

运动疲劳机制及食源性抗疲劳活性成分研究进展

赵 静*

(黄河科技学院, 郑州 450063)

摘 要: 运动疲劳是运动本身引起的机体工作能力暂时降低, 表现为经过适当时间休息和调整可以恢复的生理现象, 也是大脑皮层保护性抑制机制的结果, 过度疲劳极易诱发运动损伤, 直接影响人体正常运动。因此, 如何有效的预防运动性疲劳的发生及快速恢复成为当前研究的重点方向。本文通过总结近几年关于运动疲劳产生机制: 能量物质消耗、代谢产物堆积、保护性抑制、钙离子代谢紊乱等主流学说, 对食源性抗运动疲劳有效成分及其作用机理进行综述, 并参照多种活性成分在抗疲劳产品研发中的应用, 提出多种生物活性肽复合的抗疲劳产品具有广泛应用性, 以期为研发更安全、绿色、有效的抗疲劳产品提供理论指导。

关键词: 运动疲劳; 抗疲劳; 食源性; 活性成分

Research progress of sports fatigue mechanism and food-borne anti-fatigue active ingredients

ZHAO Jing*

(Huanghe Science and Technology University, Zhengzhou 450063, China)

ABSTRACT: Sports fatigue is a temporary decrease in the body's work capacity caused by exercise itself, which is manifested as a physiological phenomenon that can be recovered after proper time of rest and adjustment. It is also the result of the protective inhibition mechanism of the cerebral cortex. Excessive fatigue can easily induce sports injuries and directly affect the normal movement of the human body. Therefore, how to effectively prevent the occurrence of exercise-induced fatigue and fast recovery has become the key direction of current research. This paper summarized the main theories on the mechanism of exercise fatigue in recent years: energy consumption, accumulation of metabolites, protective inhibition, calcium ion metabolism disorders, etc.. It also summarized the effective ingredients of food-borne anti-exercise fatigue and their mechanism of action, and proposed that the anti-fatigue products compounded with a variety of biologically active peptides had a wide range of applications according to the application of multiple active ingredients in the research and development of anti-fatigue products, in order to provide theoretical guidance for the development of more safe, green and effective anti-fatigue products.

KEY WORDS: exercise fatigue; fatigue resistance; foodborne; dietary bioactive components

0 引 言

关于运动疲劳概念的提出已经近 200 年的历史, 最早开始于 1880 年, 莫索(Mosso)首先研究了屈指肌的工作能

力变化^[1], 此后许多著名学者从多种角度出发采用不同的手段对运动性疲劳进行广泛的研究, 提出了多种定义。直到 1982 年, 在美国波士顿召开的第五届国际运动生物化学会议将疲劳统一定义: 运动性疲劳是人体脑力和体力持

基金项目: 2021 年河南省教育厅人文社科项目(2021-ZDJH-204)

Fund: Supported by the Humanities and Social Science Project of Henan Education Department in 2021(2021-ZDJH-204)

*通信作者: 赵静, 硕士, 主要研究方向为体育教育训练。E-mail: 186547@163.com

*Corresponding author: ZHAO Jing, Master, Zhengzhou Vocational College of Tourism, Zhengzhou 450000, China. E-mail: 186547@163.com

续活动到一定阶段时出现的一种生理现象,表现为机体生理过程不能继续其机能在特定水平上或不能维持预定的运动强度^[2],且运动训练强度决定了运动疲劳产生的程度,适当强度的运动性疲劳通过合理的恢复手段可以促进人体技能水平的不断提高,而过度疲劳不仅不利于运动成绩的提高,还可能会造成运动损伤。对于其生理产生机制,目前主要概括为:能量物质消耗学说、代谢产物堆积堵塞学说、保护性抑制学说等^[3-5]。

近年来国内外学者对动植物中的抗疲劳活性物质进行了大量研究,发现一些天然活性成分多肽、氨基酸、多糖、维生素、多酚等都具有一定的抗运动疲劳功效,且广泛的存在于食源性动植物中。本文重点从运动疲劳产生机制、具有潜在抗疲劳作用的食源性活性成分及其应用等方面进行综述,以期遴选安全有效的抗疲劳活性成分,研发新型复合抗疲劳产品提供参考。

1 运动疲劳产生的生理机制

1.1 能量物质耗竭学说

三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)是人体各项生命活动中的直接能源物质,此外还有糖类、脂肪、蛋白质等营养物质为机体运动间接供能。运动时,磷酸原系统、乳酸能系统、有氧氧化系统为生命活动提供能量。当能量供应充足时,肌肉组织工作正常,从而完成运动过程;当能量物质供应短缺,运动员体内产生的能量不能维持运动需求,肌肉功能受损,不能完成预定强度工作,从而出现疲劳感。

研究发现,机体运动的持续时间和强度是通过影响能源物质消耗速率从而影响运动疲劳产生:在短时间、高强度的运动中,ATP-CP 系统提供主要能量,体内 ATP 和磷酸肌酸等高能磷酸物含量下降,当疲劳产生时,肌肉中的磷酸肌酸含量降至运动前的 20%^[6],在长时间、低强度的运动中,有氧氧化系统提供主要能量,糖原作为储能物质被分解用以供给运动消耗和维持血糖平衡,长时间的运动会大量消耗糖原,产生运动性疲劳。动物实验发现^[5],当狗运动至疲劳时,血糖含量下降,注射肾上腺素,机体对肌肉组织的糖利用率提高,使血糖浓度升高,狗的运动能力明显恢复。此外,脂肪大量动员时会产生大量的自由脂肪酸,而血浆游离脂肪酸的累积则促进游离色氨酸的增加,过多的色氨酸进入脑内引起 5-羟色胺水平上升,从而抑制大脑工作能力,加强中枢疲劳^[7]。在不同的运动强度下,机体对于能量物质的消耗顺序也各不相同,有针对性地补充能量能够缓解疲劳的产生。

1.2 代谢产物积累学说

相对于静息状态下,运动员在高强度运动时消耗更多能源物质,同时也产生更多的代谢产物(乳酸、 NH_4^+ 、 H^+

等)^[8-9],如果这些代谢产物不能被及时清除,将会对正常的物质代谢造成通道堵塞,导致肌肉组织运动功能下降,产生运动性疲劳。在高强度运动中,运动员主要通过乳酸能系统供能,体内糖原(葡萄糖)缺氧分解产生乳酸,随着运动强度的增加,体内乳酸含量持续堆积,剧烈运动时,肌肉乳酸含量可达 40 mmol/kg 湿重,血乳酸可达 18 mmol/L^[10],乳酸解离产生 H^+ 降低内环境 pH 值,抑制磷酸化酶和磷酸果糖激酶活性,从而抑制乳酸能系统供能,造成 ATP 供应不足,产生疲劳感^[11];此外,脑细胞对血液酸碱度的变化非常敏感,血液 pH 值下降,可造成脑细胞工作能力下降^[12-13]。SHANELY 等^[14]研究证实,乳酸含量越高,机体运动功能下降越明显,疲劳恢复期增长。

人体运动时肌肉收缩还可产生 NH_4^+ (AMP 经脱氨酶催化),当体内 ATP 被大量消耗时,体内氨含量增高^[15],氨含量增高可促进糖酵解反应,产生乳酸和 H^+ ,导致一些酶活性降低甚至失活,乳酸和氨共同作用使身体机能下降,产生疲劳^[16]。研究表明^[17],体内 NH_4^+ 的生成与运动强度呈正相关,在运动过程中,由于氨基酸代谢增强及肌肉中二磷酸腺苷浓度升高,引起血氨浓度上升,抑制柠檬酸脱氢酶活性,影响机体能量代谢及运动平衡,甚至引起肌肉痉挛^[18]。FWENSTROM、BANISTER 等^[19-20]研究证实,血氨含量升高后可进入脑组织,对大脑细胞有神经毒性作用,破坏谷氨酸和 γ -氨基丁酸的平衡,导致中枢疲劳产生。总而言之,及时清除代谢产物,稳定体内乳酸和 NH_4^+ 含量对于缓解疲劳有重要意义。

1.3 中枢神经保护性抑制学说

根据巴甫洛夫学派的观点,大脑产生的保护性抑制引发了运动疲劳。在高强度的脑力或体力运动时,大量冲动刺激大脑皮质相应的神经元,产生长时间兴奋,为避免糖原等能量物质过多消耗,当达到一定程度时,大脑皮层会产生保护性抑制作用,产生疲劳感提醒身体停止运动^[21],在长时间高强度的运动中,血浆支链氨基酸的含量会减小,使芳香族氨基酸(aromatic amino acid, AAA)/支链氨基酸(branched-chain amino acid, BCAA)值增加,此外,疲劳时大脑中的 γ -氨基丁酸含量增加,也会导致大脑皮层产生抑制^[22]。

1.4 Ca^{2+} 代谢紊乱学说

Ca^{2+} 在细胞内神经-肌肉信号传导、有氧运动产生的运动性疲劳中为重要的调控因子^[23]。近来研究发现,高浓度的 Ca^{2+} 长时间存在于胞浆中可以诱发正常肌细胞的凋亡,肌细胞内钙稳态失调最终会导致肌肉疲劳及损伤^[24]。此外,运动引起胞浆 Ca^{2+} 浓度增加,线粒体具有缓冲调节胞浆 Ca^{2+} 浓度的功能,当疲劳发生时,引发细胞膜系统脂质过氧化反应,线粒体膜对 Ca^{2+} 的通透性增加,大量 Ca^{2+} 进入线粒体,出现钙反常,过量的钙离子积累又会抑制线粒体

的氧化磷酸化过程,使氧化磷酸化脱耦联,ATP 生成减少,进而造成细胞钙离子代谢紊乱,形成恶性循环,引起不同程度的肌肉疲劳及损伤^[25]。

2 食源性抗疲劳活性成分的研究

目前研究发现的食源性抗疲劳成分多种多样,但整体还处于初步研究状态。评价疲劳的方法有耐力实验和生化指标检测。对于评价运动耐力,通常使用小鼠力竭游泳实验。根据《保健食品检验与评价技术规范实施手册》中判定标准:“负重游泳实验结果阳性,且血乳酸、血清尿素氮、肝糖原 3 项指标中任意 2 项阳性,可判定该受试样品具有缓解体力疲劳功能的作用”^[26]。近年来学者发现^[18],食物中的一些天然活性成分:多肽,氨基酸,多糖,维生素,胡萝卜素,糖苷等都具有抗疲劳效果。

2.1 生物活性肽类

食源性生物活性肽主要是蛋白质经酶、酸或碱的水解产物,以及直接从高含量活性肽的天然动植物组织中直接提取得到,具有吸收快,吸收全面,不耗能等特点^[27]。如表 1 所示,水产、昆虫和哺乳动物等是动物食源性抗疲劳生物活性肽的主要来源,大豆,玉米和花生等是植物食源性

抗疲劳生物活性肽的主要来源,且不同来源的生物活性肽抗运动疲劳的机制不同,生物活性通过降低骨骼肌线粒体肿胀膨胀度和线粒体膜通透性、降低血尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)含量、提高肝糖原、过氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase, LDH)含量来缓解运动疲劳^[28-36]。

2.2 多糖类

多糖是一类天然活性生物大分子,具有免疫调节功能。近些年研究发现^[37],糖类在抗疲劳中也小有成效,从植物中提取分离得到的多糖类化合物具有清除自由基、抑制脂质过氧化作用、抑制亚油酸氧化等抗疲劳作用。在牛佳牧等^[38]的研究中,通过给雄性 ICR 小鼠补充 20 mg/kg 的五味子多糖(SCP-A)溶剂,进行负重游泳、前肢握力实验以及血清尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)、血清乳酸(lactic acid, LA)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)、8-OHdG 水平的测定,进一步证实了 SCP-A 具有显着的抗疲劳、抗氧化作用。此外,如表 2 所示,蘑菇、枸杞、黑木耳、铁皮石斛等为食源性抗运动疲劳多糖的主要来源,主要通过减小血乳酸及降低 BUN 水平,提高肝糖原和肌糖原的储备机制抗疲劳^[39-44]。

表 1 动植物抗疲劳活性肽作用机理及评价模型
Table 1 Mechanism and evaluation model of animal and plant anti-fatigue active peptides

活性成分	研究对象	评价模型	机理	提取来源	文献
海参肽	大鼠	负重游泳	降低骨骼肌线粒体肿胀膨胀度和线粒体膜通透性,增强骨骼肌线粒体的呼吸功能,上调线粒体生成转录因子 PGC-1 α 和 ERR 的表达	海参	[28-29]
牛血低聚肽	大鼠	负重游泳	降低 BUN 含量、BLA 产生,维持 HG 稳定提高缺氧(37 $^{\circ}$ C, 2%O $_2$)条件下 H9c2 心肌细胞的存活率	牦牛	[30]
小麦低聚肽	8 周龄健康 SD 大鼠	负重游泳	促进骨骼肌 SOD 活性的提高,加速氧自由基的清除降低骨骼肌 MDA 的含量	小麦	[31]
南极磷虾蛋白肽	昆明种小鼠	负重游泳、常压耐缺氧	肝糖原含量提高,BUN 含量降低,LDH 含量显著提高,LA 清除率增强	南极磷虾	[32]
玉米胚肽	昆明种小鼠	负重游泳	肝糖原含量提高,BUN 含量降低,血乳酸含量运动后下降较快	玉米胚芽	[33]
深海三文鱼蛋白肽	小鼠	负重游泳	含有甘氨酸,谷氨酸,天门冬氨酸等多种氨基酸,降低 BUN 含量	深海三文鱼	[34]
鹿茸多肽	小鼠	负重游泳	提高 SOD, LDH, GSH-Px 活性,加速自由基的清除增强小鼠的抗氧化能力	鹿茸	[35]
蚕蛹蛋白多肽	小鼠	负重游泳爬杆训练	增加小鼠体内肝糖原和肌糖原的含量,减少运动过程中的 BUN 的含量,同时减少运动过程中的血乳酸含量,降低疲劳后血乳酸含量	蚕蛹	[36]

表 2 植物抗疲劳多糖作用机理及评价模型
Table 2 Mechanism and evaluation model of plant anti-fatigue polysaccharides

活性成分	研究对象	评价模型	机理	提取来源	文献
雷蘑胞外粗多糖	小鼠	负重游泳	减小血乳酸及 BUN 水平降低, 促进机体中肝糖原储备水平的提升, 改善疲劳症状	雷蘑	[39]
远志多糖	小鼠	负重游泳	体内肝、肌糖原储存的浓度增大, 并可抑制血清尿素氮生成, 增强体内乳酸脱氢酶的活力减少乳酸的累积, 氧自由基的清除率高	远志	[40]
枸杞多糖	小鼠	爬杆模型负重游泳 肝重称量	增加肝糖原的储备, 为机体提供更多的能量来达到抗疲劳	枸杞	[41]
黑木耳多糖	小鼠	负重游泳	过氧化物物质丙二醛(malondialdehyde, MDA)和 8-羟基脱氧鸟苷水平降低, 抗氧化酶如超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶活性增强	黑木耳	[42]
铁皮石斛多糖	小鼠	负重游泳	降低运动时体内 BLA 与 BUN 的浓度, 减少有害代谢产物的积累, 从而提高运动耐力	铁皮石斛	[43]
杏鲍菇多糖	小鼠	负重游泳爬杆模型	提高肝糖原和肌糖原储量	新鲜杏鲍菇	[44]

2.3 氨基酸类

作为蛋白质的基本组成成分, 氨基酸能够为运动中的机体提供能量, 补充氨基酸可在一定程度上补充机体高强度运动时消耗的蛋白质, 对于缓解疲劳有重要作用。研究发现^[45], 对雄性昆明鼠连续 7 d 灌胃 40 mL·kg⁻¹BW 的金针菇氨基酸液后, 小鼠体内肝糖原的含量显著增加, 小鼠负重游泳时间明显增长, MDA、血乳酸和血清尿素氮的含量明显降低。同时, 羊肚菌氨基酸、姬松茸支链氨基酸、东北野生榛蘑氨基酸等^[46-48]在实验中均表现出了较高的抗疲劳功效。牛磺酸是一种非蛋白质氨基酸, 可通过阻断脂质过氧化反应, 促进机体自由基的消除, 改善机体抗疲劳能力^[49]。

支链氨基酸包括异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸, 是机体自身不能合成必须由食物蛋白摄取的 3 种必需氨基酸。支链氨基酸能降低运动后机体内自由基的水平并能提高抗氧化酶的活性, 同时也有利于机体内钙浓度稳定, 可降低运动后血乳酸浓度, 对机体运动后的疲劳恢复有一定的作用, 并能提高机体运动能力^[50]。此外, 运动后补充一定量的支链氨基酸还可降低色氨酸进入大脑的速率, 维持脑细胞正常功能, 减缓中枢疲劳的发生。

2.4 多酚类

多酚是一种含有多羟基的芳香族化合物, 广泛存在于深色蔬菜、水果、豆类等植物性食物中, 是天然的抗氧化剂, 其主要可分为类黄酮、酚酸、鞣质三大类, 近些年大量研究发现^[51], 多酚具有抗疲劳功效, 酚类物质可以通过酚羟基与自由基反应生成稳定的半醌式自由基, 从而终止自由基

反应, 使多酚具有强抗氧化性和清除自由基的能力。

陈蓉等^[52]对健康小鼠连续 5 d 灌胃不同剂量芡实种皮多酚生理盐水溶液(400、200、100 mg/kg·d⁻¹)末次 30 min 后进行负重游泳、常压缺氧实验, 末次发生 24 h 后测定肝糖原肌糖原含量, 发现疲劳小鼠肝糖原, 肌糖原储备增多, 血清尿素氮水平降低, 血清和肝脏中乳酸脱氢酶含量升高, 证实了芡实种皮多酚具有抗缺氧、抗疲劳作用。西安理工大学体育部^[53]的实验发现经过 30 d 不同剂量茶多酚提取物灌胃, 与对照组相比, 运动后大鼠血乳酸脱氢酶活力提高, 同时血乳酸及尿素氮水平降低, 且 300 mg/kg 剂量的效果最为明显。刘琦^[54]在研究短梗五加多酚最佳纯化工艺过程中, 配制浓度为 0.1 mg/mL、pH=4 的多酚吸附液 50 mL, 以 2 mL/min 流速上样至 5 g AB-8 树脂进行吸附, 采用体积为 100 mL 的 70%乙醇溶液, 以 1 mL/min 流速洗脱, 该吸附液可显著延长小鼠的游泳力竭时间, 从而提高抗疲劳水平。此外, 单宁酸、花青素、儿茶酸、葛根素、茶多酚、芦丁、姜黄素、槲皮素、大豆异黄酮等天然多酚类化合物都具有明显的抗疲劳作用^[55]。

2.5 维生素类成分的抗疲劳研究

维生素是机体生长发育所必需的营养元素, 只能从食物中摄取机体本身不能合成, 可以分为水溶性维生素和脂溶性维生素两类。研究发现, 维生素 A、B、C、E 都可以有效抑制细胞的脂质氧化, 具有强的抗氧化性和自由基清除能力。

维生素 A 本质上是含有 β-白芷酮环和 2 分子 2-甲基丁二烯构成的不饱和一元醇, 周秀芬^[56]发现适量加入维生

素 A 可一定程度上改善大鼠体内维生素的储存水平,并提高机体抗氧化能力。马露^[57]在研究中发现,在奶牛饲料中添加 220 IU/kg BW 维生素 A 后,血清中超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、过氧化氢酶活性、总抗氧化能力和羟自由基抑制力的活性增强,机体的抗氧化性得到提高。维生素 E 是一种重要的抗氧化剂,大运动量运动训练后口服维生素 E,可以抑制机体氧自由基的生成,提高机体的抗氧化能力,并使大鼠血浆内皮素含量降低,血清一氧化氮含量升高,内皮素/一氧化氮比值下降,表明维生素 E 对大运动量训练大鼠的内皮细胞具有保护作用,可提高机体运动能力和抗疲劳能力^[58]。

3 食源性抗疲劳活性成分在抗疲劳食品中的应用

近些年的研究发现具有抗运动疲劳功效的食源性活性成分多种多样,涵盖生命活动所必须的各种营养素,但大多数抗疲劳产品仍处在初步探索阶段。截止到 2016 年 7 月,国家食品药品监督管理局数据查询结果显示,我国共审批注册进口保健食品 751 个、国产保健食品 15 842 个,其中缓解体力疲劳功能(含原“抗疲劳”功能)产品 2160 个,占保健食品总数的 13.63%^[59]。在市场中的抗疲劳产品可大体分为三大类:(1)以西洋参、玛咖、红景天、冬虫夏草等名贵中草药为原料的价格较高的抗疲劳保健食品,在海拔 1500 m 以上的高原地区实验研究中,服用一款红景天抗高原运动疲劳食品的实验组体育系学生在运动时间、运动距离上显著优于对照组体育系学生^[60];(2)市场中随处可见,价格低廉的运动功能饮料,比如红牛、佳得乐、健力宝等品牌,这种产品主要依靠及时补充运动中消耗的糖分及多种维生素来达到缓解疲劳的目的;(3)以生物活性肽为主要原料,再配佐其他中草药及多种氨基酸的复合抗疲劳保健食品,如市面上已开发的甘蔚乐,主要活性成分包括黄精多糖、玉米低聚肽、黑茶茶多酚、氨基酸、不饱和脂肪酸等,在研究中能够延长小鼠负重游泳时间,减少代谢产物蓄积,增加糖原储存,发挥很好的抗疲劳功效。

4 总 结

综上所述,运动疲劳是一个涉及外周组织和中枢神经的复杂生理生化过程。针对运动疲劳的产生机制,通过总结近些年的研究,形成能量物质耗竭学说、代谢产物积累学说、保护性抑制学说等主流学说,且对疲劳作用机制进行了详细阐述,许多学者开展了食源性抗疲劳活性成分的研究;多肽、蛋白质、糖类可以通过及时补充能源物质缓解疲劳;多酚类、维生素、氨基酸等通过清除自由基达到抗疲劳功效,在未来的研发中,期望能高效提取动植物中的活性成分,针对不同程度不同种类的运动疲劳,复合配比多种抗疲劳成

分,生产出绿色高效的抗运动疲劳产品。

参考文献

- [1] 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. Study on nutritional supplement of anti-sports fatigue [J]. Food Ferment Technol, 2020, 56(1): 96-99.
- [2] 姚鸿恩. 体育保健学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YAO HE. Physical health science [M]. Beijing: Higher Education Publishing, 2006.
- [3] 邓树勋, 王健, 乔德才. 运动生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
DENG SX, WANG J, QIAO DC. Exercise physiology [M]. Beijing: Higher Education Publishing, 2013.
- [4] 黄鑫. 温肝阳滋肾阴时相组合改善运动性疲劳的理论研究[D]. 北京: 中国中医科学院, 2008.
HUANG X. Theory research of warming liver yang and tonifying kidney yin phase combination to improve sports fatigue [D]. Beijing: China Academy of Chinese Medical Sciences, 2008.
- [5] 杨锡让. 实用运动生理学[M]. 北京: 北京体育大学出版社, 2002.
YANG XR. Practical exercise physiology [M]. Beijing: Beijing Sport University Press, 2002.
- [6] 陈补林. 运动性疲劳的产生机理及其恢复[J]. 科技资讯, 2017, 15(23): 207-208, 210.
CHEN BL. Mechanism of sports fatigue and its recovery [J]. Sci Technol Inf, 2017, 15(23): 207-208, 210.
- [7] HUFFMAN D, ALTENA T, MAWHINNEY T, *et al.* Effect of n-3 fatty acids on free tryptophan and exercise fatigue [J]. Eur J Appl Physiol, 2004, 92: 584-591.
- [8] 齐阳. 中链三酰甘油对力竭游泳小鼠抗疲劳的作用研究[D]. 上海: 第二军医大学, 2013.
QI Y. Research on anti-fatigue in exhausted-swimming mice by medium-chain triglycerides [D]. Shanghai: The Second Military Medical University, 2013.
- [9] VERKERKE GJ, HOF AL, ZIJLSTRA W, *et al.* Determining the center of pressure during walking and running using an instrumented treadmill [J]. J Biomech, 2005, 38(9): 1881-1885.
- [10] 司高高. 运动性疲劳对大鼠大脑皮质运动区神经元显微结构的影响及其机制探讨[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
SI GG. The sports of exercise fatigue on the microstructure of neurons on the cerebral cortex of rats and its mechanism [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2020.
- [11] BOSCA L, ARAGÀ NJ, SOLS A. Modulation of muscle phosphofructokinase at physiological concentration of enzyme [J]. J Biol Chem, 1985, 260(4): 2100-2107.
- [12] FLAKOLL PJ, JUDY T, FLINN K. Postexercise protein supplementation improves health and muscle soreness during basic military training in Marine recruits [J]. J Appl Physiol, 2004, 96(3): 951-956.
- [13] 户珊珊. 运动性疲劳的产生和消除手段[J]. 当代体育科技, 2017, 7(24): 19-20.
HU SS. Generation and elimination of sports fatigue [J]. Contemp Sports Technol, 2017, 7(24): 19-20.
- [14] SHANELY RA, COAST JR. Effect of ammonia on metro diaphragmatic

- contractility, fatigue and recovery [J]. *Respiration*, 2002, 69(6): 534–541.
- [15] 邹家艳. 羽毛球运动性疲劳的生物反馈信号特征研究[D]. 赣州: 赣南师范大学, 2018.
- ZOU JY. Characteristics of biofeedback signals in badminton exercise fatigue [D]. Ganzhou: Gannan Normal University, 2018.
- [16] 李明, 李世玉. 运动性疲劳产生的机理及其判断与恢复[J]. *体育世界(学术版)*, 2008, (10): 100–102.
- LI M, LI SY. The mechanism, judgment and recovery of sports fatigue [J]. *Sports World (Acad Ed)*, 2008, (10): 100–102.
- [17] WILKINSON DJ, SMEETON NJ, WATT PW. Ammonia metabolism, the brain and fatigue; revisiting the link [J]. *Prog Neurobiol*, 2010, 91(3): 200–219.
- [18] 杨秦. 玛咖抗疲劳的有效成分及机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- YANG Q. Study on the active components and mechanism of anti-fatigue in maca [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [19] FWENSTROM JD, FERNSTROM MH. Exercise, serum free tryptophan, and central fatigue [J]. *J Nutr*, 2006, 136(2): 553S–559S.
- [20] BANISTER E, CAMERON B. Exercise-induced hyperammonemia: peripheral and central effects [J]. *Int J Sports Med*, 1990, 11(S2): S129–S142.
- [21] DENG SX, HONG TT, CAO ZF. Exercise physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [22] 唐兴亮. 基于生物电信号的有氧运动疲劳研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- TANG XL. Aerobic exercise fatigue based on bioelectrical signals [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [23] WILSON WM, MAUGHAN RJ. Evidence for a possible role of 5-hydroxytryptamine in the genesis of fatigue in man: administration of paroxetine, a-5HT reuptake inhibitor, reduces the capacity to perform prolonged exercise [J]. *Exp Physiol*, 1992, 77(6): 921–924.
- [24] WEISLEDER N, MA J. Altered Ca^{2+} sparks in aging skeletal and cardiac muscle [J]. *Age Res Rev*, 2008, 7(3): 177–188.
- [25] SPECTOR SA, JACKMAN MR, SABOUNJIAN LA, *et al.* Effect of choline supplementation on fatigue in trained cyclists [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1995, 27(5): 668–673.
- [26] 黄雨三. 保健食品检验与评价技术规范实施手册[M]. 北京: 清华同方电子出版社, 2003.
- HUANG YS. Manual for implementation of technical specifications for inspection and evaluation of health food [M]. Beijing: Tsinghua Tongfang Electronic Publishing House, 2003.
- [27] 杨闯. 生物活性肽在营养保健中的应用[J]. *食品科学*, 2003, 24(11): 153–154.
- YANG C. Application of bioactive peptides in nutrition and health care [J]. *Food Sci*, 2003, 24(11): 153–154.
- [28] 倪明龙, 黄海潮. 海参肽的生物活性及其应用研究进展[J]. *轻工科技*, 2020, 36(8): 16–17, 20.
- NI ML, HUANG HC. Research progress on bioactivity and application of sea cucumber peptides [J]. *Light Ind Sci and Technol*, 2020, 36(8): 16–17, 20.
- [29] 王敏, 李丽杰, 张曾亮, 等. 海参肽复合物缓解小鼠的体力疲劳[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(2): 32–37.
- WANG M, LI LJ, ZHANG ZL, *et al.* Sea cucumber peptide complex alleviates physical fatigue in mice [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2020, 36(2): 32–37.
- [30] 肖岚, 李诚, 杜昕, 等. 牦牛血低聚肽对小鼠抗疲劳能力和缺氧 H9c2 细胞的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(4): 831–838.
- XIAO L, LI C, DU X, *et al.* Effects of yak blood oligopeptides on anti-fatigue ability and hypoxic H9c2 cells in mice [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2020, 34(4): 831–838.
- [31] 钱平, 邵剑钢, 刘晋, 等. 小麦低聚肽抗疲劳活性研究[J]. *中国食物与营养*, 2019, 25(12): 64–68.
- QIAN P, SHAO JG, LIU J, *et al.* Study on antifatigue activity of wheat oligopeptides [J]. *Chin Food Nutr*, 2019, 25(12): 64–68.
- [32] 郑景如, 孙馨婷, 蔡紫仪, 等. 优选南极磷虾蛋白肽抗氧化活性组分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(1): 189–195.
- ZHENG JR, SUN XP, CAI ZY, *et al.* Optimization of antioxidant components of Antarctic krill protein peptides [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(1): 189–195.
- [33] 夏春荣, 王晓杰, 姜宇航, 等. D-氨基半乳糖糖基化修饰玉米肽抗疲劳效应的研究[J/OL]. *中国粮油学报*: 1–6[2021-03-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210226.1641.036.html>.
- XIA CR, WANG XJ, JIANG YH, *et al.* Study on anti fatigue effect of D-galactosamine glycosylated corn peptide [J/OL]. *J Chin Cereals Oils Assoc*: 1–6 [2021-03-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210226.1641.036.html>.
- [34] 董陈颖, 李雪丽, 安婉丽, 等. 深海三文鱼蛋白(肽)抗疲劳作用的实验研究[J]. *首都食品与医药*, 2019, 26(18): 50–52.
- DONG CY, LI XL, AN WL, *et al.* Experimental study on antifatigue effect of deep-sea salmon protein [J]. *Cap Food Med*, 2019, 26(18): 50–52.
- [35] 王琦. 鹿茸多肽提取工艺的优化及抗氧化、促愈合功效的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- WANG Q. Optimization of extraction process of velvet antler polypeptides and study on the effects of anti-oxidation and promoting healing [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.
- [36] 李福荣, 赵爽, 张秋, 等. 食源性生物活性肽的功能及其在食品中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(20): 210–217.
- LI FR, ZHAO S, ZHANG Q, *et al.* Function of food derived bioactive peptide and its application in food [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(20): 210–217.
- [37] WANG J, LI S, FAN Y, *et al.* Anti-fatigue activity of the water-soluble polysaccharides isolated from *Panax ginseng* C.A. Meyer [J]. *J Ethnopharmacol*, 2010, 130(2): 421–423.
- [38] 牛佳牧, 刘嘉玮, 林慧娇, 等. 五味子酸性多糖对小鼠抗疲劳作用的实验研究[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2020, 21(6): 730–733.
- NIU JM, LIU JW, LIN HJ, *et al.* Experimental study on anti-fatigue effect of schisandra chinensis acid polysaccharide on mice [J]. *J Beihua Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 21(6): 730–733.
- [39] 顿仕杰. 雷蘑胞外粗多糖在运动中抗疲劳促恢复作用研究[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(9): 50–53.
- DUN SJ. Study on anti-fatigue and promoting recovery effect of extracellular crude polysaccharide from *Tricholoma hepatica* in exercise [J]. *Chin Edible Fungus*, 2020, 39(9): 50–53.
- [40] 谢飞飞. 远志多糖对力竭运动小鼠体内抗疲劳和体外抗氧化作用研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(6): 332–336.
- XIE FF. Study on anti-fatigue and *in vitro* antioxidant effects of polygalaxium polysaccharide on exhaustive exercise mice [J]. *Food Ind*

- Sci Technol, 2021, 42(6): 332–336.
- [41] 覃筱燕, 唐丽, 杨林, 等. 枸杞提取物对小鼠抗疲劳作用的实验研究[J]. 中医药学报, 2009, 37(2): 8–10, 83.
- TAN XY, TANG L, YANG L, *et al.* Experimental study on antifatigue effect of *Lycium barbarum* extract on mice [J]. J Tradit Chin Med, 2009, 37(2): 8–10, 83.
- [42] HAO H. Effect effects of Auricularia auricula polysaccharides on exhaustive swimming exercise-induced oxidative stress in mice [J]. Trop J Pharm Res, 2014, 13(11): 1845–1851.
- [43] 肖庆群. 石斛多糖山楂复合饮料制备及缓解运动性疲劳的作用[J/OL]. 食品工业科技: 1–15. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.0248>.
- XIAO QQ. Preparation of Dendrobium polysaccharide and Hawthorn compound beverage and its effect on relieving exercise fatigue [J/OL]. Food Ind Sci Technol: 1–15. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.0248>.
- [44] 陈津津, 冯嘉诚. 杏鲍菇多糖的抗疲劳活性研究[J]. 中国食用菌, 2020, 39(4): 46–48.
- CHEN JJ, FENG JC. Study on the antifatigue activity of *Pleurotus eryngii* polysaccharide [J]. Chin Edible Fungus, 2020, 39(4): 46–48.
- [45] 杨涛. 金针菇氨基酸抗运动性疲劳研究[J]. 中国食用菌, 2020, 39(7): 41–44.
- YANG T. Study on the anti-motor fatigue of *Flammulina velutipes* amino acids [J]. Chin Edible Fungus, 2020, 39(7): 41–44.
- [46] 宋志明, 张凌. 羊肚菌氨基酸对运动后中枢疲劳的恢复作用[J]. 中国食用菌, 2020, 39(9): 76–78, 99.
- SONG ZM, ZHANG L. The recovery effect of amino acids of *Morchella esculenta* on central fatigue after exercise [J]. Chin Edible Fungus, 2020, 39(9): 76–78, 99.
- [47] 刘诚. 姬松茸支链氨基酸的抗运动疲劳作用[J]. 中国食用菌, 2020, 39(2): 61–63.
- LIU C. Antifatigue and exercise effects of branched chain amino acids in *Agaricus blazei* [J]. Chin Edible Fungus, 2020, 39(2): 61–63.
- [48] 姜书慧. 东北野生榛蘑氨基酸对运动性疲劳的影响[J]. 中国食用菌, 2020, 39(2): 76–77, 80.
- JIANG SH. Effect of amino acids of wild *Armillaria mellea* in northeast China on sports fatigue [J]. Chin Edible Fungus, 2020, 39(2): 76–77, 80.
- [49] MEYER RA, DUDLEY GA, TERJUNG RL. Ammonia and IMP in different skeletal muscle fibers after exercise in rats [J]. J Appl Physiol, 1980, 49(6): 1037–1041.
- [50] 刘涛, 吉喆. 草菇子实体支链氨基酸对运动能量代谢的影响[J]. 中国食用菌, 2020, 39(10): 73–76.
- LIU T, JI Z. Effects of branched chain amino acids of *Volvariella volvacea* fruitbody on energy metabolism during exercise [J]. Chin Edible Fungus, 2020, 39(10): 73–76.
- [51] 廖玲燕, 帅良, 罗焘, 等. 槟榔芋多糖提取工艺及其抗氧化活性的研究[J]. 食品科技, 2018, 43(7): 181–188.
- LIAO LY, SHUAI L, LUO T, *et al.* Study on extraction technology and antioxidant activity of polysaccharides from *Areca catechu* [J]. Food Sci Technol, 2018, 43(7): 181–188.
- [52] 陈蓉, 吴启南. 芡实种皮多酚抗疲劳耐缺氧作用研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 100–103, 108.
- CHEN R, WU QN. Effect of semen euryales seed coat polyphenols on anti-fatigue and hypoxia tolerance [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(24): 100–103, 108.
- [53] 杜云. 茶多酚对运动大鼠抗疲劳作用的实验研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 783–786.
- DU Y. The experimental study about anti-fatigue effect of the tea polyphenol on the movement of rats [J]. J Northwest Univ (Nat Sci Ed), 2012, 42(5): 783–786.
- [54] 刘琦. 大孔树脂对短梗五加多酚的纯化效果及多酚的抗疲劳作用研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 171–177.
- LIU Q. Study on the purification of polyphenols extract from *Acanthopanax sessiliflorus* by macroporous resin and its anti-fatigue effect [J]. Stor Process, 2020, 20(4): 171–177.
- [55] 陈慧, 马璇, 曹丽行, 等. 运动疲劳机制及食源性抗疲劳活性成分研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 247–258.
- CHEN H, MA X, CAO LX, *et al.* Recent progress in the mechanism behind exercise-induced fatigue and dietary bioactive components against fatigue [J]. Food Sci, 2020, 41(11): 247–258.
- [56] 周秀芬. 补充钙和维生素D对COPD患者钙磷代谢及肌力与运动耐量短期影响的初步观察[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- ZHOU XF. Preliminary observation of short-term effects of calcium and vitamin D supplementation on calcium and phosphorus metabolism, muscle strength and exercise tolerance in COPD patients [D]. Suzhou: Suzhou University, 2020.
- [57] 马露. 维生素A、E对奶牛产奶性能, 免疫功能及瘤胃发酵的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- MA L. Effect of vitamin A and vitamin E on milk performance, immune function and ruminal fermentation of dairy cows [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [58] 盛晓蕾, 陈祥翠, 黎红维, 等. 维生素C和维生素E与蛹虫草联用对大鼠免疫调节的影响[J]. 安徽农学通报, 2017, 25(14): 48–50.
- SHENG XL, CHEN XC, LI HW, *et al.* The effect of vitamin C and vitamin E combined with *Cordyceps militaris* on the immune regulation of rats [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2017, 25(14): 48–50.
- [59] 张颖, 廖森泰, 王思远, 等. 动物源性抗疲劳肽研究与功能食品开发进展[J]. 农产品加工, 2017, (13): 67–71.
- ZHANG Y, LIAO ST, WANG SY, *et al.* A review of the anti-fatigue peptides derived from animal protein and its functional food [J]. Farm Prod Proc, 2017, (13): 67–71.
- [60] 尤伟. 红景天运动食品研发及其抗高原运动疲劳研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 168–171.
- YOU W. Research on development of *Rhodiola* sport food and the effect of antifatigue of plateau sport [J]. Food Res Dev, 2017, 38(7): 168–171.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介

赵 静, 硕士, 主要研究方向为体育教育训练。

E-mail: 186547@163.com