicine (Antibiotics Fascicle)*, 2022, 43(3): 196-200.]
- [6] 朱世敏, 高廷梅. 运动营养膳食补充对羽毛球运动员运动疲劳恢复的影响[J]. *食品安全导刊*, 2023(19): 125-127,31. [ZHU S M, GAO T M. Effects of sports nutrition dietary supplementation on recovery from exercise fatigue in badminton players[J]. *Food Safety Journal*, 2023(19): 125-127,31.]
- [7] 朱文军. 抗运动疲劳食源性活性成分的研究进展[J]. *食品安*
- 全质量检测学报, 2021, 12(11): 4589-4595. [ZHU W J. Progress in the study of food-borne active ingredients against exercise fatigue[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(11): 4589-4595.]
- [8] BI Y X, LIU A J, LIU Y, et al. Molecular and biochemical investigations of the anti-fatigue effects of tea polyphenols and fruit extracts of lycium ruthenicum murr. on mice with exercise-induced fatigue[J]. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 2023, 10: 1223411.
- [9] LEI C F, CHEN J X, HUANG Z, et al. Ginsenoside rg1 can reverse fatigue behavior in cfs rats by regulating egfr and affecting taurine and mannose 6-phosphate metabolism[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2023, 14: 1163638.
- [10] 胡云峰, 李苛祎, 胡开蕾, 等. 熟制枸杞提取物抗疲劳效果研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(4): 29-33. [HU Y F, LI K W, HU K L, et al. Study on the anti-fatigue effect of cooked goji berry extracts[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(4): 29-33.]
- [11] WANG C, ZHU H K, CHENG Y L, et al. Aqueous extract of brassica rapa L. 's impact on modulating exercise-induced fatigue via gut-muscle axis[J]. *Nutrients*, 2023, 15(22): 4737.
- [12] 倪冰倩, 李秀婷, 张成楠, 等. 天然物质抗运动性疲劳活性分子机理的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(10): 208-214. [NI B Q, LI X T, ZHANG C N, et al. Progress in the study of active molecular mechanisms of natural substances against exercise fatigue[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(10): 208-214.]
- [13] YIN X C, SONG J, XUE R, et al. Novel herbal beverage ameliorates exercise-induced fatigue in mice by modulating oxidative stress and reshaping the gut microbiota[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103135.
- [14] 曾万波. 牛蒡子苷元组合剂及其衍生物的设计、合成和抗疲劳活性评价[D]. 北京: 军事科学院, 2023. [ZENG W B. Design, synthesis and evaluation of anti-fatigue activity of burdock saponin combinations and their derivatives[D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2023.]
- [15] FANG L, ZHANG R X, WEI Y, et al. Anti-fatigue effects of fermented soybean protein peptides in mice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 102(7): 2693-2703.
- [16] LI X X, LIAO A M, DONG Y Q, et al. *In vitro* dynamic digestion and anti-fatigue effects of wheat embryo albumin[J]. *Food & Function*, 2022, 13(5): 2559-2569.
- [17] ZHANG D K, DENG X, LI M Q, et al. Thermal treatment enhances the resisting exercise fatigue effect of *Phyllanthus emblica* L.: Novel evidence from tannin conversion *in vitro*, metabolomics, and gut microbiota community analysis[J]. *Chinese Medicine*, 2023, 18(1): 127.
- [18] 林彦妮. 利用斑马鱼胚胎评价秋水仙碱的毒性及其机制研究[D]. 南宁: 广西医科大学, 2014. [LIN Y N. Evaluation of colchicine toxicity and its mechanism using zebrafish embryos[D]. Nanning: Guangxi Medical University, 2014.]
- [19] 王玉, 刘采云. 鸡蛋清水解物对亚硫酸钠诱发的疲劳斑马鱼的改善作用[J]. *农产品加工*, 2020(19): 10-3,20. [WANG Y, LIU C Y. Amelioration of sodium sulfite-induced fatigue in zebrafish by egg white hydrolysate[J]. *Agro-processing*, 2020(19): 10-3,20.]
- [20] WEN W X, CHEN X L, HUANG Z Q, et al. Lycopene increases the proportion of slow-twitch muscle fiber by AMPK signaling to improve muscle anti-fatigue ability[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2021, 94: 108750.
- [21] CHEN H, MA X, CAO L X, et al. A multi-ingredient formu-

- la ameliorates exercise-induced fatigue by changing metabolic pathways and increasing antioxidant capacity in mice[J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3120.
- [ 22 ] KANG J Y, KIM D Y, LEE J S, et al. Korean red ginseng ameliorates fatigue via modulation of 5-HT and corticosterone in a sleep-deprived mouse model[J]. *Nutrients*, 2021, 13(9): 3121.
- [ 23 ] HUANG G X, SU L, ZHANG N, et al. The prebiotic and anti-fatigue effects of hyaluronan[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 977556.
- [ 24 ] LIU Y Y, LIU C J. Antifatigue and increasing exercise performance of actinidia arguta crude alkaloids in mice[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2016, 24(4): 738–745.
- [ 25 ] LU X D, CHEN J Q, HUANG L Y, et al. The anti-fatigue effect of glycoprotein from hairtail fish (*trichiurus lepturus*) on BALB/c mice[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1245.
- [ 26 ] PENG F, YIN H Y, DU B, et al. Anti-fatigue activity of purified flavonoids prepared from chestnut (*castanea mollissima*) flower[J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 79: 104365.
- [ 27 ] 梁凯博. 运动性疲劳产生机制的研究现状[J]. 当代体育科技, 2014, 4(18): 12,4. [ LIANG K B. Current status of research on mechanisms of exercise fatigue generation[J]. *Contemporary Sports Technology*, 2014, 4(18): 12,4. ]
- [ 28 ] CAI B N, YI X X, WANG Z, et al. Anti-fatigue effects and mechanism of synnathus schlegeli peptides supplementation on exercise-fatigued mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 110: 105846.
- [ 29 ] LI C G, ZHU X J, ZHANG J X, et al. Polysaccharides from apple pomace exhibit anti-fatigue activity through increasing glycogen content[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 60(1): 283–291.
- [ 30 ] FENG T, HUANG Y Y, TANG Z H, et al. Anti-fatigue effects of pea (*Pisum sativum* L.) peptides prepared by compound protease[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 58(6): 2265–2272.
- [ 31 ] LEE M C, HO C S, HSU Y J, et al. Live and heat-killed probiotic lactobacillus paracasei ps23 accelerated the improvement and recovery of strength and damage biomarkers after exercise-induced muscle damage[J]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4563.
- [ 32 ] 温欣, 田培郡, 严中汉, 等. 植物乳杆菌 CCFM1280 对小鼠运动性疲劳的缓解作用[J]. 食品与发酵工业: 1–9. [ WEN X, TIAN P J, YAN Z H, et al. Alleviating effect of lactobacillus plantarum CCFM1280 on exercise fatigue in mice[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 1–9. ]
- [ 33 ] LI J, SUN Q R, MENG Q R, et al. Anti-fatigue activity of polysaccharide fractions from lepidium meyenii walp. (maca)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 95: 1305–1311.
- [ 34 ] LIU R, LI Z, YU X C, et al. The effects of peanut oligopeptides on exercise-induced fatigue in mice and its underlying mechanism[J]. *Nutrients*, 2023, 15(7): 1743.
- [ 35 ] WANG X Q, YU H H, XING R G, et al. Structural properties, anti-fatigue and immunological effect of low molecular weight peptide from monkfish[J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 105: 105546.
- [ 36 ] LIU S W, MENG F N, ZHANG D, et al. Lonicera caerulea berry polyphenols extract alleviates exercise fatigue in mice by reducing oxidative stress, inflammation, skeletal muscle cell apoptosis, and by increasing cell proliferation[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 853225.
- [ 37 ] NAM S Y, KIM H M, JEONG H J. Anti-fatigue effect by active dipeptides of fermented porcine placenta through inhibiting the inflammatory and oxidative reactions[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2016, 84: 51–59.
- [ 38 ] ZHANG Y Y, RYU B, CUI Y H, et al. A peptide isolated from hippocampus abdominalis improves exercise performance and exerts anti-fatigue effects via AMPK/PGC-1 $\alpha$  pathway in mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 61: 103489.
- [ 39 ] WEI W, LI Z P, ZHU T, et al. Anti-fatigue effects of the unique polysaccharide marker of dendrobium officinale on BALB/c mice[J]. *Molecules*, 2017, 22(1): 155.
- [ 40 ] YU J C, JIANG W H, WANG S Y, et al. Microencapsulated hawthorn berry polyphenols alleviate exercise fatigue in mice by regulating AMPK signaling pathway and balancing intestinal microflora[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 97: 105255.
- [ 41 ] YANG C H, KUO W S, WANG J S, et al. Improvement in the blood urea nitrogen and serum creatinine using new cultivation of cordyceps militaris[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, 2022: 1–10.
- [ 42 ] HSU T H, HONG H T, LEE G C, et al. Supplementation with goat meat extract improves exercise performance, reduces physiological fatigue, and modulates gut microbiota in mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 101: 105410.
- [ 43 ] IKARASHI N, FUKAZAWA Y, TODA T, et al. Effect of conclewan on endurance capacity in mice[J]. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 2012, 35(2): 231–238.
- [ 44 ] RUSIP G, ILYAS S, LISTER I N E, et al. The effect of ingestion of red dragon fruit extract on levels of malondialdehyde and superoxide dismutase after strenuous exercise in rats (*rattus norvegicus*)[J]. *F1000Research*, 2021, 10.
- [ 45 ] DWI-PRIMAYANTI I D A I, PURNAWATI S, SUKANATA W. Effect of kele honey (*trigona* sp) in malondialdehyde and superoxide dismutase serum and hepatic tissue of white rats (*rattus norvegicus*) exposed to cigarettes smoke[J]. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 2020, 13(4): 1885–1891.
- [ 46 ] CHEN J Q, LU X D, CHEN P X, et al. Anti-fatigue effect of glycoprotein from hairtail (*trichiurus lepturus*) by-products in a behavioral mouse model[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 18: 100645.
- [ 47 ] IBRAHIM I E I, UTAMI T P, SIAGIAN M, et al. Effects of moderate-intensity exercise training on stress oxidative marker; Malondialdehyde and superoxide dismutase activity in abdominal Aorta of juvenile rats[J]. *International Journal of Research Granthaa-layah*, 2020, 5(12): 99–105.
- [ 48 ] AN Z H, WANG Y F, LI X B, et al. Antifatigue effect of sea buckthorn seed oil on swimming fatigue in mice[J]. *Journal of Food Science*, 2023, 88(4): 1482–1494.
- [ 49 ] 赵静. 运动疲劳机制及食源性抗疲劳活性成分研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(9): 3565–3571. [ ZHAO J. Progress in the study of exercise fatigue mechanism and food-borne anti-fatigue active ingredients[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(9): 3565–3571. ]
- [ 50 ] JIANG P, JI X, XIA J, et al. Structure and potential anti-fatigue mechanism of polysaccharides from bupleurum chinense DC[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 306: 120608.
- [ 51 ] PENG Y F, ZHAO L L, HU K, et al. Anti-fatigue effects of lycium barbarum polysaccharide and effervescent tablets by regulating oxidative stress and energy metabolism in rats[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(18): 10920.
- [ 52 ] VILLAREAL M O, MATSUKAWA T, ISODA H. I-Cit-

- rulline supplementation-increased skeletal muscle PGC-1 $\alpha$  expression is associated with exercise performance and increased skeletal muscle weight[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2018, 62(14): 1701043.
- [ 53 ] GOUGH L A, SPARKS S A, MCNAUGHTON L R, et al. A critical review of citrulline malate supplementation and exercise performance[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2021, 121(12): 3283–3295.
- [ 54 ] JIA L M, ZHAO F. Evaluation of silymarin extract from silybum marianum in mice: Anti-fatigue activity[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(4): 914–921.
- [ 55 ] CHENG X M, HU Y Y, YANG T, et al. Reactive oxygen species and oxidative stress in vascular-related diseases[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022, 2022: 1–11.
- [ 56 ] 慕英杰. 天然多糖缓解运动疲劳的机制及研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(5): 343–348. [ MU Y J. Mechanism and research progress of natural polysaccharides in relieving exercise fatigue[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(5): 343–348. ]
- [ 57 ] BAI L D, TAN C J, REN J, et al. Cordyceps militaris acidic polysaccharides improve learning and memory impairment in mice with exercise fatigue through the PI3K/NRF2/HO-1 signalling pathway[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 227: 158–172.
- [ 58 ] SUN H H, SHU F, GUAN Y, et al. Study of anti-fatigue activity of polysaccharide from fruiting bodies of *Armillaria gallica* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 241: 124611.
- [ 59 ] ZHU H K, WANG R Y, HUA H Y, et al. The macamide relieves fatigue by acting as inhibitor of inflammatory response in exercising mice: from central to peripheral[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2022, 917: 174758.
- [ 60 ] ZHOU Y P, WU Q, YU W, et al. Gastrodin ameliorates exercise-induced fatigue via modulating Nrf2 pathway and inhibiting inflammation in mice[J]. *Food Bioscience*, 2023, 51: 102262.
- [ 61 ] DUAN F F, GUO Y, LI J W, et al. Antifatigue effect of luteolin-6-c-neohesperidoside on oxidative stress injury induced by forced swimming of rats through modulation of Nrf2/ARE signaling pathways[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, 2017: 1–13.
- [ 62 ] YE J, SHEN C H, HUANG Y Y, et al. Anti - fatigue activity of sea cucumber peptides prepared from *stichopus japonicus* in an endurance swimming rat model[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(13): 4548–4556.
- [ 63 ] 周娟. 抗运动性疲劳的营养补充研究[J]. *食品与发酵科技*, 2020, 56(1): 96–99. [ ZHOU J. A study of nutritional supplementation to combat exercise fatigue[J]. *Food & Fermentation Technology*, 2020, 56(1): 96–99. ]
- [ 64 ] ZENG W B, SUN L, ZHU H M, et al. A composite arctigenin/caffeine/glucose formulation enhances anti-fatigue effect[J]. *Food Bioscience*, 2022, 49: 101878.
- [ 65 ] 高照, 段锐. 运动性疲劳的分子生物学机制及相关特异性基因靶点的研究进展[J]. *生理科学进展*, 2023, 1–13. [ GAO Z, DUAN R. Advances in the molecular biological mechanisms of exercise fatigue and related specific gene targets[J]. *Advances in Physiological Sciences*, 2023, 1–13. ]
- [ 66 ] RÖNNBÄCK L, JOHANSSON B. Long-lasting pathological mental fatigue after brain injury—a dysfunction in glutamate neurotransmission?[J]. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2022, 15: 791984.
- [ 67 ] LEE M C, HSU Y J, LIN Y Q, et al. Effects of perch essence supplementation on improving exercise performance and anti-fatigue in mice[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(3): 1155.
- [ 68 ] YANG M, TAO L, ZHAO C C, et al. Antifatigue effect of panax notoginseng leaves fermented with microorganisms: *In vitro* and *in vivo* evaluation[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 824525.
- [ 69 ] 陈璇. 黄酮类化合物(槲皮素、木犀草素)与类胡萝卜素(番茄红素、叶黄素)协同抗氧化作用及分子机制[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [ CHEN X. Synergistic antioxidant effects of flavonoids (quercetin, lignans) and carotenoids (lycopene, lutein) and their molecular mechanisms[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022. ]
- [ 70 ] DU P, DU C H, WANG R Y, et al. Caffeine combined with taurine improves cognitive function and locomotor performance in sleep-deprived mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 99: 1155.
- [ 71 ] RUAN S L, GAO X F, LI B, et al. The synergic effects and mechanism of KGM–DMY complex in the prevention of obesity and enhancement of fatigue resistance in mice[J]. *Food & Function*, 2023, 14(6): 2607–2620.
- [ 72 ] 刘书伟, 王燕, 都二霞, 等. L-抗坏血酸对槟榔处理小鼠抗疲劳作用协同增效研究[J]. *食品科技*, 2016, 41(9): 112–116. [ LIU S W, WANG Y, DU E X, et al. Synergistic study of the anti-fatigue effect of L-ascorbic acid on betel nut-treated mice[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(9): 112–116. ]
- [ 73 ] CHEN Y B, WANG Y F, HOU W, et al. Effect of b-complex vitamins on the antifatigue activity and bioavailability of ginsenoside Re after oral administration[J]. *Journal of Ginseng Research*, 2017, 41(2): 209–214.
- [ 74 ] YAP V L, TAN L F, RAJAGOPAL M, et al. Evaluation of phytochemicals and antioxidant potential of a new polyherbal formulation TC-16: additive, synergistic or antagonistic?[J]. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 2023, 23(1): 93.