

抗运动疲劳食源性 活性成分的研究进展

李国锋

(武威职业学院,甘肃武威 733000)

摘要:本文对近些年来研究发现的抗运动疲劳的食源性活性成分及其在抗运动疲劳产品开发中的运用情况进行了综述,以期以能量代谢和抗氧化的共同调控靶点为基础,进一步对抗运动疲劳食源活性成分精选及研发天然食源性活性成分的特色抗运动疲劳食品提供理论依据。

关键词:抗运动疲劳,食源性,活性成分,研究

Research and Development of Active Ingredients from Food Sources for Anti-motion Fatigue

LI Guo-feng

(Wuwei Vocational College, Wuwei 733000, China)

Abstract: This paper studies active ingredients of food-borne found in recent years and their application in the development of the products for anti-motion fatigue, with a view to providing theoretical basis for the further selection of active ingredients from food sources for anti-motion fatigue and the research and development of active ingredients from natural food for anti-motion fatigue based on the common regulatory targets of energy metabolism and anti-oxidation.

Key words: anti-motion fatigue; food source; active ingredients; research

中图分类号: TS202.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)24-0344-10

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020030244

引文格式: 李国锋. 抗运动疲劳食源性活性成分的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 344-353.

LI Guo-feng. Research and Development of Active Ingredients from Food Sources for Anti-motion Fatigue [J].

Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 344-353. (in Chinese with English abstract) [http://](http://www.spgykj.com)

www.spgykj.com

人类可食的动植物中含有多种生物活性成分,如茶叶中的茶多酚、玉米中的玉米肽、黑木耳中的黑木耳多糖、牛肉中的牛磺酸等。从可食的动植物食物中寻找抗运动疲劳活性物质是当前抗运动疲劳产品研究热点。国内外许多学者对食物中活性成分抗运动疲劳进行了许多动物实验研究,如 Yu^[1] 等对大豆多肽、Siluaj 等^[2] 对精氨酸、李晶等^[3] 对姬松茸多糖、肖凤艳等^[4] 对五加果多酚、Wool 等^[5] 对维生素 B、王茵等^[6] 对虾青素的抗运动疲劳效果,采用小鼠负重实验进行了研究。运动疲劳的产生往往伴随着能量物质、代谢产物、细胞代谢调节酶、抗氧化系统酶类的变化,造成机体内环境平衡失去稳态引起了机体的不适感^[7]。目前,运动疲劳产生的机制主要包括能量耗竭、代谢产物蓄积和氧化应激^[8-10],并且它们之间有共同的信号调控途径激活腺苷酸活化蛋白激酶(AMP-activated protein kinase, AMPK)^[11]。研究发

现食源性食物中一些天然活性成分活性肽、氨基酸、多糖、寡糖、多酚、维生素、胡萝卜素等都具有抗运动疲劳的作用,这为研发新型抗运动疲劳功能产品遴选绿色、有效、安全的食源性活性成分奠定了良好的基础。

1 抗运动疲劳的食源性活性成分研究

1.1 食源性生物活性肽

肽具有吸收快、吸收全面、不耗能及起载体的作用等特点^[12]。食源性生物活性肽主要是动植物蛋白酶解、分离、纯化而来。近些年来,许多研究者尝试用不同的动植物食用原料,研究具有抗运动疲劳的生物肽活性。水产物、昆虫和哺乳动物等是动物食源性抗运动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运动性生物活性肽的主要来源。研究发现了草鱼蛋白活性肽、泥鳅四肽、十肽 CMS001、复合酶水解肽、海参肽、二肽(GL、LG)、低

收稿日期:2020-03-19

作者简介:李国锋(1974-),男,硕士,教授,研究方向:运动营养,E-mail:gtzcxh@126.com。

基金项目:甘肃省高等学校科研项目(2017A-275)。

聚肽、咪唑二肽、大鲵低聚糖肽、蚕蛹蛋白多肽等食源性动物生物活性肽;大豆多肽、玉米肽、花生肽、米渣肽、小米多肽、谷氨酰胺活性肽等食源性植物生物活性肽,都具有抗运动疲劳的作用(见表1)。王洪涛等^[13]的研究表明,连续30 d给小鼠灌胃复合酶水解肽溶液后进行负重游泳实验,高剂量组9.0 mL/kg/d小鼠的肝糖原含量显著增加、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活力显著增强、血清尿素氮(Blood urea nitrogen, BUN)含量显著降低、血乳酸(Blood lactic acid, BLA)含量显著降低,负重游泳时间显著延长和低压耐缺氧能力显著增强。Yu等^[1]的研究表明,连续给小鼠灌胃大豆多肽20 d后进行负重游泳实验,测试发现小鼠游泳耐力时间最大延长达到了70%,显著的增加了糖原含量和降低了BLA。李茂辉等^[25]的研究证实,小鼠连续灌胃大豆多肽25 d后进行负重游泳,小鼠的BLA显著降低和负重游泳时间显著延长,大鼠灌胃高剂量大豆多肽(6.0 g/kg/d)60 d后红细胞中SOD和谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GSH-Px)的活性增

强和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量降低。

目前,食源生物活性肽抗运动疲劳的研究,主要是针对小鼠机体生理方面运动性疲劳缓解、提高及功能评价方面进行研究,对于生物活性肽抗运动疲劳结合人体实际及量效与构效关系的研究比较少,对于生物活性肽抗运动疲劳在心理或精神方面的作用研究尚未涉猎。研究表明食源生物活性肽能够抗运动疲劳,是由于食源生物活性肽可以机使体内的糖原增加、SOD活性增强、BLA堆积减少、BUN氮含量降低及促进组织损伤恢复,食源生物活性肽抗运动疲劳潜在的分子机理尚未进行深入的研究,这都是生物活性肽抗运动疲劳功效方面需要进一步深入探究的方面。

1.2 食源性氨基酸

人体内的氨基酸在人体运动时能够提供能量。因此,在运动时及时、科学、适量的给人体补充氨基酸,对于缓解运动疲劳有重要的作用。学者研究发现支链氨基酸、缬氨酸、牛磺酸、精氨酸、谷氨酰胺等,都具有一定的抗运动疲劳的作用。林静^[34]的实验表

表1 食源性生物活性肽抗运动疲劳研究

Table 1 Study of anti-motion fatigue for food borne bioactive peptide

活性成分	研究对象	评价模型	机理	作用	文献
海参肽	小鼠	负重游泳	降低BUN、增加肝糖原含量	增强运动耐力	[13]
十肽MS001	小鼠	负重游泳	抗自由基、减少BLA堆积、调节糖代谢	减少肌肉损伤增强运动耐力	[14]
咪唑二肽	健康男性		抗氧化	增强高强度间歇运动能力	[15]
草鱼蛋白活性肽	小鼠	负重游泳	抗氧化、减少代谢物蓄积、增加糖原含量	增强运动耐力	[16]
泥鳅四肽	小鼠	负重游泳	增强内源性抗氧化酶活性、减少BLA堆积、调节糖代谢	增强运动耐力	[17]
复合酶水解肽	小鼠	负重游泳	降低BUN及BLA、增加肝糖原含量、增强SOD活力	增强耐缺氧能力	[18]
大鲵低聚糖肽	小鼠	负重游泳	降低血BLA、增加肝糖原含量	增强运动耐力	[15]
二肽(GL, LG)	小鼠	负重游泳	抗自由基、调节炎症反应	增强运动耐力	[20]
低聚肽	小鼠	负重游泳	降低BLA和尿素氮含量、提高肝糖原含量及增强SOD、CAT及GSH-Px活性	增强运动耐力	[21]
蚕蛹蛋白多肽	小鼠	负重游泳 爬杆实验	降低BUN及血BLA、增加糖原含量	增强运动耐力	[22]
	举重运动员		增强CK的活性	提高肌肉工作效率	[23]
大豆多肽	小鼠	负重游泳	抗自由基、减少BLA、调节糖代谢、促进损伤组织修复	增强运动耐力	[1,24]
	小鼠	负重游泳	增强SOD和GSH-Px活性、降低MDA含量	增强运动耐力	[25]
玉米肽	小鼠	负重游泳 爬杆模型	抗自由基、减少BLA堆积、调节糖代谢	增强运动耐力和负荷适应能力	[26-29]
花生肽	小鼠	负重游泳	提高糖原含量、降低BLA和BUN含量	提高运动能力	[30]
米渣肽	小鼠	负重游泳	降低BLA、提高血糖	增强运动耐力	[31]
小米多肽	小鼠	负重游泳	增加肝糖原、降低BUN	增强运动耐力	[32]
谷氨酰胺活性肽	小鼠	负重游泳	提高肝组织SOD活性、减少MDA	增强耐缺氧能力	[33]

注:CK(肌酸激酶)、GSH-Px(谷胱甘肽过氧化物酶)、CAT(过氧化氢酶)。

明,给小鼠连续 10 d 补充 0.5 mL/d 的支链氨基酸,升高脑 5-羟色胺(5-hydroxytryptamine, 5-HT),可使小鼠定量负荷运动后的活动量增强和运动时力竭时间明显延长。金宏等^[35]的实验研究发现,给大鼠连续 10 d 补充 5% 的支链氨基酸并每天游泳 1 h, 10 d 后游泳 6 h, 大鼠存活率明显的提高,骨骼肌乳酸脱氢酶(Lactate dehydrogenase, LD)活力、线粒体脂质过氧化物(Lipid peroxide, LPO)水平、BLA 浓度升高的幅度被抑制,骨骼肌线粒体功能得到改善。欧阳儒颖^[36]的实验研究证实,运动时为小鼠补充支链氨基酸可以缓解精神疲劳。Tsuda 等^[37]的研究表明,大鼠在进行游泳前 30 min 补充食用缬氨酸,运动 1 h 后自发性活动增加,刘建红等^[38]的研究表明,划船运动员在冬训期间连续 28 d 补充支链氨基酸,血睾酮水平处在一个较高的水平。相关研究发现牛磺酸能够促进脂肪酸氧化、增强糖原储存、调节胞内 Ca^{2+} 浓度而促进肌肉损伤恢复,加快疲劳恢复^[39-41]。黄广良等^[42]通过给训练中的游泳运动员连续 30 d 补充含 0.5% 牛磺酸的复合功能饮料,能够避免游泳运动员运动过度疲劳的发生。杨晓等^[43]通过给小鼠连续灌胃 30 d 牛磺酸和大豆肽的复合粉,能够缓解小鼠运动疲劳且优于大豆肽。瞿东杨等^[44]进行的小鼠实验表明,连续给小鼠补充 30 d 牛磺酸和咖啡因的复合功能饮料,抗运动疲劳效果要比单独补充好。Siluaj 等^[2]的研究表明小鼠补充精氨酸后,由于抗氧化酶活力增强和抑制自由基产生,提高了小鼠的运动能力。卢向阳等^[45]的实验研究证实,给大鼠单独补充谷氨酰胺及协同补充谷氨酰胺和番茄红素 8 周,并每天进行 4 h 的训练,单独补充谷氨酰胺提高大鼠力竭性游泳的运动能力与番茄红素相当,谷氨酰胺和番茄红素协同联合补充提高大鼠力竭性游泳运动能力的效果要优于单独补充。

近年来,对于氨基酸抗运动疲劳功效方面的研究已为学术研究的热点,其中结合动物实验进行生理研究的较多而结合人体实际运动项目的研究较少,对于动物精神的研究已涉猎而动物心理及人精神和心理的研究未涉及,一种氨基酸和另一种食源性成分搭配抗运动疲劳功效的研究也有报道,而氨基酸不同补充方法效果的研究较少,对于补充氨基酸延缓中枢神经系统的疲劳已初步进行了研究,人在运动时摄入氨基酸的副作用以及不同运动项目、强度运动员补充剂量、时间尚未研究,这都有待研究者做更多的探索。

1.3 食源性多糖和寡糖

食源性多糖在一些植物和微生物的细胞壁中。研究发现食源性果实类如枸杞子、藏药黑果枸杞、火棘、化橘红、木枣、山楂、鹰嘴豆、五味子、蛇菰、榛仁、松茸、桑葚、板栗、山刺玫果、刺梨、苦瓜、无梗五加果、蓝莓、猕猴桃、芡实、藜麦、龙眼、荔枝中的多糖,食源性根茎叶类如黄精、黄芪、淫羊藿、百合、巴戟天、人参、竹节参、玄参、红景天、魔芋、肉苁蓉、黑大蒜、霍山石斛、何首乌、芫菁、锁阳、瓦松、竹叶、卷柏、芦荟、蒲公英、杜仲、生姜、菊苣、桔梗、牛大力、富硒

茶、党参、铁棍山药、魔芋、莲藕、紫心甘薯、败酱草、普洱茶、苦菜中的多糖,食源性真菌类如冬虫夏草、猴头菇、黄伞菇、金针菇、香菇、木耳、红托竹荪、羊肝菌、杏鲍菇、黑灵芝白灵菇、桦褐孔菌中的多糖,食源性海洋动植物类如海带、蜈蚣藻、羊栖菜、螺旋藻、海藻、方格星虫中的多糖,都能够显著的提高大鼠或小鼠运动前后体内糖原储备、LD 活力和降低 BUN、BLD 含量,加速大鼠或小鼠体运动后机体内产生的自由基,延缓机体运动疲劳的产生和促进机体运动疲劳的恢复,在抗运动疲劳方面有比较好的效果。如姚乐辉^[46]进行的小鼠负重游泳实验证实,连续给小鼠灌胃 35 d 不同剂量(中 100 mg/kg、高 200 mg/kg)的化橘红多糖,能够显著的使小鼠糖原增加和 BUN、BLD 降低,SOD、LD 活性增强。李晶等^[3]的研究表明,持续给小鼠灌胃 100、150、200 mg/kg 的姬松茸多糖,能够显著的增强小鼠 SOD 活性和降低 MDA 含量,增加小鼠血清中的白介素-6 的含量。对于多糖的研究都以动物为实验研究对象,采用单一的游泳负重评价模型,重复的把糖原、BLA、BUN、MDA、SOD 作为抗运动疲劳效果评价的指标。对于多抗抗运动疲劳的研究,应深入的对多类研究对象(特别是人)、多指标评价、多种动物模型及构效、量效关系进行分析。

研究者发现寡糖也具有抗运动疲劳的功效,但是对于寡糖抗运动疲劳功效的研究比较少,主要对甲壳寡糖、壳寡糖和 β -葡聚糖索拉胶进行了研究。陈筱春等^[47]给 4 周龄的小鼠连续灌胃甲壳寡糖(0.3 g/kg/d)四周,并进行负重游泳训练(每周 6 d,第一周每天训练 30 min,第二周每天训练 1 h,第三周每天训练 1.5 h,第四周每天训练 2 h),第四周的周末最后一次训练进行力竭性游泳训练后并测试,血糖、肝糖原、肌糖原显著增加,游泳力竭时间显著延长。尹雨芳等^[48]进行的实验研究表明,给七周年龄大鼠持续 42 d 灌胃不同剂量(低 100 g/kg/d、中 200 g/kg/d、高 600 g/kg/d)的壳寡糖,并负重游泳训练(每周 6 d,第一周不给负重,第二周负重 2% 的体重,第三周负重 4% 的体重,第四、五、六周负重 5% 的体重并每次训练到力竭,极显著性($P < 0.01$)延长大鼠游泳力竭时间,大鼠的 SOD 活性和白细胞介素-10 的含量显著升高($P < 0.05$),MDA 和白介素-6 含量显著下降,高剂量组尤为明显。Xu 等^[49]给小鼠连续 4 周灌胃不同剂量的 β -葡聚糖索拉胶并进行游泳模型试验,发现每天剂量为 50 和 100 mg/kg 的 β -葡聚糖索拉胶,相比对照组力竭时间分别延长了 63.4% 和 89.2%,肝脏和肌肉中核转录因子(Nuclear factor-erythroid 2 p45-related factor 2, Nrf2)的表达水平以及 Nrf2 下游信号分子血红素加氧酶 1(Heme oxygenase 1, HO-1)及硫氧还蛋白(Thioredoxin, Trx)的转录表达水平增强, β -葡聚糖索拉胶通过调控 Nrf2/HO-1/Trx 信号通路,缓解由运动产生的氧化应激对机体造成的疲劳感。Nrf2 是机体内一种重要的应对氧化损伤的转录因子,影响机体内线粒体脂肪酸氧化速率。但目前,多糖和寡糖是怎样通过 Nrf2 调节线粒体氧化脂肪酸而抗运动疲劳潜在的分子机制尚不清楚,多糖和寡糖都有增强机体免疫调节的功能,机体免

表2 食源性多酚化合物在体外抗氧化的研究
Table 2 antioxidant study of foodborne polyphenol compounds *in vitro*

活性成分	机理	作用	文献
腰果叶多酚	DPPH·、ABTS ⁺ ·清除能力增强	抗氧化性高于V _C	[52]
红豆皮多酚	DPPH·、·O ₂ ⁻ 清除能力增强	抗氧化性稍弱于V _C	[53]
洋葱多酚	清除DPPH·、·O ₂ ⁻ 、-OH	较强的抗氧化性	[54-57]
海藻多酚	清除DPPH·、·O ₂ ⁻ 、-OH、抑制铁离子诱导脂质体的氧化	较强的抗氧化性	[58-63]
苹果多酚	清除·O ₂ ⁻ 、-OH	较强的抗氧化性	[64-66]
蔓越莓花青素多酚	清除·O ₂ ⁻	较强的抗氧化性	[67-70]
石榴籽多酚	清除DPPH·、ABTS ⁺ ·、·O ₂ ⁻ 、-OH	较强的抗氧化性	[71]
柑橘多酚	清除DPPH·、ABTS ⁺ ·	较强的抗氧化性	[72]

注: DPPH·(二苯基-2-三硝基苯肼自由基)、ABTS⁺·(二铵盐阳离子自由基)、·O₂⁻(超氧阴离子自由基)、-OH(羟基自由基)。

疫力的增强是否对减轻或缓解运动疲劳有效果, 这都值得进一步的探讨。

1.4 食源性多酚类

多酚是在植物性食物如深色蔬菜、水果等中的天然化合物。多酚化合物能够清除或减少机体内的自由基, 具有强的抗氧化性, 有较好的抗运动疲劳的效果。对于多酚抗运动疲劳的研究主要在体外抗氧化性方面, 能量的耗竭、代谢产物蓄积研究已涉猎到, 但尚在起步阶段, 具有很大的研究空间。肖凤艳等^[4]连续15 d给小鼠灌胃不同剂量(低100 mg/kg/d、高200 mg/kg/d)的短梗五加果多酚, 第15 d灌胃短梗五加果多酚后30 min, 挑选10只小鼠进行负重5%体重的重量物进行游泳力竭实验, 挑选10只小鼠进行负重2%体重的重量物进行1 h游泳, 研究表明低、高剂量组小鼠游泳力竭时间分别比对照组延长14.35、17.38 min, 肌糖原分别提高28.82%、35.08% ($P < 0.01$), BLA分别降低10.96%、17.44%, 肌酸激酶(Creatine kinase, CK)分别降低到26.43、26.57 ng/mL, GSH-Px活力分别增加到114.67、109.62 U/mL, 具有显著性的差异。陈蓉等^[50]的研究证实芡实种皮多酚具有抗运动疲劳的作用, 杜云^[51]的研究也证实茶多酚具有抗运动疲劳的作用。一些学者对多酚化合物在体外抗氧化性进行了研究, 发现腰果叶、红豆皮、洋葱、海藻、苹果、蔓越莓、石榴籽、柑橘多酚等天然植物中提取的多酚类化合物, 可以增强机体内自由基清除能力, 具有较强的体外抗氧化活性(见表2)。应深入对多酚化合物在体内抗氧化性的作用机理, 与其他食源性活性物质混合抗运动疲劳的效果进行分析, 提高食源性多酚类化合物的利用率, 促进食源性多酚类化合物的进一步开发应用。

1.5 食源性维生素类

维生素是人体不能合成而依靠外源补充的必须营养素。研究认为维生素A、维生素B、维生素E和维生素C都有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是通过调控机体硒蛋白TrxR的基因表达及信号通路MAPK调节花生四烯酸(Arochidonic acid oil, ARA)释放, 通过调控硒蛋白TrxR的基因表达调节NO的合成以发挥其抗氧化功能^[73]。适量补充维生素A有利于机体运动疲劳恢复, 韩磊等^[74]连续8周给大鼠补充不同剂量(低11.43 μgRE/kg/d、中42.86 μgRE/kg/d、高

142.86 μgRE/kg/d)的维生素A, 结果表明高剂量维生素A增加大鼠DNA的损伤, 中剂量维生素A能够使大鼠的烷化损伤和DNA抗氧化能力增强。维生素B的缺乏可使人体运动能力下降^[75], Wool等^[5]的研究表明, 维生素B族能够明显的延长小鼠的游泳时间、增加肝糖原含量和降低BLA含量。研究发现给45岁以上健康人持续12周补充6 mg/d或25 mg/d的维生素B₂能够改善血浆尿酸吡哆醛水平和红细胞内GSH-Px的活性^[73], Smith等^[76]的研究表明维生素B₂对于提高运动耐久力有较好的效果。有研究发现限制维生素B₆摄入, 机体红细胞内的谷胱甘肽合成速度受到影响到影响^[77], 谷胱甘肽下降会引起AMPK活性降低^[78]。顾洪雁等^[79]的动物实验证实, 连续15 d给小鼠补充8 mg/d的维生素C, 小鼠机体的SOD活性增强、MDA含量降低及脂质过氧化产生的自由基减少。金其贯等^[80]实验研究发现, 连续8周给大鼠灌胃50 mg的维生素E并进行游泳训练, 大鼠的血浆内皮素下降和一氧化氮升高。Tauler和余斌等^[81-82]研究表明, 复合维生素能够显著提高运动员机体的抗氧化性及抑制运动中产生氧自由基。有研究发现高剂量外源性抗氧化剂由于干扰机体自由基介导的信号, 不利于运动能力提高^[83-87]。当机体的维生素不足和过量时, 都会引起运动能力下降, 如何根据运动量和强度补充适量维生素, 维生素如何复合以及如何与其他有机成分复合联合提高机体运动能力的机制, 都需进行更多的探索研究。

1.6 食源性类胡萝卜素

研究发现虾青素、番茄红素、β-胡萝卜素、叶黄素等胡萝卜素, 是天然绿色的抗氧化物, 是抗运动疲劳极有潜力的食源性活性物质。一些抗氧化剂具有缓解运动疲劳的效果^[88-89], 最重要的一个因素是由于运动时氧自由基的增加^[90-91]。类胡萝卜素共轭双键的结构特点决定其具有较好清除机体自由基能力^[92], 可以清除机体自由基、猝灭单线态氧和防止低密度脂蛋白氧化^[93]。类胡萝卜素容易发生自由基反应是由于自由基加成反应, 番茄红素和自由基反应中活性力和抗氧化能力强于β-胡萝卜素^[94]。王茵等^[6]进行的小鼠负重游泳研究实验证实, 连续给小鼠灌胃不同剂量(低50 mg/kg、中50 mg/kg、高250 mg/kg)的虾青素蔗糖酯水溶液, 高剂量组游泳力竭时间明显延长, 血糖浓度、肝糖原、肌糖原及总抗氧化能力

(Total antioxidant capacity, T-AOC)、SOD、DSH-Px 等活性指标均提高, BUN、BLA、MDA、NO 的浓度都降低。刘钰华等^[95]进行的研究表明圣女果番茄红素具有强的抗氧化活性。刘国安等^[96]的研究表明番茄红素具有较强的抗氧化活性且要比槲皮素强。刘秀萍等^[97]对在校 70 名大学生的实验研究证实, 番茄红素能够明显使人体高强度耐力后血液中的 SOD 和 T-ACO 升高而 MDA 降低, 对于人体运动后的抗氧化能力增强有比较好的效果。吴丽君等^[98]的研究表明, 给定量运动负荷的体院学生连续 14 d 每天服用 25 mg 的番茄红素胶囊, 可使急性大强度运动后大学生血液内的 MDA 增高幅度减小, 抗氧化酶减少, 苏卿等^[99]的实验研究表明叶黄素可清除二苯基-2-三硝基苯肼自由基 (DPPH·)、二铵盐阳离子自由基 (ABTS⁺·) 自由基及猝灭单线态氧。对于类胡萝卜素活性成分抗运动疲劳的研究, 主要是采用体外抗氧化法进行类胡萝卜素抗氧化活性研究, 但没有从微观上对类胡萝卜素的抗氧化具体过程进行分析。未来将从微观上对类胡萝卜素的抗氧化具体过程进行研究, 深入分析类胡萝卜素自由基清除能力的构效关系。

1.7 食源性生物碱

研究发现咖啡因、胡椒碱、辣椒素及黄秋葵种子、桑叶的生物碱类化合物有一定的抗运动疲劳作用。许多学者进行的研究表明食源性咖啡因对抗运动疲劳有一定的作用, 咖啡因通过调控中枢神经系统延缓运动疲劳产生^[100]。Davis 等^[101]研究表明给大鼠补充咖啡因可使大鼠的跑台运动时间增加 60%。李淑翠等^[102]连续 7 d 给小鼠灌胃不同剂量 (低 5 mg/kg、中 10 mg/kg、高 15 mg/kg) 的咖啡因, 第 7 d 灌胃后 1 h 负重 5% 体重的重量进行游泳负重力竭实验, 第 8 d 灌胃 1 h 负重 3% 体重的重量进行游泳负重实验, 不同咖啡因剂量组小鼠力竭时间明显延长、肝糖原非常明显提高, 中、高咖啡因剂量组小鼠的 BUN、MDA 含量明显降低而 SOD 明显增强。Ganio 和 Davis 等^[103-104]的研究发现咖啡因和碳水化合物共同使用提高运动能力的效果要好与单独使用, 刘军等^[105]的研究表明运动时中低剂量咖啡因安全有效的, 咖啡因中的腺苷 A1 和 A2 受体的非特异性拮抗剂, 通过中枢腺苷受体影响多巴胺信号通路对基底神经节皮层通路和中脑腹侧被盖部伏隔核通路, 促进运动冲动的发放和运动动机的产生, 在外周通过加强交感神经活性、增强脂肪酸氧化、减轻肌肉疼痛感觉。穆丽华等^[106]给小鼠连续 7 d 每天灌胃胡椒碱及其衍生物 (胡椒酸甲酯、四氢胡椒碱) 水溶液 20 mg/kg bw, 最后一次灌胃 1 h 后进行负重力竭游泳实验, 力竭时间比未灌胡椒碱及其衍生物水溶液组延长了 70% 以上, 明显降低了 BLA、BUN 和 CK。刘少华^[107]的小鼠实验证实辣椒素具有很强的抗氧化性。徐明等^[108]连续给小鼠灌胃黄秋葵种子生物碱提取物 30 d, 小鼠负重游泳时间延长, BLA、BUN 含量降低, 肝糖原含量明显提高, 高剂量尤为明显。杨忠敏等^[109]的实验研究表明桑叶生物碱非常明显的提高

氧化自由基吸收能力和铁还原能力及 DPPH 自由基清除能力。食源性生物碱化合物抗疲劳的运动机制及在何种运动水平下发挥抗疲劳作用还需进一步深入研究。食源性生物碱化合物之间共同使用及与其他抗疲劳食源性活性成分共同使用对抗运动疲劳的效果, 也是未来需要研究的方向。虽然目前研究发现的食源性生物碱类化合物并不多, 但已广泛的运用在抗运动疲劳食品中, 食源性生物碱类化合物是很有前景的天然抗运动疲劳产物。

1.8 食源性皂苷

一些学者主要对人参、百合、柴胡、罗汉果、黄芪、竹节参、天门冬、大豆、红景天等中的皂苷类化合物抗运动疲劳进行了不同程度的研究。人参皂苷主要通过调节中枢神经系统消除运动疲劳^[110]。人参皂苷 Rb1 减轻大鼠氧化应激损伤, 是由于人参皂苷 Rb1 增强大鼠体内 GSH-Px 和 SOD 的活性, 有效保护了大鼠中枢神经元的损伤^[111]。Tan 和 Zhuang 等^[112-113]的研究发现, 人参皂苷 Rb1 提高肌肉中 ATP 含量和增强了骨骼肌中能量代谢酶钠钾 ATP 酶 (Na⁺-K⁺-ATP) 的活性, 激活磷脂酰肌醇 3-激酶/蛋白激酶 B (PI3K-Akt) 的通路, 丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶 2 (serine-threonine kinase, Akt2) 和 Nrf2 的表达增加, 改善大鼠骨骼肌运动疲劳的症状。宋娟等^[114]的研究表明, 人参皂苷 Rg1 可以提高慢性疲劳综合征大鼠脑组织抗氧化酶系统活性并减少脂质过氧化代谢产物的堆积。王莹等^[115]的实验研究结果证实人参皂甙 Rg1 可以使小鼠的糖原增加、BUN 和 BLA 降低、SOD 活性增强, 具有很好的抗疲劳效果。杨佳丹等^[116]的研究发现人参皂苷 Rg3 能够降低缺氧模型大鼠的 BUN、MDA 含量和升高 LD、甘油三酯、血清总胆固醇、血糖浓度, 明显提高锰超氧化物歧化酶 (Manganese superoxide dismutase, Mn-SOD) 及骨骼肌线粒体呼吸链复合物 III、IV 活性。Xu 等^[117]进行的动物实验研究显示, 连续 7 d 给大鼠补充人参皂苷 Rg3 后, 力竭游泳时间能够延长 30% 左右, 人参皂苷 Rg3 能够激活细胞外信号调节激酶、蛋白激酶 A 和蛋白激酶 B 及 α -突触蛋白等信号通路, 提高磷酸化水平, 脑内多巴胺水平被提高。Ma 等^[118]的研究证实人参皂苷 Ro 可以提高机体能量利用率和改善运动能力。刘娜等^[119]连续给小鼠灌胃不同剂量人参皂苷 28 d (每天一次), 负重 5% 体重的重量进行游泳力竭试验, 高剂量明显延长负重游泳时间, 不同剂量人参皂苷 Ro 能够使 BUN、BLA、CK、MDA 明显降低, 肝糖原明显增加和 LDH 水平明显提高。

吴晓斌等^[120]的研究表明百合总皂苷有比较强的清除羟自由基能力且有剂量效应关系。Lin 和 Yang 等^[121-122]的研究发现柴胡总皂苷能够明显的提高 SOD 活性和降低 MDA 含量。夏星等^[123]连续 21 d 给小鼠灌胃不同剂量 (低 75 mg/kg、中 150 mg/kg、高 300 mg/kg) 罗汉果皂苷, 进行力竭游泳和常压耐缺氧试验, 力竭游泳时间延长 70% 左右且低剂量尤为明显, 低、中剂量耐缺氧存活时间明显延长, 肝糖原明显增加且中剂量最为明显, BUN 明显降低、BLA 明

显减少及LD活力明显增强。邹妍菁^[124]的牛蛙实验表明,黄芪总皂苷能够增强牛蛙坐骨神经干兴奋程度及抑制其动作电位的传导速度,电压门控钙离子通道激活。张舜波等^[125]连续给小鼠灌胃竹节参皂苷提取物(1.2 g/kg)7 d,小鼠负重游泳时间和耐缺氧之间显著延长(分别延长11.55、5.21 min),显著提高肝糖原和降低BUN。朱晓亚^[126]的实验研究证实天门冬总皂苷提取物中0.1 mg/g、高0.2 mg/g剂量能够显著提高小鼠LD活力和降低BLA。Yoshikoshi和刁小琴等^[127-128]的研究表明大豆皂苷有强的抗氧化活性。豆瑞等^[129]连续15 d给小鼠灌胃红景天苷(180 mg/kg/d),最后一次灌胃30 min后进行负重游泳2 h,运动后显著提高糖原含量和促进脂肪利用,显著降低总氨基酸浓度、血浆色氨酸。一些研究在对皂苷类化合物抗运动疲劳机制研究时发现,皂苷类化合物抗疲劳主要是对中枢神经系统的影响,应严格控制好抗运动疲劳的皂苷类化合物剂量,有必要对皂苷类化合物最适剂量进行深入研究。

1.9 食源性其他活性成分

研究证实二十八烷醇、牛蒡子苷元、萝卜硫素具有较好的抗运动疲劳的作用。二十八烷醇主要从米糠、南极磷虾、甘蔗蜡等天然物中提取。有研究证实,二十八烷醇能够显著的提高运动后小鼠肝糖原含量和降低BLA含量、BUN浓度^[130-133]。牛蒡子苷元能够激活小鼠心肌细胞中的AMPK,AMPK的信号途径增强了抗氧化酶表达和线粒体的生物合成^[134-135]。Oh等^[136]进行的实验研究表明萝卜硫素可以激活Nrf2,降低大强度运动引起的氧化应激水平。

2 抗运动疲劳食源性活性成分在运动疲劳食品的开发研究

目前研究发现的抗运动疲劳食源性活性成分丰富多样,但还在初步探索阶段,其应用在运动营养食品中还较少,只有个别抗运动疲劳食源性活性出现在运动营养食品配方中。目前市面上已开发的甘藷乐里就有食源性活性的成分氨基酸、玉米低聚肽、黄精多糖和黑茶茶多酚,甘藷乐能够使小鼠游泳负重时间显著延长,提高糖原量和降低BLA、BUN含量,有较好的抗运动疲劳效果^[137]。一家体育科技股份有限公司研发的一种具有抗疲劳作用的保健食品,主要成分包括茯苓提取物、淫羊藿提取物、红景天提取物,这些提取物含有皂苷、黄酮、生物碱、氨基酸、多糖等多种活性成分,临床试验表明可以延长小鼠负重游泳时间,减少小鼠血清尿素氮血清尿素和运动后血乳酸曲线下面积,具有缓解运动疲劳的功能^[138]。一种红景天抗高原运动疲劳食品主要成分有红景天提取物50 mg、谷氨酰胺100 mg、支链氨基酸100 mg,高原地区体育系学生到海拔1500 m以上的高原地区进行实验研究,实验组的学生连续7 d用红景天抗高原运动疲劳食品,对照组学生服用颜色、味道与红景天抗高原运动疲劳食品相似的食品,并进行适应训练。试验结果表明实验组学生运动时间、运动距离优于对照组,实验组学生的SOD、T-AOC、GSH-Px、MDA、BLA、睾酮显著优于对照组学生^[139]。目前,抗

运动疲劳食源性活性成分的食品,配方基本上是以一种活性成分为主,其他活性成分为辅的三种以上活性成分组成,这种方法配方的有效性、科学性及其抗运动疲劳的机制需要研究证实。现今,研发的抗运动疲劳食品基本上都是针对竞技比赛的特殊人群,未来需要充分利用动植食源性活性成分,研发针对普通运动人群的抗运动疲劳食品。

3 结论与展望

对于抗运动疲劳食源性活性成分的研究,大多数采用小鼠爬杆、跑台、负重游泳及体外抗氧化性的方法进行研究,结合不同运动强度进行人体实际实验的研究较少,且模型评价相对比较单一。另外,大部分研究把肌糖原、肝糖原、BLA、BUN、MDA、LD、SOD初步作为抗运动疲劳效果评价的指标,少数研究把AMPK、Nrf2初步作为抗运动疲劳效果的评价指标,也有个别研究把多巴胺初步作为抗运动疲劳的效果评价指标。大部分的研究没有阐释清楚食源性活性成分抗运动疲劳的内在机制,大多只说明了食源性活性成分能够抗运动疲劳是因为其具有较强的抗氧化性。今后,需要对抗运动疲劳食源性活性成分潜在机制、分子机理及其活性、稳定性及其量效构效关系进行深入研究,完全阐明食源性活性成分抗运动疲劳的机制及分子机理,以能量代谢和抗氧化的共同调控靶点为基础,进一步对抗运动疲劳食源性活性成分进行精选,选出机制明确、高效安全的食源性活性成分,并对精选出的抗运动疲劳食源性活性成分结合人体实际进行大量的实验研究,运用高科技科学、高效的提取食物中抗运动疲劳的精选食源性活性成分,采用先进工艺技术将几种食源性活性成分进行科学的组合和配方,研发高功效、多功效、口感好而成本低的天然绿色功能复合化的安全健康抗运动疲劳食品,满足不同运动人群的需求。

参考文献

- [1] Yu B, Lu Z, Bie X, et al. Scavenging and anti-fatigue activity of fermented defatted soybean peptides [J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 226(3): 415-421.
- [2] Siluaj E P, Borges L S, Mendes - Da - Silua A C, et al. L-Arginine supplementation improves rats' antioxidant system and exercise performance [J]. *Free Radical Research*, 2017, 51(3): 281-293.
- [3] 李晶, 魏健. 姬松茸多糖增强免疫功能及抗疲劳作用的研究[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(5): 201-204
- [4] 肖凤艳, 高磊, 赵子健, 等. 短梗五加果多酚提取工艺优化及抗疲劳作用[J]. *食品科学*, 2018, 39(22): 235-240.
- [5] Wool F K, Manore M M. B - vitamins and exercise: Does exercise alter requirements? [J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2006, 16(5): 453-484.
- [6] 王茵, 刘淑集, 苏永昌, 等. 天然虾青素的抗疲劳及抗氧化作用研究[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2015, 37(9): 42-48.
- [7] 刘源源, 刘军, 邹宇晓, 等. 抗疲劳功能食品检测评价研究进展及新思路[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(2): 209-213.

- [8] Lambert E V, Noakes T D, Hampson D B, et al. Exercise and fatigue control mechanisms [J]. *International SportMed Journal*, 2001, 2(3): 1-14.
- [9] Green H J. Mechanisms of muscle fatigue in intense exercise [J]. *Journal of Sports Sciences*, 1997, 15(3): 247-256.
- [10] Finaud J, Lac G, Filair E. Oxidative stress relationship with exercise and training review [J]. *Sports Medicine*, 2006, 36(4): 327-358.
- [11] 罗琳, 张纓. AMPK 与氧化应激及其与运动关系的研究进展 [J]. *中国体育科技*, 2017, 53(4): 125-130.
- [12] 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.
- [13] 王洪涛, 尹花仙, 金海珠, 等. 海参肽对小鼠抗疲劳作用的研究 [J]. *食品与机械*, 2007, 23(3): 89-91.
- [14] Wang L, Zhang H, Lu R, et al. The decapeptide CMS001 enhances swimming endurance in mice [J]. *Peptides*, 2008, 29(7): 1176-1182.
- [15] Nishitam M, Munekiyo Y, Sugino T, et al. Novel anti-fatigue compound: Imidazole dipeptide [J]. *Japanese Journal of Complementary and Alternative Medicine*, 2009, 6(3): 123-129.
- [16] Renj P D, Zhaom P D, Wangh P D, et al. Effects of supplementation with grass carp protein versus peptide on swimming endurance in mice [J]. *Nutrition*, 2011, 27(7): 789-795.
- [17] You L, Zhao M, Regenstein J M, et al. *In vitro* antioxidant activity and *in vivo* anti-fatigue effect of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) peptides prepared by papain digestion [J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(1): 188-194.
- [18] 方富永, 苗艳丽, 黄燕, 等. 波纹巴非蛤肉复合酶水解肽的抗疲劳效果 [J]. *食品科技*, 2011, 36(7): 20-23.
- [19] 李伟, 于新莹, 佟长青, 等. 大鲵黏液酶解产物的制备及其抗疲劳作用研究 [J]. *食品工业科技*, 2011, 32(6): 146-151.
- [20] Nam S, Kim H, Jeong H. Anti-fatigue effect by active dipeptides of fermented porcine placenta through inhibiting the inflammatory and oxidative reactions [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2016, 84: 51-59.
- [21] 丁树慧, 齐曼婷, 齐斌, 等. 低值海洋低聚肽抗氧化和抗疲劳活性 [J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 155-161.
- [22] 温红珊, 昌友权, 曹柏管. 蚕蛹蛋白多肽抗疲劳作用的实验研究 [J]. *食品科学*, 2009(19): 286-288.
- [23] 周丽丽, 李素反, 高红, 等. 大豆多肽对大强度训练举重运动员肌肉代谢的影响 [J]. *中国食品学报*, 2006, 6(1): 40-43.
- [24] Jiang C. Research of the recovery effect from socan polypeptide solid beverage on athletes in endurance events [J]. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 2015, 7(1): 5-12.
- [25] 李茂辉, 李硕, 郭红, 等. 大豆小分子肽生物学功能效果评价 [J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(12): 164-167.
- [26] 昌友权. 玉米肽抗疲劳作用的实验研究 [J]. *食品科学*, 2004, 25(9): 173-178.
- [27] 李晶. 玉米肽抗疲劳作用的实验研究 [J]. *食品与机械*, 2004, 20(1): 11-12.
- [28] 郑鸿雁. 玉米肽抗疲劳作用的实验研究 [J]. *中国粮油学报*, 2005, 20(1): 33-35.
- [29] Liu J, Chen W, Jik M, et al. An endurance-enhancing effect of peanut meal protein hydrolysate in mice; Possible involvement of a specific peanut peptide [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2014, 98(5): 830-837.
- [30] 彭维兵, 何秋霞, 刘可春, 等. 花生肽对小鼠抗运动性疲劳的实验研究 [J]. *山东科学*, 2011, 24(5): 35-38.
- [31] 刘晶, 温志英, 韩清波. 米渣肽抗疲劳作用及抗疲劳肽的分离鉴定 [J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(1): 1-5.
- [32] 曹向宇, 朱昱, 刘剑利, 等. 小米多肽对小鼠抗疲劳作用 [J]. *中国公共卫生*, 2011, 27(9): 1153-1154.
- [33] 潘丽军, 张丽, 王珏, 等. 谷氨酰胺活性肽的理化性质及抗氧化抗疲劳效果的研究 [J]. *食品科学*, 2009, 30(17): 308-311.
- [34] 林静. 疲劳产生机理及支链氨基酸对脑内 5-HT 影响的实验研究 [J]. *中国应用生理学杂志*, 2000, 16(4): 357.
- [35] 金宏, 许志勤, 王先远, 等. 支链氨基酸提高大鼠游泳耐力作用探讨 [J]. *营养学报*, 2011, 23(1): 48-51.
- [36] 欧阳儒颖. 补充支链氨基酸对大鼠精神疲劳的缓解作用 [D]. 上海: 第二军医大学, 2004.
- [37] Tsuda Y, Iwasawa K, Yamaguchi M. Acute supplementation of valine reduces fatigue during swimming exercise in rats [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2018, 82(5): 856-861.
- [38] 刘建红, 周志宏, 欧明毫, 等. 补充 BCAA 对划船运动员血激素的影响 [J]. *解放军体育学院学报*, 2003, 22(4): 15-17.
- [39] Seidel U, Huebbe P, Rimbach G. Taurine: A regulator of cellular redox-homeostasis and skeletal muscle function [J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2018; e1800569-e1800582.
- [40] Cai J G, Yin D Z, Tang H. The biochemical mechanisms of taurine in anti sports fatigue [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 550-553: 1043-1047.
- [41] 翟鹏贵, 刘小杰, 舒志成, 等. 牛磺酸复合饮料抗疲劳的实验研究 [J]. *饮料工业*, 2013, 16(11): 16-18.
- [42] 黄广良, 顾磊. 牛磺酸在游泳训练中的作用效果的研究 [J]. *成才之路*, 2007(24): 52-53.
- [43] 杨晓, 王政, 刘畅, 等. 大豆肽与牛磺酸复合粉的抗疲劳作用 [J]. *食品与机械*, 2018, 34(1): 140-143.
- [44] 瞿东杨, 史润东. 牛磺酸和咖啡因在抗疲劳饮料中的作用 [J]. *饮料工业*, 2018, 21(4): 17-19.
- [45] 卢向阳, 乔玉成, 朱亮, 等. 谷氨酰胺与番茄红素抗运动性疲劳效果的比较研究 [J]. *体育研究与教育*, 2015, 30(6): 106-110.
- [46] 姚乐辉. 化橘红多糖抗氧化能力及抗疲劳作用的研究 [J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(4): 95-100.
- [47] 陈筱春, 文质君, 熊静宇. 甲壳寡糖抗小鼠运动性疲劳的实验研究 [J]. *湛江师范学院学报*, 2005, 26(3): 53-55.
- [48] 尹雨芳, 林强, 曹建民, 等. 壳寡糖抗运动疲劳及对运动性免疫抑制的影响 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2016, 22(4): 146-149.
- [49] Xu X, Ding Y, Yang Y, et al. β -glucan Salecan improves exercise performance and displays anti-fatigue effects through

- regulating energy metabolism and oxidative stress in mice [J]. *Nutrients*, 2018, 10(7): 858-870.
- [50] 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): 100-108.
- [51] 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.
- [52] 王彦阳, 张中润. 腰果叶多酚超声波辅助提取工艺及其抗氧化能力测 [J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 53-58.
- [53] 谢佳函, 刘回民. 红豆皮多酚提取工艺优化及抗氧化活性分析 [J]. *中国食品学报*, 2020, 20(1): 147-155.
- [54] 武宇芳, 袁一柯, 朱旭辉, 等. 洋葱多酚抗氧化和抑菌活性研究 [J]. *食品工业*, 2013(12): 134-136.
- [55] 陈佳. 洋葱皮黄酮酶法辅助提取、纯化及体外抗氧化研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [56] Loku K, Aoyama Y, Tokuno A, et al. Various cooking methods and the flavonoid content in onion [J]. *Journal of Nutritional Science & Vitaminology*, 2001, 47(1): 78-83.
- [57] 周宁, 宁月宝. 黑洋葱多酚成分提取及抗氧化研究 [J]. *中国调味品*, 2020, 45(1): 64-66.
- [58] Kim S Y, Kim E A, Kang M C, et al. Polyphenol-rich fraction from *Ecklonia cava* (a brown alga) processing by-product reduces LPS-induced inflammation *in vitro* and *in vivo* in a zebrafish model [J]. *Algae*, 2014, 29(2): 165-174.
- [59] Jung H A, Kim J I, Choung S Y, et al. Protective effect of the edible brown alga *Ecklonia stolonifera* on doxorubicin-induced hepatotoxicity in primary rat hepatocytes [J]. *The Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2014, 66(8): 1180-1188.
- [60] Corona G, Ji Y, Aneboonlap P, et al. Gastrointestinal modifications and bioavailability of brown seaweed phlorotannins and effects on inflammatory markers [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2016, 115(7): 1240-1253.
- [61] Kim H H, Kim H S, Ko J Y, et al. A single-step isolation of useful antioxidant compounds from *Ishige okamurae* by using centrifugal partition chromatography [J]. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, 19(1): 22-29.
- [62] Rajauria G, Foley B, Abug N. Identification and characterization of phenolic antioxidant compounds from brown Irish seaweed *Himantalia elongata* using LC-DAD-ESI-MS/MS [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37(Part B): 261-268.
- [63] Agregan R, Munekatape S, Franco D, et al. Phenolic compounds from three brown seaweed species using LC-DAD-ESI-MS/MS [J]. *Food Research International*, 2017, 99(pt.3): 979-985.
- [64] Lu Y R, Foo L Y. Antioxidant and radical scavenging activities of polyphenols from apple pomace [J]. *Food Chemistry*, 2000, 68(1): 81-85.
- [65] 戚向阳, 王小红, 容建华. 不同苹果多酚提取物清除·OH 效果的研究 [J]. *食品工业科技*, 2001(4): 7-9.
- [66] 冯涛, 杨容, 李越敏, 等. 苹果多酚提取物抗氧化活性研究 [J]. *食品研究与开发*, 2008, 29(12): 189-192.
- [67] Yan X, Murrhy B T, Hammond G B, et al. Antioxidant activities and antitumor screening of extracts from cranberry fruit (*Vaccinium macrocarpon*) [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2002, 50(21): 5844-5849.
- [68] 柯春林, 郭猛, 王娣, 等. 蔓越莓原花青素的提取工艺及其体外抗氧化活性研究 [J]. *应用化工*, 2015, 44(1): 81-84.
- [69] Basu A, Bettin M, Ortiz J, et al. Low-energy cranberry juice decreases lipid oxidation and increases plasma antioxidant capacity in women with metabolic syndrome [J]. *Nutrition Research*, 2011, 31(3): 190-196.
- [70] Chu Y F, Liu R H. Cranberries inhibit LDL oxidation and induce LDL receptor expression in hepatocytes [J]. *Life Sciences*, 2005, 77(15): 1892-1901.
- [71] 李白存, 李沐慈, 等. 石榴籽多酚的体外抗氧化活性 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(4): 17-19.
- [72] 张东峰, 陈家豪. 7 种柑橘多酚、黄酮含量及其抗氧化活性比较研究 [J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 65-74.
- [73] 金鹿, 闫素梅. 维生素 A 抗氧化功能的机制 [J]. *动物营养学报*, 2015, 27(12): 3671-3676.
- [74] 韩磊, 马爱国, 梁惠. 不同剂量维生素 A 摄入对大鼠 DNA 损伤的影响 [J]. *中国公共卫生*, 2004, 20(8): 943-945.
- [75] 艾华. 当前运动营养研究述评 [J]. *中国运动医学杂志*, 2010, 29(2): 228-232.
- [76] Smith G I, Atherton P, Reeds D N, et al. Dietary omega-3 fatty acid supplementation increases the rate of muscle protein synthesis in older adults: A randomized controlled trial [J]. *Am J Clin Nutr*, 2011, 93(2): 402-412.
- [77] Lamers Y, O'Rourke B, Uilbert I R, et al. Vitamin B6 restriction tends to reduce the red blood cell glutathione synthesis rate without affecting red blood cell or plasma glutathione concentrations in healthy men and women [J]. *Am J Clin Nutrition*, 2009, 90(2): 336-343.
- [78] Guan Y, Cui Z J, Sun, et al. Celastrol attenuates oxidative stress in the skeletal muscle of diabetic rats by regulating the-AMPK-PGC1 α -SIRT3 signaling pathway [J]. *Int J Mol Med*, 2016, 37(5): 1229-1238.
- [79] 顾洪雁, 张媛英, 翟静, 等. 维生素 C 和芦丁对力竭运动小鼠组织自由基代谢的影响 [J]. *中国临床康复*, 2005(44): 144-146.
- [80] 金其贯, 徐碧君. Vitamin E 对大运动量大鼠内皮细胞内分泌功能的影响 [J]. *中国运动医学杂志*, 2000, 19: 278-281.
- [81] Tauler P, Aguilo A, Fuentespina E, et al. Diet supplementation with vitamin E, vitamin C and beta-carotene cocktail enhances basal neutrophil antioxidant enzymes in athletes [J]. *Pflungers Arch*, 2002, 443(5-6): 719-797.
- [82] 余斌, 覃承河. 抗氧化维生素对大鼠运动能力的影响 [J]. *第一军医大学学报*, 2003, 23(9): 892-894.
- [83] Ji L L, Gomez-Cabrera M C, Vina J. Exercise and hormesis: Activation of cellular antioxidant signaling pathway [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2006, 1067: 425-435.
- [84] Gomez-Cabrera M C, Domenech E, Vina J. Moderate exercise is an antioxidant: Upregulation of antioxidant genes by training [J]. *Free Radic Bio Med*, 2008, 44: 126-131.
- [85] Ji L L. Modulation of skeletal muscle antioxidant defense by exercise: Role of redox signaling [J]. *Free Radic Bio Med*, 2008,

- 44:142-152.
- [86] Gomez - Cabrera M C, Borrás C, Pallardo F V, et al. Decreasing xanthine oxidase-mediated oxidative stress prevents useful cellular adaptations to exercise in rats [J]. *Physiol*, 2005, 567:113-120.
- [87] Weight L M, Myburgh K H, Noakes T D. Vitamin and mineral supplementation: Effect on the running performance of trained athletes [J]. *Am J Clin Nutr*, 1988, 47:192-195.
- [88] Viva J, Gomez-Cabrera M C, Lloret A, et al. Free radicals in exhaustive physical exercise: Mechanism of production, and protection by antioxidants [J]. *Lubmb Life*, 2010, 50 (4-5): 271-277.
- [89] Kon M, Kimura F, Akimoto T, et al. Effect of Coenzyme Q10 supplementation on exercise-induced muscular injury of rats [J]. *Exerc Immunol Rev*, 2007, 13(1):76-88.
- [90] Brutonj D, Place N, Yanada T, et al. Reactive oxygen species and fatigue-induced prolonged low frequency force depression in skeletal muscle fibres of rats, mice and SOD2 overexpressing mice [J]. *J Physiol*, 2008, 86(1):175-184.
- [91] Ataka S, Tanaka G, Noiakt S, et al. Effects of Apple-phenol and ascorbic acid on physical fatigue [J]. *Nutrition*, 2007, 23(5): 419-423.
- [92] 周丽, 梁新乐, 励建荣. 胡萝卜素抗氧化作用研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2003, 3(2):21-23.
- [93] Oshima S, Ojima F, Sakamoto H, et al. Supplementation with carotenoids inhibits singlet oxygen-mediated oxidation of human plasma low-density lipoprotein [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44:2306-2309.
- [94] 张承越, 邓泽元, 李红艳. 类胡萝卜素清除超氧阴离子和氢过氧自由基活性 [J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2018, 42(2):129-133.
- [95] 刘钰华, 李佳, 闫唯, 等. 超声波辅助提取圣女果番茄红素及其抗氧化活性研究 [J]. *保鲜与加工*, 2017, 17(2):73-77, 82.
- [96] 刘国安, 薛莹, 马伟, 等. 番茄红素的抗氧化活性研究 [J]. *西北师范大学学报:自然科学版*, 2016, 52(2):89-94.
- [97] 刘秀萍. 番茄红素对人体高强度耐力运动后氧自由基代谢的影响 [J]. *北京体育大学学报*, 2006, 29(9):1205-1207.
- [98] 吴丽君, 郭新明, 张俊峰. 番茄红素及运动对人体血清自由基代谢的影响 [J]. *体育科学*, 2008, 28(2):47-53.
- [99] 苏卿, 李谦. 叶黄素的抗氧化-促氧化作用研究 [J]. *食品工业科技*, 2014, 35(9):68-70.
- [100] Pereira P E, Motoyama Y, Esteves G J, et al. Caffeine supplementation delays the fatigue through central nervous system modulation [J]. *Sport Sciences for Health*, 2016, 12(2): 239-245.
- [101] Davis J M, Zhao Z, Stock H S, et al. Central nervous system effects of caffeine and adenosine on fatigue [J]. *Am J Physiol*, 2003, 284(2):R399-404.
- [102] 李淑翠, 张敏, 陈向明, 等. 咖啡因抗运动性疲劳作用的实验研究 [J]. *中国食品添加剂*, 2012(3):120-124.
- [103] Ganio, Matthew S. Effect of caffeine on sport-specific endurance performance: A systematic review [J]. *Journal of Strength Conditioning Research*, 2009, 23(1):315-324.
- [104] Davis J K. Caffeine and anaerobic performance: Ergogenic value and mechanisms of action [J]. *Sports Med*, 2009, 39(10): 813-832.
- [105] 刘军, 乔德才, 刘晓莉. 咖啡因延缓运动疲劳作用及机制研究进展 [J]. *中国运动医学杂志*, 2018, 37(9):791-795.
- [106] 穆丽华, 刘屏, 等. 胡椒碱及其衍生物抗疲劳和心肌细胞保护作用研究 [J]. *解放军药学报*, 2009, 25(2):113-116.
- [107] 刘少华. 辣椒素对运动抗疲劳及生化指标的影响研究 [J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2018, 41(4):55-58.
- [108] 徐明, 郑鸿雁, 王巍, 等. 黄秋葵种子中生物碱类化合物抗疲劳活性研究 [J]. *吉林农业*, 2014(5):30-31.
- [109] 杨忠敏, 王祖文. 食源性桑叶生物碱在模拟胃肠消化过程中的抗氧化及抗蛋白、DNA氧化损伤 [J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(8):36-43.
- [110] 张祥, 张晶莹, 宋昕恬, 等. 人参皂苷的抗疲劳作用研究 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(5):12-14.
- [111] 杜璐迪, 张昌静, 叶星照, 等. 人参皂苷 Rb1 对术后疲劳综合征大鼠中枢氧化应激的影响 [J]. *中草药*, 2013, 44(9):1168-1173.
- [112] Tan S J, Li N, Zhou F, et al. Ginsenoside Rb1 improves energy metabolism in the skeletal muscle of an animal model of postoperative fatigue syndrome [J]. *Journal of Surgical Research*, 2014, 191(2):344-349.
- [113] Zhuang C L, Mao X Y, Liu S, et al. Ginsenoside Rb1 improves postoperative fatigue syndrome by reducing skeletal muscle oxidative stress through activation of the PI3K/Akt/Nrf2 pathway in aged rats [J]. *Eur J Pharmacol*, 2014, 740:480-487.
- [114] 宋婧, 刘涛. 人参皂甙 Rg1 对慢性疲劳综合征大鼠抗氧化酶系统活性的影响研究 [J]. *陕西中医*, 2014, 35(1):101-102, 103.
- [115] 王莹, 马莉, 裴素萍, 等. 人参皂甙 Rg1 抗疲劳作用实验研究 [C]//第六届全国中西医结合营养学术会议论文集. 重庆:中国中西医结合学会, 2015.
- [116] 杨佳丹, 向荣凤, 戴青, 等. 人参皂苷 Rg3 对模拟高原缺氧大鼠的抗疲劳效应和骨骼肌线粒体功能的影响 [J]. *第三军医大学学报*, 2019, 41(2):110-115.
- [117] Xu Y, Zhang P, Wang C, et al. Effect of ginsenoside Rg3 on tyrosine hydroxylase and related mechanisms in the forced swimming-induced fatigue rats [J]. *J Ethnopharmacol*, 2013, 150(1):138-147.
- [118] Ma G D, Chiu C H, Hsu Y J, et al. Changbai mountain ginseng (*Panax ginseng* C. A. Mey) extract supplementation improves exercise performance and energy utilization and decreases fatigue-associated parameters in mice [J]. *Molecules*, 2017, 22(2):E237.
- [119] 刘娜, 刘鲲, 刘蕊川, 等. 人参皂苷对小鼠抗疲劳作用研究 [J]. *光明中医*, 2015, 30(9):1867-1869.
- [120] 吴晓斌, 任凤莲, 邱昌桂, 等. 百合皂苷的提取、纯化及其对自由基的清除作用 [J]. *天然产物研究与开发*, 2005, 17(6):777-780.
- [121] Lin X, Wu S, Wang Q, et al. Saikosaponin-D reduces H₂O₂-induced PC12 cell apoptosis by removing ROS and blocking

- MAPK-dependent oxidative damage [J]. *Cell Mol Neurobiol*, 2016, 36(8):1365-1375.
- [122] Yang L, Liu J, Qi G. Mechanism of the effect of saikosa-ponin on atherosclerosis *in vitro* is based on the MAPK signaling pathway [J]. *Mol Med Rep*, 2017, 16(6):8868-8874.
- [123] 夏星, 钟振国, 林彩云, 等. 罗汉果皂苷抗疲劳及耐缺氧作用[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2012, 18(17):198-201.
- [124] 邹妍苇. 黄芪总皂苷抗运动性疲劳的作用及其机制研究[D]. 江西: 江西科技师范大学, 2019.
- [125] 张舜波, 游秋云, 吴鹏, 等. 竹节参皂苷提取物对小鼠抗疲劳及耐缺氧作用的实验研究[J]. *湖北中医药大学学报*, 2013, 15(5):15-17.
- [126] 朱晓亚. 天门冬总皂苷提取物的纯化及体内抗疲劳作用研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(9):263-269.
- [127] Yoshikoshi M, Yoshiki Y, Okubo K, et al. Prevention of hydrogen peroxide damage by soybean saponins to mouse fibroblasts [J]. *Planta Medica*, 1996, 62(3):252-255.
- [128] 刁小琴, 关海宁, 徐桂花, 等. 脱脂豆粕大豆皂苷提取物的定性分析和抗油脂氧化[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(8):209-212.
- [129] 豆瑞, 马莉, 郭晓冬, 等. 红景天苷对不同运动状态下小鼠糖、脂肪及蛋白质代谢的影响[J]. *同济大学学报: 医学版*, 2018, 39(1):59-63.
- [130] 曹志然, 李利平, 徐月清, 等. 二十八烷醇对实验动物免疫功能及游泳耐力的影响[J]. *食品科学*, 2004, 25(7):158-160.
- [131] 钟耕, 魏益民. 含二十八烷醇油胶囊缓解体力疲劳、降血脂功能研究[J]. *中国粮油学报*, 2006, 21(5):89-92.
- [132] 杨浩. 二十八烷醇的制备及其对机体能量代谢的影响和机理研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
- [133] 陈芳, 赵广华, 蔡同一, 等. 二十八烷醇对强制冷水应激大鼠行为及神经内分泌指标的影响[J]. *营养学报*, 2007, 29(4):408-410.
- [134] Tang X, Zhuang J, Chen J, et al. Arctigenin efficiently enhanced sedentary mice treadmill endurance [J]. *Plos One*, 2011, 6(8):e24224.
- [135] Wu R M, Sun Y Y, Zhou T T, et al. Arctigenin enhances swimming endurance of sedentary rats partially by regulation of antioxidant pathways [J]. *Acta Pharmacologica Sinica*, 2014, 35(10):1274-1284.
- [136] Oh S, Komine S, Warabi E, et al. Nuclear factor (erythroid derived 2)-like 2 activation increases exercise endurance capacity via redox modulation in skeletal muscles [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):12902-12912.
- [137] 童敏, 龚莉, 张逸. 甘蔚乐对小鼠抗疲劳作用的研究[J]. *中南药学*, 2017, 15(4):440-442.
- [138] 北京康比特体育科技股份有限公司. 一种具有抗疲劳作用的保健食品及其制备: 中国, 201611177109.8 [P]. 2016-12-19.
- [139] 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.
- (上接第343页)
- [42] 刘丽影, 刘国华, 张士英, 等. 大豆卵磷脂口服液的研制[J]. *食品工业科技*, 2002, 23(6):91-92.
- [43] 林淑英. 卵黄卵磷脂的提取与贮藏性能的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2001.
- [44] 冯鑫, 张晓明. 过瘤胃保护胆碱在奶牛生产中的应用[J]. *中国奶牛*, 2011(12):9-14.
- [45] Lieber C S. Pathogenesis and treatment of alcoholic liver disease: Progress over the last 50 years [J]. *Roczniki Akademii Medycznej w Białymstoku* (1995), 2005, 50:7-20.
- [46] Xu Y Q, Leo M A, Lieber C S. DLPC attenuates alcohol-induced cytotoxicity in HepG2 cells expressing CYP2E1 [J]. *Alcohol and Alcoholism*, 2005, 40(3):172-175.
- [47] Mak K M, Wen K F, Ren C L, et al. Dilinoleoylphosphatidylethanolamine reproduces the antiapoptotic actions of polyenylphosphatidylethanolamine against ethanol-induced hepatocyte apoptosis [J]. *Alcoholism: Clinical and Experimental Research*, 2003, 27(6):997-1005.
- [48] Cao Q, Mak K M, Lieber C S. Dilinoleoylphosphatidylethanolamine prevents transforming growth factor- β 1-mediated collagen accumulation in cultured rat hepatic stellate cells [J]. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 2002, 139(4):202-210.
- [49] 黄素芬. 鸭蛋黄卵磷脂提取技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [50] 池莉平, 谭剑斌, 陈瑞仪. 大豆卵磷脂辅助降血脂功能实验研究[J]. *热带医学杂志*, 2007, 7(1):28-29, 18.
- [51] 苏羽航. 可食性油墨的研制及其性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
- [52] Jafari F, Agh N, Noori F, et al. Effects of dietary soybean lecithin on growth performance, blood chemistry and immunity in juvenile stellate sturgeon (*Acipenser stellatus*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 80:487-496.
- [53] Zhou X X, Lin H H, Zhu S C, et al. Textural, rheological and chemical properties of surimi nutritionally-enhanced with lecithin [J]. *LWT*, 2020, 122:108984.
- [54] 李清春, 张景强. 卵磷脂的特性及其在食品中的应用[J]. *保鲜与加工*, 2001, 1(1):23-25.
- [55] Yi X Z, Zheng Q H, Pan M H, et al. Liposomal vesicles-protein interaction: Influences of iron liposomes on emulsifying properties of whey protein [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89:602-612.
- [56] Dong N, Zhu C E, Jiang J H, et al. Development of composite PLGA microspheres containing exenatide-encapsulated lecithin nanoparticles for sustained drug release [J]. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2020, 15(3):347-355.
- [57] Sarabandi K, Mahoonak A S, Hamishehkar H, et al. Protection of casein hydrolysates within nanoliposomes: Antioxidant and stability characterization [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 251:19-28.
- [58] 齐文娟, 岳红卫, 王伟. 大豆磷脂的理化特性及其开发与应用[J]. *中国油脂*, 2005, 30(8):35-37.
- [59] 张长贵, 董加宝, 王祯旭. 畜禽副产物的开发利用[J]. *肉类研究*, 2006, 20(3):40-43.
- [60] 熊国远, 陈晓, 徐幸莲, 等. 鸡肝的生产与加工利用研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(22):310-314.