

DOI: 10.13376/j.cbls/20240233

文章编号: 1004-0374(2025)02-0170-16

补充植物提取物预防运动诱导的肌肉损伤的研究进展

许亚民¹, 许嘉兴², 王 政^{2*}

(1 山西工商学院, 太原 030072; 2 齐鲁理工学院, 济南 250200)

摘要: 随着健康中国战略的实施, 越来越多的人加入体育运动中, 不适当的运动易引起损伤。其中, 运动性肌肉损伤 (exercise-induced muscle damage, EIMD) 是由于长时间或高强度的运动, 导致肌肉收缩能力受损、出现氧化应激及炎症反应, 从而不同程度地影响人们的日常生活。植物提取物因具有抗氧化、抗炎等生物学功能, 成为预防 EIMD 的极佳选择。本文通过归纳总结补充植物提取物预防 EIMD 的现有机制及临床研究, 发现植物提取物可以通过降低肌肉损伤标志物水平、提高抗氧化酶活性、抑制氧化应激和炎症等缓解 EIMD, 且富含多酚和中药皂苷等活性化合物的植物提取物已被众多临床研究证明可以有效减轻 EIMD 并加速肌肉功能恢复。总之, 补充植物提取物是预防 EIMD 的重要选择。

关键词: 运动性肌肉损伤; 植物提取物; 生物学; 研究进展

中图分类号: G804.2; R685.4 **文献标志码:** A

Research progress on supplementing plant extracts to prevent exercise induced muscle injury

XU Ya-Min¹, XU Jia-Xing², WANG Zheng^{2*}

(1 Shanxi Technology and Business University, Taiyuan 030072, China; 2 Qilu Institute of Technology, Jinan 250200, China)

Abstract: With the implementation of the Healthy China Strategy, more and more people are participating in sports, inappropriate sports are prone to cause injuries, among which exercise-induced muscle damage (EIMD) is due to prolonged or high-intensity exercise, which leads to impairment of muscle contraction, oxidative stress and inflammatory response, thus affecting people's daily lives to varying degrees. Plant extracts are an excellent choice for the prevention of EIMD due to their biological functions such as antioxidant and anti-inflammatory. In this paper, we summarize the existing mechanisms and clinical studies on the prevention of EIMD by supplementation with plant extracts, and find that plant extracts can alleviate EIMD by reducing the levels of muscle damage markers, increasing the activity of antioxidant enzymes, and inhibiting oxidative stress and inflammation, etc. In addition, plant extracts rich in polyphenol and Chinese herbal saponin have been shown to be effective in alleviating EIMD and accelerating recovery of muscle function in a number of clinical studies. In conclusion, supplementation with plant extracts is an important option for the prevention of EIMD.

Key words: exercise-induced muscle damage; plant extracts; biology; research progress

随着健康中国战略的实施, 体育运动的范围已经从竞技运动扩大至健康促进, 体育活动被广泛认为是慢性疾病预防与康复的手段之一。不适当的运动易引起损伤, 其中运动性肌肉损伤 (exercise-induced muscle damage, EIMD) 是由于长时间或高强度的运动, 尤其涉及大量离心运动^[1, 2], 导致肌肉收缩能力受损, 出现氧化应激及炎症反应。EIMD

的特征是在初始运动即刻至 14 天出现相关症状, 如肌肉酸痛^[3]、僵硬肿胀^[4]、肢体位置紊乱^[5]等,

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-09-04

基金项目: 山东省高等学校哲学社会科学基金项目(面上项目)(2024ZSMS417)

*通信作者: E-mail: wxz298499@163.com

这些症状表现及持续时间会不同程度影响人们的日常生活。因此, 有效预防 EIMD 的发生并加速损伤恢复, 是健康中国战略实施中的关键一环。现有研究显示, 预防与恢复 EIMD 的方法主要包含两个方面: 首先是物理疗法, 如局部振动疗法^[6]、冷冻疗法^[7]等已经被证实能够促进损伤后肌肉功能的恢复; 其次为营养干预, 其目的是使机体最大限度地恢复, 为下一轮运动做好充足准备, 因而许多营养性或功能性食物的恢复潜力被发掘^[8]。目前, 补充支链氨基酸^[9]、姜黄素^[10]、维生素^[11]、咖啡因^[12]等物质均被证明能够有效缓解 EIMD, 而这些营养物质大多是从天然植物中提取出来的。

植物提取物主要是以植物的某一部分或全部为原料, 采用物理或化学方法提取和(或)分离, 进而定向获取和浓缩植物中的多种成分, 且不改变植物原有成分结构特征的产品。因其具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤等多种生物学功能, 被广泛用于医药、食品和日化行业。由于全面小康社会的到来, 越来越多的人追求“大健康”的生活理念——同时追求个体的生理与心理健康, 以及社会、环境及家庭等各方面的健康。在“大健康”时代背景下, 基于植物提取物的良好理论基础和广阔的市场前景, 本文通过检索 PubMed、Web of Science、中国知网和万方等数据库, 归纳总结了补充植物提取物预防 EIMD 的相关研究, 为下一步基础及临床研究奠定基础、指明方向。

1 植物提取物预防EIMD的相关机制

1.1 EIMD发生发展机制

EIMD 的确切机制尚未完全阐明, 现存的研究主要将 EIMD 的发生发展分为两个阶段^[13], 见图 1。在第一阶段中, 肌肉在相同力的情况下进行离心收缩时, 运动单位激活数量较少^[14], 使得局部肌纤维所承受的应力变大^[15], 进而导致一些肌节发生断裂, 若离心收缩反复进行则会造成更多的纤维断裂。此阶段主要为肌节的机械损伤, 造成肌丝激发的收缩耦合过程失效, 导致肌力下降^[16]。在第二阶段中, 细胞外及线粒体内的 Ca^{2+} 大量自主流入细胞质, 导致细胞内 Ca^{2+} 依赖性蛋白水解酶和磷脂酶途径被激活^[17], 肌细胞内的结构蛋白被降解。此外, 为清除受损及坏死组织并启动修复程序, 炎性细胞逐渐渗入组织, 进而诱发一系列炎症级联反应^[18]。这些炎性细胞也可通过 NADPH 氧化酶衍生的超氧阴离子依赖机制, 产生高浓度的细胞毒性分子, 从而加重

现有的损伤。其次, 运动会促进组织和器官产生一些高活性的分子, 如活性氧 (reactive oxygen species, ROS)。研究表明, 适宜的运动会产生低水平的 ROS, 低水平或生理水平的 ROS 是维持肌肉功能所必需的^[19]; 而急性运动可促进 ROS 的过度产生, 加之炎性细胞代谢所产生的 ROS, 导致细胞内氧化-抗氧化稳态严重失衡^[20], 过多的自由基参与组织的进一步损伤。炎症反应和氧化应激迫使组织发生二次损伤, 最终导致细胞发生凋亡或坏死^[21]。目前, EIMD 的发生发展相关机制仍在研究中。

1.2 植物提取物预防EIMD的分子机制

1.2.1 植物提取物加速清除血液代谢产物, 降低肌肉损伤标志物水平

剧烈运动会加速机体能量代谢, 使血液中血乳酸 (blood lactic acid, BLA)、血尿素氮 (blood urea nitrogen, BUN) 等代谢产物的水平大幅升高, 同时骨骼肌细胞膜破裂, 胞内物质流入血中, 造成血液中肌酸激酶 (creatinase, CK) 和乳酸脱氢酶 (lactate dehydrogenase, LDH) 等肌肉损伤标志物水平升高。近年来, 北美人参 (*Panax quinquefolus* L.)^[22]、橘皮 (Orange peel)^[23]、巴豆 (*Croton argyrophyllus*)^[24]、玛咖 (*Lepidium meyenii* Walp.)^[25, 26]、蓝莓 (*Vaccinium corymbosum* cv. Reka)^[27, 28]、肉苁蓉 (*Cistanche deserticola*)^[29]、黄芪和当归 (*Astragali radix* and *Angelicae gigantis radix*)^[30]、芦苇根 (*Phragmites rhizome*)^[31]、刺五加 (*Acanthopanax senticosus*)^[32]、丹参 (*Radix Salviae miltiorrhiza*)^[33]、浆果^[34]、连翘 (*Forsythia suspensa*)^[35] 等提取物均被证明能够增强机体对 BLA 和 BUN 的清除能力, 降低血液中 CK 和 LDH 的含量。此外, 有体外研究直接证明, 野樱莓提取物能够有效抑制 H_2O_2 诱导的骨骼肌细胞活力下降^[36]。总之, 以上研究表明, 补充植物提取物能够有效防止 EIMD, 增强骨骼肌对损伤的抵抗能力。

1.2.2 植物提取物提高抗氧化剂的含量, 调整失衡的氧化-抗氧化系统

在生理状态下, ROS 可以通过几种抗氧化剂作用维持在低水平, 包括外源补充天然抗氧化剂、内源性抗氧化酶 (如超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GPx)、谷胱甘肽转移酶 (glutathione transferase, GST)) 和内源性抗氧化分子 (包括总游离硫醇 (total free thiols, TFT)、谷胱甘肽 (glutathione, GSH) 和硫氧还蛋白 (thioredoxin, Trx) 等)^[37, 38]。EIMD 后 ROS 过度产生, 抗氧化酶

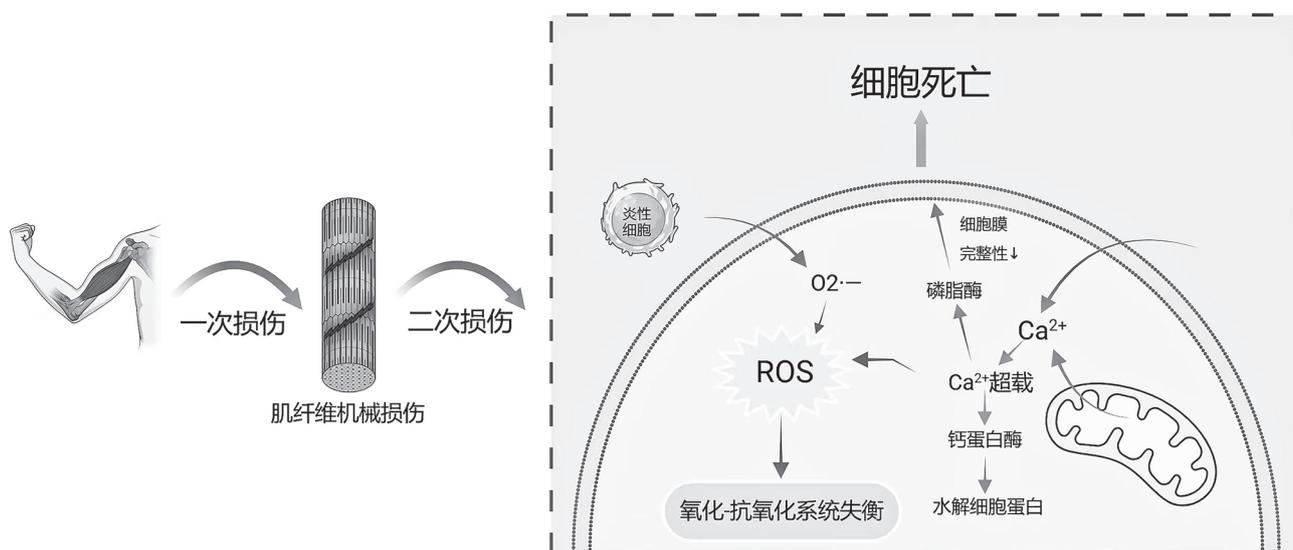


图1 EIMD发生发展机制图

不足以对其进行及时清除,造成肌肉组织中氧化-抗氧化系统的紊乱失衡,表现为还原型谷胱甘肽与氧化型谷胱甘肽比值(GSH/GSSG)降低,脂质过氧化产物如丙二醛(methylenedianiline, MDA)含量增多等。研究表明,补充植物提取物能够降低EIMD后ROS的水平^[25,27],其机制可能是通过提高SOD、CAT、GPx、GST等抗氧化酶和TFT、Trx等抗氧化分子含量^[28,34,35,39,40],导致GSH/GSSG升高、MDA减少^[24,33],进而调整了肌肉组织中氧化-抗氧化系统的失衡状态。

1.2.3 植物提取物调节组织相关蛋白的表达,有效预防损伤并加速恢复

EIMD进展机制研究显示,氧化应激和炎症反应是肌纤维二次损伤的主要原因。EIMD发生后,肌肉组织中白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)、白细胞介素-1 β (interleukin-1 β , IL-1 β)和单核细胞趋化蛋白-1(monocyte chemotactic protein-1, MCP-1)水平升高,标志着炎症的发生;而补充植物提取物能够有效降低IL-6、IL-1 β 、MCP-1含量^[23,34],抑制EIMD。ROS的过度产生会导致肌肉氧化应激,而植物提取物能够通过提高抗氧化剂含量等抑制氧化应激。在此基础上,王铨等^[40]深入研究发现,植物提取物可能通过调节组织中NAD-依赖性去乙酰化酶/过氧化物酶体增殖受体 γ 辅激活因子 α /线粒体转录因子A(sirtuin 1/peroxisome proliferators-activated receptor γ coactivator α /mitochondrial transcription factor A, SIRT1/PGC-1 α /TFAM)、核转录因子红系2相关因子2/血红素加氧酶1(nuclear factor erythroid

2 (NF-E2)-related factor 2/heme oxygenase 1, Nrf2/HO-1)通路,维持线粒体稳态并干预抗氧化体系。此外,EIMD后,机体在承受肌肉损伤的同时启动修复程序。研究显示,植物提取物可调节肌肉LIM蛋白(muscle LIM protein, MLP)、肌肉特异性环指蛋白1(muscle RING-finger protein-1, MuRF1)、肌肉锚蛋白重复结构域2(ankyrin repeat domain protein 2, Ankrd2)、肌动蛋白 α 1(actin alpha 1, Actal)、三结构域蛋白72(tripartite motif containing 72, TRIM72)和成肌分化因子(myogenic differentiation, MyoD)表达水平,促进肌肉组织的修复与再生,加速损伤修复^[34,40]。

植物提取物预防EIMD的分子机制研究总结见图2和表1。

2 植物提取物预防EIMD的临床研究

2.1 多酚类

天然多酚是植物、蔬菜等其他植物的次级代谢产物,具有良好的生物学活性和生物相容性^[41]。众多研究显示多酚可作为抗氧化剂以及抗炎、抗菌化合物,减少和预防糖尿病高血压等^[42]。现有研究显示,葡萄籽(Meganatural-BP[®])^[43]、海松(*Pinus pinaster Aiton*)^[44]、酸樱桃(Nordiccherry[®])^[45]、石榴(Pomegranate)^[46]、葡萄(*Vitis vinifera L.*)^[47]、大蒜(Garlic)^[48]、姜黄(*Curcuma longa L.*)^[49]、白绒水龙骨(*Phlebodium decumanum*)提取物^[50]能够抑制运动后血液CK水平,预防EIMD直接损伤,进一步抑制炎症反应及氧化应激损伤,显著减轻运动后肌

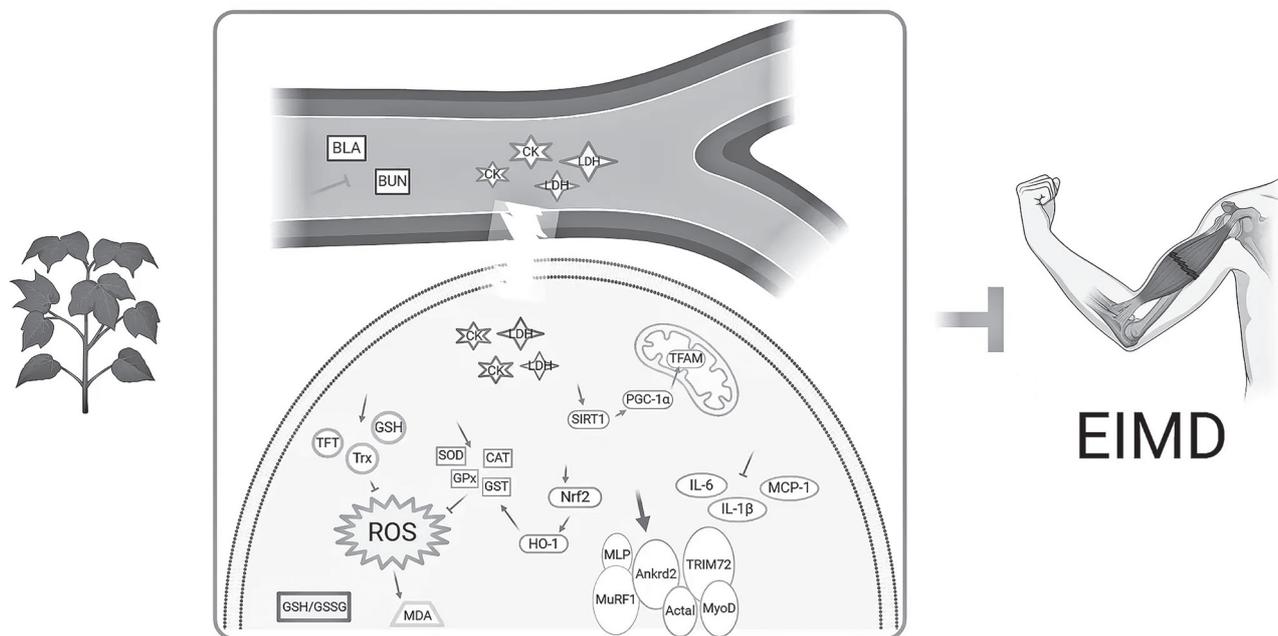


图2 植物提取物预防EIMD机制图

肉疼痛程度。此外, 研究表明运动后补充山竹、石榴与接骨木果实提取混合物 (TensLess[®]) 可有效减轻 EIMD^[51]。为加强效果, 研究人员将芒果叶 (Zynamite[®]) 提取物与槲皮素联用发现, 可显著降低肌肉疼痛及损伤程度, 加速肌肉的恢复^[52]。然而, Jo 等^[53]的研究结果显示, 补充反式白藜芦醇和富含多酚的提取物对运动后 CK 水平无影响, 但显著减轻肌肉酸痛及炎症反应, 由此推断补充该提取物可以在不调节损伤标志物水平的情况下减轻 EIMD。以上结果显示, 补充富含多酚的植物提取物能够有效预防 EIMD, 然而不同提取物对于评估指标的影响可能存在差异。

2.1.1 儿茶素

儿茶素类化合物作为多酚类的一员, 具有抗氧化、清除自由基、加强新陈代谢、调节机体免疫和抗肿瘤的功能, 被认为具有极大的疾病预防潜力。绿茶提取物富含儿茶素及表儿茶素等, 因而被广泛应用于 EIMD 的预防, 研究显示其能够显著降低运动后 CK 的水平, 减轻炎症及氧化应激反应^[54-57]。然而, 也有研究称绿茶提取物的补充既不能防止运动引起的肌肉损伤, 也不能改善短跑成绩^[58], 仅仅对人体氧化应激状态产生了有益影响^[59]。基于以上研究结果的差异, Townsend 等^[60]将绿茶和红茶 (*Camellia sinensis*) 水提物联合使用, 通过对运动后骨骼肌进行活检发现, 其有效改善了急性肌肉损伤性阻力运动后骨骼肌的凋亡信号, 抑制了 EIMD 的

表现。综上, 关于富含儿茶素的提取物对于 EIMD 的预防效果仍需要进一步深入研究。

2.1.2 花青素

花青素是一类广泛存在于众多植物中的水溶性天然色素。相关研究^[61]证实饮用富含花青素的抗氧化果汁能有效加速 EIMD 的恢复。Hunt 等^[62]检测了富含花青素的新西兰黑加仑提取物对一次剧烈等速抗阻运动后肌肉损伤和恢复指数的影响, 发现其能够有效抑制肌肉损伤并促进运动后肌肉功能的恢复。而 Costello 等^[63]将 20 名跑步者随机分组后进行一次半程马拉松运动, 在运动前 7 天及运动后 2 天均摄入黑加仑提取物胶囊或安慰剂, 结果却显示补充该种提取物对休闲跑步者半程马拉松后对抗运动跳跃变量的恢复和肌肉酸痛或疲劳无影响。针对以上研究结果的差异, 还需进一步深入研究花青素的有效性及其作用机制。

2.2 中药皂苷

皂苷是中药中的重要活性成分之一, 被广泛应用于化妆品等行业^[64]。最近的研究表明, 中药皂苷类成分能够通过多种机制发挥抗癌特性^[65]。通过梳理文献总结归纳发现, 中药皂苷能够有效预防 EIMD, 主要包括以下几种有效成分。

2.2.1 马鞭草苷

柠檬马鞭草 (*Verbena triphylla*) 是一种原产南美洲的灌木, 主要用于茶叶、饮料、食品和香料。其提取物中含有多种化学成分, 其中马鞭草苷是最主

表1 植物提取物预防EIMD的分子机制

植物提取物名称	主要有效成分	植物提取物干预			EIMD		肌肉损伤评估指标	研究结论	参考文献
		补充剂量及方式	补充时间	实验对象	EIMD模型				
北美人参(<i>Panax quinquefolius</i> L.) 提取物	人参皂苷(人参醇提取)、人参多糖(人参水提取物)	300 mg/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前14天	雄性Wistar大鼠	60 min下坡跑(-14%); 24 m/min); 取比目鱼肌	CK、HE染色、HIS48免疫染色	减少离心运动引起的肌肉损伤和炎症	[22]	
橘皮(Orange peel) 提取物	多甲氧基黄酮(橘皮醇提取物)	92、276 mg/kg; 灌胃给药	1次; 运动前30 min	雄性SD大鼠	90 min下坡跑(-10%); 20 m/min); 24 h后取股外侧肌、腓肠肌、跖肌、比目鱼肌、胫前肌和指长伸肌	MCP-1、IL-1 β 、CK	对离心运动引起的骨骼肌损伤具有保护作用	[23]	
黑樱桃(Black chokeberry fruit) 提取物	甘露醇	100、300、1000 μ g/mL	/	L6细胞	300 μ mol/L H ₂ O ₂	细胞活力	有望防止持续高强度运动的运动员肌肉损伤	[36]	
巴豆(大戟科)内皮(<i>Croton argyrophyllus</i> inner bark) 提取物	酚类化合物	200 mg/kg; 灌胃给药	1次; 运动前1 h	大鼠	单次高强度举重训练; 取腓肠肌	MDA、CK、LDH	部分降低了大鼠肌肉组织中氧化应激和肌肉损伤的生物标志物	[24]	
辣木叶(<i>Moringa oleifera</i> leaf) 提取物	硫代葡萄糖苷、多酚、类黄酮、酚酸	1/1000 MOLE; 1/100 MOLE	1次; 24 h	C2C12细胞	1 mmol/L H ₂ O ₂	TAC、GSH/GSSG、TFT、Trx、SOD、CAT、GPx、GST	代表一种有效的营养策略, 可以保持肌肉健康	[39]	
玛咖(<i>Lepidium meyenii</i> Walp.) 提取物	总多酚、总黄酮、总多糖	10 mL/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前4周	ICR小鼠	强迫负重游泳	BLA、BUN、LDH、ROS、HE染色、NAD ⁺ /NADH	有望作为一种功能性食品补充剂, 改善运动表现, 减轻身体疲劳	[25]	
玛咖(<i>Lepidium meyenii</i> Walp.) 提取物	玛咖酰胺	0.1 mg/mL	1次; 18 h	C2C12细胞	480 μ mol/L H ₂ O ₂	细胞活力、ROS、线粒体功能	两种玛咖酰胺提取物均可通过减轻运动中骨骼肌的损伤来缓解疲劳, 其中纯化提取物效果更好	[26]	
蓝莓(<i>Vaccinium corymbosum</i> L.) 提取物	总多酚、花青素	1、5、25、50 μ g/mL	1次; 30 min	L6细胞	10 μ mol/L钙离子载体A23187	ROS、LDH、CK	有助于减轻氧化应激引起的肌肉损伤	[27]	

表1 植物提取物预防EIMD的分子机制(续表)

植物提取物名称	主要有效成分	植物提取物干预		EIMD		肌肉损伤评估指标	研究结论	参考文献
		补充剂量及方式	补充时间	实验对象	EIMD模型			
肉苁蓉(<i>Cistanche deserticola</i>) 提取物	毛蕊花糖苷、松果菊苷	0.25、0.50、1.00 g/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前3周	雄性ICR小鼠	强迫负重游泳; 取腓肠肌	CK、LDH	通过减少肌肉损伤、延缓乳酸积累和改善能量储存来提高小鼠的游泳能力	[29]
黄芪和当归(20:8) (<i>Astragal radix and Angelicae gigantis radix</i>) 水提混合物	/	100、200 mg/mL; 灌胃给药	1次/天; 运动前14天	雄性ICR小鼠	强迫游泳测试	LDH、CK	改变了疲劳相关指标	[30]
芦苇根(<i>Phragmites rhizome root</i>) 提取物	多糖	1 g/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前10天	雄性ICR小鼠	强迫游泳测试	LDH、CK	降低血浆CK水平, 具有抗疲劳作用	[31]
刺五加(<i>Acanthopanax senicosus</i>) 提取物	饱和与不饱和脂肪酸(脂溶性成分)	200、500 mg/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前9天	雄性ICR小鼠	负重游泳测试	BUN、LDH	通过减少肌肉损伤来增强小鼠游泳能力	[32]
丹参(<i>Radix salviae miltiorrhizae</i>) 提取物	丹酚酸B、丹参酮IIIA	0.675、1.35、2.7 g/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前7天; 运动中10天	雄性SD大鼠	力竭游泳测试; 取腓肠肌	BUN、MDA、SOD、GSH/GSSG、CK、肌肉代谢组学分析	通过提高脂肪利用率、降低蛋白质和碳水化合物利用率来调节能量代谢, 从而延缓疲劳	[33]
芜菁根(<i>Brassica rapa L.</i>) 提取物	多糖、黄酮、多酚、皂苷等	0.5、1 g/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前4周	雄性昆明小鼠	强迫负重游泳测试; 取腓肠肌	ATP、NAD ⁺ /NADH、MDA、SOD、CAT、GPx、SIRT1、PGC-1 α 、TFAM、Nrf2、HO-1、MLP、MuRF1、Ankrd2、Actal	通过维持肌肉细胞能量代谢稳定, 促进线粒体功能, 从而抑制剧烈运动造成的骨骼肌生理功能异常	[40]
蓝莓(<i>Vaccinium corymbosum cv. Reka</i>) 提取物	花色苷	100、200、500 mg/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前30天	雄性BALB/c小鼠	负重游泳测试	BLA、BUN、LDH、SOD、MDA、GPx	具有良好的抗疲劳效用, 作用机制可能涉及减少肌肉损伤途径	[28]

表1 植物提取物预防EIMD的分子机制(续表)

植物提取物名称	主要有效成分	植物提取物干预		EIMD		肌肉损伤评估指标	研究结论	参考文献
		补充剂量及方式	补充时间	实验对象	EIMD模型			
浆果提取物	花青素	0.5 g/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前2周	雌性SD大鼠	90 min离心运动(-16%; 16 m/min); 取胫骨前肌	肌肉酸痛、CK、SOD、IL-6、IL-1 β 、TRIM72、MyoD	蛋白联合抗氧化剂可有 效减少离心运动引起的 肌肉损伤、抑制机体的 炎症反应并降低肌肉酸 痛程度	[34]
连翘(<i>Forsythia suspensa</i>)提取物	/	40 mg/kg; 灌胃给药	1次/天; 运动前4周	雄性SD大鼠	渐进式力竭运动	CK、LDH、MDA、SOD、GPx	有效减缓力竭运动导致 的氧化伤害和肌肉损伤	[35]

Actal: actin alpha 1, 肌动蛋白 α 1; Ankrd2: ankyrin repeat domain protein 2, 锚蛋白重复结构域 2; BLA: blood lactic acid, 血乳酸; BUN: blood urea nitrogen, 血尿素氮; CAT: catalase, 过氧化氢酶; CK: creatine kinase, 肌酸激酶; GPx: glutathione peroxidase, 谷胱甘肽过氧化氢酶; GSH/GSSG: glutathione / glutathione oxidized, 谷胱甘肽/氧化性谷胱甘肽; GST: glutathione transferase, 谷胱甘肽S转移酶; HO-1: heme oxygenase 1, 血红素氧合酶1; IL-1 β : interleukin-1 β , 白细胞介素-1 β ; IL-6: interleukin-6, 白细胞介素-6; LDH: lactate dehydrogenase, 乳酸脱氢酶; MCP-1: monocyte chemoattractant protein-1, 单核细胞趋化蛋白-1; MDA: methylenedianiline, 丙二醛; MLP: muscle LIM protein, 肌肉LIM蛋白; MuRF1: muscle RING-finger protein-1, 肌肉RING手指蛋白1; MyoD: myogenic differentiation, 成肌分化蛋白; Nrf2: nuclear factor erythroid 2 (NF-E2)-related factor 2, 核转录因子红系2相关因子2; PGC-1 α : peroxisome proliferators-activated receptor γ coactivator α , 过氧化物酶体增殖激活受体- γ 辅激活因子-1 α ; ROS: reactive oxygen species, 活性氧; SOD: superoxide dismutase, 超氧化物歧化酶; SIRT1: sirtuin 1, 沉默信息调节因子; TAC: total antioxidant capacity, 总抗氧化能力; TFAM: mitochondrial transcription factor A, 线粒体转录因子A; TFI: total free thiols, 总自由巯基; TRIM72: tripartite motif containing 72, 三结构域蛋白72; Trx: thioredoxin, 硫氧还蛋白。

要、最有效的化合物,属于环烯醚萜类化合物,发挥抗炎、抗菌、抗病毒等多种生物学功能^[66]。Lee等^[67]对60名大学生随机分组,补充10天柠檬马鞭草提取物或安慰剂后进行下肢最大离心负荷运动,发现其有效降低了运动后的肌肉损伤、肌肉酸痛和氧化应激程度。Buchwald-Werner等^[68]的研究也显示,在强化跳跃运动前、中、后补充柠檬马鞭草提取物,有效抑制了肌肉力量的损失,减轻了肌肉酸痛程度,并提高了机体的抗氧化能力。综上,富含马鞭草苷的柠檬马鞭草提取物能够有效预防EIMD。

2.2.2 红景天苷

红景天(*Rhodiola rosea*)是一种多年生草本植物,产于高海拔地区,因其对健康的积极药理作用而受到广泛研究^[69]。红景天提取物中含有多种活性化合物,其中红景天苷作为其特征性成分,发挥抗炎及抗氧化等生物学功能。Jówko等^[70]对26名体育专业男生补充4周红景天提取物或安慰剂后进行精神运动测试,发现补充组的精神运动表现得到改善,然而这种改善可能与其抗氧化生物活性无关。Shanely等^[71]在马拉松运动员进行马拉松比赛前、中、后分别补充红景天提取物,却发现其并不能改变热休克蛋白72的水平以及肌肉功能、肌肉损伤程度及炎症生物标志物水平。因此,红景天提取物对于EIMD的确切的预防作用仍需进一步研究。

2.2.3 人参皂苷

人参是使用最为广泛的传统草药之一,其主要的活性物质是人参皂苷,其中三萜皂苷仅在人参中存在^[72]。人参或人参皂苷的抗氧化、抗炎及抗衰老等多种药理作用被挖掘^[73],其对多种疾病具有治疗作用,如糖尿病^[74]等。Lin等^[75]对14名大学生随机分组,补充28天西洋参(*Panax quinquefolium* L.)提取物或安慰剂后进行60 min下坡跑,发现其能通过抑制脂质过氧化和促进炎症适应来减轻EIMD。Jung等^[76]同样进行了EIMD干预研究,结果显示血浆中CK和IL-6的水平降低,提示运动前和运动后补充人参(*Panax ginseng*)提取物可以有效减少运动引起的肌肉损伤和炎症反应。综上,富含人参皂苷的参类提取物能够有效预防EIMD。

2.2.4 蒺藜皂苷

蒺藜(*Tribulus terrestris*)是一种传统中药,其主要活性成分是蒺藜皂苷,属于甾体皂苷。Ma等^[77]对15名男性拳击手随机分组,补充6周蒺藜提取物或安慰剂并进行高强度运动训练,发现实验

组人员的肌肉损伤程度明显减轻,无氧能力显著提高。

2.3 硝酸盐、醉茄内酯

NO在肌肉恢复过程中发挥重要作用,能够通过抗氧化及增加肌肉血流量不断调节肌肉功能。硝酸盐作为NO的前体物质,能够与胃酸反应部分转换为NO。Burgos等^[78]研究发现,瓜氨酸和甜菜根(Beetroot)提取物联合补充9周,可促进肌肉更快地恢复状态,却不能预防EIMD。南非醉茄(*Withania somnifera*)对多种人类疾病具有改善作用,其富含醉茄内酯(一种甾体内酯),是其重要活性成分之一。Wankhede等^[79]发现补充8周南非醉茄提取物能够与阻力训练相辅相成,显著提高肌肉的质量和力量,预防EIMD。

植物提取物预防EIMD的临床研究总结见表2。

3 展望

健康中国战略提出后,越来越多的人参与到运动中,而运动性损伤不可避免,EIMD是常见的运动损伤之一,其发生发展机制涉及机械性损伤、氧化应激及炎症反应等。植物提取物作为天然抗氧化和抗炎成分的重要来源,其富含的多酚、中药皂苷等活性化合物已被众多研究证实能够有效预防EIMD。

然而,现有研究仍存在一定局限性。首先,在机制研究方面,植物提取物对EIMD的干预效果是肯定的,然而仍需更深入地研究证实植物提取物对肌肉发挥保护作用的具体机制。其次,少量临床研究存在否定结果,其可能与受试对象类型、补充时间、补充剂量、补充形式、EIMD模型等因素相关,对部分结果存在疑问的研究需更为严谨周密的实验设计,进一步确定其保护作用效果。此外,植物提取物作为天然治疗性成分的来源之一,其针对EIMD的用药安全是值得关注的问题,现存研究受试对象主要集中于健康大学生和运动员,其安全性评估却是空白,极少量研究提到在以运动员为受试对象时,需注意该类植物提取物的应用是否对兴奋剂检测结果产生影响。安全性评估主要包含两个方面:一是人体最大/推荐摄入量是否有渊源或出处;其次,植物提取物成分复杂,不同成分之间的相互拮抗或协同作用也是用药安全的影响因素之一。因此,今后的研究需进一步注重安全性评估,并扩大受试人群,如健康老年人等,将植物提取物应用推向运动保健市场。

表2 植物提取物预防EIMD的临床研究

植物提取物名称	植物提取物干预			EIMD		肌肉损伤检测指标	研究结论	参考文献
	有效成分	补充剂量	补充时间	补充方式	实验对象			
葡萄籽 (Meganatural-BP®) 提取物	多酚	300 mg/d	1次/晚; 运动后3天	胶囊口服	16名健康男 大学生	离心肌肉收缩(2.5次/ 组; 2组; 组间休息5 min)	最大肌力、肌肉酸痛、 CK	作为一种营养干预可以 减少高强度力量训练后 的肌肉损伤 [43]
海松(<i>Pinus pinaster aiton</i>) 提取物	花青素、 酚酸	800 mg/d	1次/天; 16 天(运动前 14天, 运 动后2天)	片剂口服	20名健康男 大学生	重复2.5-watt斜坡方 案, 直至力竭	肌肉疼痛、CK、 LDH、MDA、白细胞 介素家族、干扰素、肿 瘤坏死因子- α	缓解运动后氧化应激 [44]
山竹、石榴和接 骨木果(TensLess®) 提取物	多酚	1 500 mg/d	1次/天; 5 周(3周洗 脱期)	胶囊口服	18名大学生 (12男6女)	离心运动方案(8组8 RM半深蹲训练)	肌肉酸痛、血清血浆肌 红蛋白、肌酐、总CK	运动后补充可以保护肌 细胞, 减少离心运动引 起的损伤后酸痛 [51]
芒果叶(Zynamite®) 提取物联合褪皮素	多酚	140 mg提 取物+140 mg褪皮素/ 次	运动前1 h 1次; 运动 后每8 h服 用1次, 3次	胶囊口服	48名体育科学 专业的三年级 学生(30男18 女)	10 km跑步+100次跳 远	血清肌红蛋白、 血清高敏C反应蛋白、 CK、谷丙转氨酶、跳 跃性能	减轻肌肉疼痛和损伤, 加速肌肉性能的恢复 [52]
酸樱桃 (Nordiccherry®) 提取物	多酚	500 mg/d	1次/天; 运动前7天	胶囊口服	13名男性	急性抗阻运动方案(6 组10次杠铃后蹲, 间 歇2 min)	血清蛋白羰基、CK	减少氧化应激和剧烈阻 力运动后肌肉和心脏损 伤标志物 [45]
石榴(Pomegranate) 提取物	多酚	1300 mg/d	2次/天; 9 天(第5天 运动)	饮料口服	16名健康男性	离心运动方案(等速 测力仪)	肌肉酸痛、CK、肌红 蛋白、IL-6、C反应蛋白	显著改善在破坏性离心 运动后2~3天的等长肌 力恢复 [46]
葡萄(<i>Vitis vinifera</i> L.)提取物	多酚	400 mg/d	30天	胶囊口服	20名优秀 运动员	重复跳跃疲劳测试	氧自由基吸收能力、抗 氧化铁还原能力、抗 oxldl自身抗体、SOD、 GPx、CAT、血浆维生 素E、抗坏血酸、尿异 丙醇、血浆生成磷酸激 酶、甘油三酯、胆固 醇、血清铁蛋白、尿 素、血红蛋白、物理性 能测试	改善了优秀运动员在比 赛期间的氧化应激/抗氧 化状态平衡, 并提高了 成绩 [47]

表2 植物提取物预防EIMD的临床研究(续表)

植物提取物名称	有效成分	植物提取物干预			EIMD		肌肉损伤检测指标	研究结论	参考文献
		补充剂量	补充时间	补充方式	实验对象	EIMD模型			
白绒水龙骨 (<i>Phlebodium decumanum</i>) 提取物	多酚	400 mg/d	4天	胶囊口服	40名业余 运动员	高强度体能运动	总胆红素、甘油三酯、 总胆固醇、磷脂、血 浆黏度、肿瘤坏死因 子 α 、IL-6、TNF-可溶 性受体II、白细胞介素 1拮抗剂受体、总抗氧 化状态、异前列腺素、 8-羟基-2-脱氧鸟苷(8- OHdG); GPx、CAT	在高强度运动期间, 口 服补充可以有效降低氧 化应激程度, 并具有保 护性抗炎作用	[50]
反式白藜芦醇 (<i>Trans-resveratrol</i>) 和富含多酚提取物	白藜芦醇- 多酚	60 mg/d	运动前 30天	胶囊口服	22名健康大学 生(10男12女)	垂直深度跳跃	身体成分、肌肉力量、 肌肉酸痛、局部疼痛阈 值和耐受性、下半身的 灵活性、下半身动力与 疲劳、CK、C反应蛋 白、IL-6	可以在不调节EIMD的 间接生物标志物的情况 下减轻离心负荷阻力运 动后的酸痛和炎症, 并 改善性能恢复	[53]
大蒜(<i>Garlic</i>) 提取物	类黄酮	1 000 mg/d	1次/天; 4周	胶囊口服	11名健康男性	40 km自行车骑行	葡萄糖、非酯化脂肪 酸、CK、LDH、尿 酸、呼吸交换率、尿 IL-6、肿瘤坏死因 子 α 、TAC、MDA	口服4周可以减轻运动 引起的氧化炎症和肌肉 损伤	[48]
绿茶(<i>Camellia sinensis</i>)提取物	儿茶素	500 mg/d	1次/早; 15天	胶囊口服	16名男性 运动员	膝关节伸展试验后, 次极限自行车试验	表面肌电图、C反应 蛋白、CK、脂质过氧 化、心率;	对累积疲劳状态下的神 经肌肉功能具有积极影 响	[54]
绿茶(<i>Camellia sinensis</i>)提取物	儿茶素	500 mg/d	1次/早; 15天	胶囊口服	20名未训练 男性	小腿上抬运动, 至疲劳	CK、LDH、乙酰胆碱 酯酶、ROS、脂质过氧 化、蛋白质羰基化、血 浆铁还原能力、GSH	并未减少运动后迟发性 肌肉酸痛的感觉, 而是 减少了运动后肌肉损伤 生物标志物	[55]
绿茶(<i>Camellia sinensis</i>)提取物 酸茶(<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.)提取物	类黄酮、 多酚	450 mg/d; 450 mg/d	每天午餐后 2 h服用; 6 周	胶囊口服	54名男子足球 运动员	常规运动训练	谷草转氨酶、CK、 LDH、MDA、TAC	对男性运动员的氧化应 激状态有有益的影响, 然而对肌肉损伤状态没 有影响	[59]

表2 植物提取物预防EIMD的临床研究(续表)

植物提取物名称	植物提取物干预		EIMD		肌肉损伤检测指标	研究结论	参考文献		
	有效成分	补充剂量	补充时间	补充方式				实验对象	EIMD模型
绿茶(Green tea) 提取物	儿茶素	980 mg/d	1次/天; 4周×2	胶囊口服	16名短跑 运动员	两次重复循环 冲刺测试	SOD、GSH、TAC、尿 酸、白蛋白、MDA、 CK	既没有防止运动引起的 肌肉损伤,也没有改善 短跑成绩	[58]
绿茶提取物	儿茶素	250 mg/d	运动后2 h 服用	片剂口服	体育学院100名 篮球员	激烈运动	尿素、MDA、CK、 GPx	对篮球运动员运动性疲 劳有修复、移植作用, 能避免运动员肌肉损伤	[56]
绿茶提取物	儿茶素	/	/	片剂口服	40名摔跤运动 员; 40名跆拳道 运动员	快踢或过肩棒, 三次试验	BUN、MDA、SOD	对无氧运动具有修复和 移植的功效,可有效避 免运动员出现肌肉损伤	[57]
绿茶和红茶 (<i>Camellia sinensis</i>) 水提取物	儿茶素	2 000 mg/d	1次/天; 28天	饮料	38名健康男性	下半身阻力训练方案 (深蹲、腿部按压和 腿部伸展练习)	肌 红 蛋 白 、 F A D D (S e r 1 9 4) 、 B A D (S e r 1 1 2) 、 B e l - 2 (S e r 7 0) 、 p 5 3 (S e r 4 6) 、 J N K (T h r 1 8 3 / T y r 1 8 5) 、 C a s p a s e 3 、 C a s p a s e 8 、 C a s p a s e 9	可以改变急性肌肉损伤 性阻力运动后骨骼肌的 凋亡信号	[60]
新西兰黑加仑 (<i>CurraNZ™</i>) 提取物	花青素	600 mg/d	1次/天; 运 动前7天, 运动后2天	胶囊口服	20名休闲跑步 者(8女12男)	半程马拉松比赛	反向跳跃成绩变量、 IL-6、肌肉酸痛和疲劳	对休闲跑步者半程马拉 松后反向运动跳跃变量 的恢复和肌肉酸痛或疲 劳的感知没有影响	[63]
新西兰黑加仑(New zealand blackcurrant) 提取物	花青素	3 000 mg/d	1次/早; 运 动前8天, 运动后4天	胶囊口服	27名健康人 (19女8男)	60次肱二头肌向心和 离心收缩	肌肉酸痛、最大自主收 缩、活动范围、CK	在离心运动前后服用可 减轻肌肉损伤并改善功 能恢复	[62]
姜黄(<i>Curcuma longa</i> L.)提取物	姜黄素	1 500 mg/d	1次/天; 4周	胶囊口服	28名健康男性	半程马拉松比赛后测 试	CK、LDH、丙氨酸转 氨酶、天冬氨酸转氨 酶、肌红蛋白、IL-6、 IL-10	男性跑步者补充4周可 导致IL-10升高和肌红蛋 白降低	[49]

表2 植物提取物预防EIMD的临床研究(续表)

植物提取物名称	植物提取物干预			EIMD		肌肉损伤检测指标	研究结论	参考文献
	有效成分	补充剂量	补充时间	补充方式	实验对象			
柠檬马鞭草 (<i>Planox[®] Verbena triphylla</i>)提取物	马鞭草苷	400 mg/d	1次/早; 运 动前10天 至结束	胶囊口服	60名大学生 (30男30女)	EIMD模型 下肢最大离心 负荷运动	12 min库珀跑/走测试、 减少运动后肌肉损伤和 酸痛 反动作跳跃评估、大 腿中部等长拉力、肌肉 僵硬测试、疼痛、身 体成分、血清葡萄糖、 谷草转氨酶、谷丙转氨 酶、LDH、总胆固醇、 甘油三酯、高密度脂质 胆固醇、低密度脂质 胆固醇、CK、GPx、 IL-6、8-羟基-2脱氧鸟 苷(8-OHdG)	[67]
柠檬马鞭草 (<i>Recoverben[®]</i>) 提取物	马鞭草苷	400 mg/d	1次/早; 运动前10 天, 运动 中1天, 运 动后4天	胶囊口服	44名健康人	强化跳跃方案	肌肉最大自主收缩、肌 肉酸痛、CK、GPx、 IL-6	减少剧烈运动后的肌肉 损伤 [68]
红景天(<i>Rhodiola rosea</i>)提取物	红景天苷	600 mg/d	3次/天; 4周	片剂口服	26名体育 专业男生	精神运动测试; 峰值测试	睾酮、皮质醇、生长激 素、SOD、CK、脂质 氢过氧化物、TAC	长期摄入可以改善年 轻、健康和体力活跃的 男性的精神运动表现的 一些参数 [70]
红景天(<i>Rhodiola rosea</i>)提取物	红景天总苷	600 mg/d	2次/天; 运动前30 天, 运动 当天, 运 动后7天	胶囊口服	48名马拉松 运动员	马拉松比赛	马拉松后垂直跳远、肌 肉酸痛、肌红蛋白、 肌酸磷酸激酶、天冬 氨酸转氨酶、丙氨酸转 氨酶、IL-6、IL-8、IL- 10、MCP-1、粒细胞集 落刺激因子、C反应蛋 白、热休克蛋白72	在跑马拉松前30天补充 600 mg/d的红景天提取 物并没有减轻马拉松后 肌肉功能的下降, 也没 有增加肌肉损伤、迟发 性肌肉酸痛以及热休克 蛋白72或血浆细胞因子 水平 [71]

表2 植物提取物预防EIMD的临床研究(续表)

植物提取物名称	植物提取物干预				EIMD		研究结论	参考文献	
	有效成分	补充剂量	补充时间	补充方式	实验对象	EIMD模型			
西洋参(<i>Panax quinquefolium</i> L.) 提取物	人参皂苷	16.00 mg/d	1次/天; 28天	胶囊口服	14名男大学生	60 min的下坡跑	肌肉酸痛、8-异前列腺素F2 α 、CK、IL-1 β 、IL-4、IL-10、肿瘤坏死因子 α	短期补充可以通过降低脂质过氧化和促进炎症适应来减轻离心性EIMD	[75]
人参(<i>Panax ginseng</i>)提取物	人参皂苷	20.000 mg/d	3次/天; 运动前7天, 运动后4天	溶液口服	18名男大学生	高强度上坡跑步	CK、IL-6、口服葡萄糖耐量测试;	减少运动引起的肌肉损伤和炎症反应,从而改善胰岛素敏感性	[76]
蒺藜(<i>Tribulus terrestris</i>)提取物	蒺藜皂苷	1.250 mg/d	1次/早; 6周	胶囊口服	15名男拳击手	3周高强度训练, 3周大容量训练	CK、BUN、血红蛋白、睾酮、二氢睾酮、IGF-1、IGFBP-3、肌肉量和脂肪量检测;	显著减轻肌肉损伤,提高无氧表现	[77]
甜菜根(<i>Beetroot</i>) 提取物	硝酸盐	2.100 mg/d	1次/天; 9周	胶囊口服	32名男性铁人三项运动员	库珀测试	尿素、肌酐、谷草转氨酶、谷丙转氨酶、谷氨酰转氨酶、LDH、CK、睾酮、皮质醇	3 g/d瓜氨酸和2.1 g/d甜菜根提取物组合连续补充9周可促进肌肉更快恢复状态,但不能预防EIMD	[78]
南非醉茄(<i>Withania somnifera</i>)提取物	醉茄内酯	600 mg/d	2次/天; 8周	胶囊口服	57名无抗阻训练经验男性	8周阻力训练	肌力、肌肉大小、体成分、血清睾酮、CK	与肌肉质量和力量的显著增加有关	[79]

BAD: Bcl2-associated agonist of cell death, Bcl2相关的细胞死亡激动因子; Bcl-2: B-cell lymphoma-2, B细胞淋巴瘤-2; BUN: blood urea nitrogen, 尿素氮; CAT: catalase, 过氧化氢酶; CK: creatine kinase, 肌酸激酶; FADD: Fas-associated protein with death domain, Fas相关死亡结构域蛋白; GPx: glutathione peroxidase, 谷胱甘肽过氧化物酶; GSH: glutathione, 谷胱甘肽; IGF-1: insulin-like growth factor 1, 胰岛素样生长因子1; IGFBP-3: insulin like growth factor binding protein 3, 胰岛素样生长因子结合蛋白3; IL-4: interleukin-4, 白细胞介素-4; IL-6: interleukin-6, 白细胞介素-6; IL-8: interleukin-8, 白细胞介素-8; IL-10: interleukin-10, 白细胞介素-10; JNK: c-Jun N-terminal kinase, c-Jun氨基末端激酶; LDH: lactate dehydrogenase, 乳酸脱氢酶; MCP-1: monocyte chemoattractant protein-1, 单核细胞趋化蛋白-1; MDA: methylenedianiline, 丙二醛; p53: tumor suppressor protein p53, 肿瘤抑制蛋白p53; ROS: reactive oxygen species, 活性氧; SOD: superoxide dismutase, 超氧化物歧化酶; TAC: total antioxidant capacity, 总抗氧化能力。

[参 考 文 献]

- [1] Bowtell J, Kelly V. Fruit-derived polyphenol supplementation for athlete recovery and performance. *Sports Med*, 2019, 49: 3-23
- [2] Owens DJ, Twist C, Cobley JN, et al. Exercise-induced muscle damage: what is it, what causes it and what are the nutritional solutions? *Eur J Sport Sci*, 2019, 19: 71-85
- [3] Byrne C, Eston RG, Edwards RH. Characteristics of isometric and dynamic strength loss following eccentric exercise-induced muscle damage. *Scand J Med Sci Sports*, 2001, 11: 134-40
- [4] Hody S, Croisier JL, Bury T, et al. Eccentric muscle contractions: risks and benefits. *Front Physiol*, 2019, 10: 536
- [5] Paschalis V, Nikolaidis MG, Theodorou AA, et al. Eccentric exercise affects the upper limbs more than the lower limbs in position sense and reaction angle. *J Sports Sci*, 2010, 28: 33-43
- [6] Percival S, Sims DT, Stebbings GK. Local vibration therapy, oxygen resaturation rate, and muscle strength after exercise-induced muscle damage. *J Athl Train*, 2022, 57: 502-9
- [7] Ferlito JV, Ferlito MV, Leal-Junior ECP, et al. Comparison between cryotherapy and photobiomodulation in muscle recovery: a systematic review and meta-analysis. *Lasers Med Sci*, 2022, 37: 1375-88
- [8] Volpe-Fix AR, de França E, Silvestre JC, et al. The use of some polyphenols in the modulation of muscle damage and inflammation induced by physical exercise: a review. *Foods*, 2023, 12: 916
- [9] Salem A, Ben Maaoui K, Jahrami H, et al. Attenuating muscle damage biomarkers and muscle soreness after an exercise-induced muscle damage with branched-chain amino acid (BCAA) supplementation: a systematic review and meta-analysis with meta-regression. *Sports Med Open*, 2024, 10: 42
- [10] Beba M, Mohammadi H, Clark CCT, et al. The effect of curcumin supplementation on delayed-onset muscle soreness, inflammation, muscle strength, and joint flexibility: a systematic review and dose-response meta-analysis of randomized controlled trials. *Phytother Res*, 2022, 36: 2767-78
- [11] Martínez-Ferrán M, Cuadrado-Peñafiel V, Sánchez-Andreo JM, et al. Effects of acute vitamin C plus vitamin E supplementation on exercise-induced muscle damage in runners: a double-blind randomized controlled trial. *Nutrients*, 2022, 14: 4635
- [12] Caldas LC, Salgueiro RB, Clarke ND, et al. Effect of caffeine ingestion on indirect markers of exercise-induced muscle damage: a systematic review of human trials. *Nutrients*, 2022, 14: 1769
- [13] Howatson G, van Someren KA. The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports Med*, 2008, 38: 483-503
- [14] Semmler JG. Motor unit activity after eccentric exercise and muscle damage in humans. *Acta Physiol (Oxf)*, 2014, 210: 754-67
- [15] Enoka RM. Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *J Appl Physiol* (1985), 1996, 81: 2339-46
- [16] Fridén J, Sjöström M, Ekblom B. Myofibrillar damage following intense eccentric exercise in man. *Int J Sports Med*, 1983, 4: 170-6
- [17] Gissel H. The role of Ca^{2+} in muscle cell damage. *Ann N Y Acad Sci*, 2005, 1066: 166-80
- [18] Turkel I, Tahtalioglu S, Celik E, et al. Time-course and muscle-specific gene expression of matrix metalloproteinases and inflammatory cytokines in response to acute treadmill exercise in rats. *Mol Biol Rep*, 2024, 51: 667
- [19] Wang F, Wang X, Liu Y, et al. Effects of exercise-induced ROS on the pathophysiological functions of skeletal muscle. *Oxid Med Cell Longev*, 2021, 2021: 3846122
- [20] Park J, Jang J, So B, et al. Effects of particulate matter inhalation during exercise on oxidative stress and mitochondrial function in mouse skeletal muscle. *Antioxidants (Basel)*, 2024, 13: 113
- [21] Mikkelsen UR, Fredsted A, Gissel H, et al. Excitation-induced Ca^{2+} influx and muscle damage in the rat: loss of membrane integrity and impaired force recovery. *J Physiol*, 2004, 559: 271-85
- [22] Estaki M, Noble EG. North American ginseng protects against muscle damage and reduces neutrophil infiltration after an acute bout of downhill running in rats. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2015, 40: 116-21
- [23] Suzuki T, Shimizu M, Yamauchi Y, et al. Polymethoxyflavones in orange peel extract prevent skeletal muscle damage induced by eccentric exercise in rats. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2021, 85: 440-6
- [24] de Araújo SS, Aidar FJ, Matos DG, et al. Does *Croton argyrophyllus* extract has an effect on muscle damage and lipid peroxidation in rats submitted to high intensity strength exercise? *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16
- [25] Zhu H, Xu W, Wang N, et al. Anti-fatigue effect of *Lepidium meyenii* Walp. (Maca) on preventing mitochondria-mediated muscle damage and oxidative stress *in vivo* and *in vitro*. *Food Funct*, 2021, 12: 3132-41
- [26] Zheng Y, Zhang WC, Wu ZY, et al. Two macamide extracts relieve physical fatigue by attenuating muscle damage in mice. *J Sci Food Agric*, 2019, 99: 1405-12
- [27] Hurst RD, Wells RW, Hurst SM, et al. Blueberry fruit polyphenolics suppress oxidative stress-induced skeletal muscle cell damage *in vitro*. *Mol Nutr Food Res*, 2010, 54: 353-63
- [28] 国旭祺, 王锋, 李辉, 等. 蓝莓提取物抗疲劳作用的实验研究. *营养学报*, 2022, 44: 86-9+94
- [29] Cai RL, Yang MH, Shi Y, et al. Antifatigue activity of phenylethanoid-rich extract from *Cistanche deserticola*. *Phytother Res*, 2010, 24: 313-5
- [30] Kim MC, Lee GH, Kim SJ, et al. Immune-enhancing effect of Danggwibohyeoltang, an extract from *Astragali Radix* and *Angelicae gigantis Radix*, *in vitro* and *in vivo*. *Immunopharmacol Immunotoxicol*, 2012, 34: 66-73
- [31] Chung YH, Park TK, Yim SH, et al. Polysaccharide-rich

- extract of phragmites rhizome attenuates water immersion stress and forced swimming fatigue in rodent animal model. *J Med Food*, 2019, 22: 355-64
- [32] Huang LZ, Huang BK, Liang J, et al. Antifatigue activity of the liposoluble fraction from *Acanthopanax senticosus*. *Phytother Res*, 2011, 25: 940-3
- [33] Wang Y, Zhou W, Lyu C, et al. Metabolomics study on the intervention effect of *Radix Salviae miltiorrhizae* extract in exercise-induced exhaustion rat using gas chromatography coupled to mass spectrometry. *J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, 2021, 1178: 122805
- [34] 石颖, 秦金东. 蛋白和抗氧化剂对离心运动后肌肉功能和疼痛的影响. *基因组学与应用生物学*, 2020, 39: 2266-72
- [35] 陈诚. 连翘提取物可有效缓解力竭运动导致的骨骼肌组织氧化损伤. *基因组学与应用生物学*, 2018, 37: 53-8
- [36] Kim J, Lee KP, Beak S, et al. Effect of black chokeberry on skeletal muscle damage and neuronal cell death. *J Exerc Nutrition Biochem*, 2019, 23: 26-31
- [37] Gomez-Cabrera MC, Carretero A, Millan-Domingo F, et al. Redox-related biomarkers in physical exercise. *Redox Biol*, 2021, 42: 101956
- [38] Powers SK, Jackson MJ. Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. *Physiol Rev*, 2008, 88: 1243-76
- [39] Ceci R, Maldini M, Olson ME, et al. *Moringa oleifera* leaf extract protects C2C12 myotubes against H₂O₂-induced oxidative stress. *Antioxidants (Basel)*, 2022, 11: 1435
- [40] 王铖, 喻忠茹, 李安怡, 等. 芫根提取物对长期运动诱导疲劳小鼠的骨骼肌稳态的保护作用. *食品与发酵工业*, 2023, 49: 44-52
- [41] Dini I, Grumetto L. Recent advances in natural polyphenol research. *Molecules*, 2022, 27: 8777
- [42] Wang X, Qi Y, Zheng H. Dietary polyphenol, gut microbiota, and health benefits. *Antioxidants (Basel)*, 2022, 11: 1212
- [43] Kim J, So WY. Effects of acute grape seed extract supplementation on muscle damage after eccentric exercise: A randomized, controlled clinical trial. *J Exerc Sci Fit*, 2019, 17: 77-9
- [44] Aldret RL, Bellar D. A double-blind, cross-over study to examine the effects of maritime pine extract on exercise performance and postexercise inflammation, oxidative stress, muscle soreness, and damage. *J Diet Suppl*, 2020, 17: 309-20
- [45] Hooper DR, Orange T, Gruber MT, et al. Broad spectrum polyphenol supplementation from tart cherry extract on markers of recovery from intense resistance exercise. *J Int Soc Sports Nutr*, 2021, 18: 47
- [46] Trombold JR, Barnes JN, Critchley L, et al. Ellagitannin consumption improves strength recovery 2-3 d after eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 2010, 42: 493-8
- [47] Lafay S, Jan C, Nardon K, et al. Grape extract improves antioxidant status and physical performance in elite male athletes. *J Sports Sci Med*, 2009, 8: 468-80
- [48] Tsao JP, Bernard JR, Tu TH, et al. Garlic supplementation attenuates cycling exercise-induced oxidative inflammation but fails to improve time trial performance in healthy adults. *J Int Soc Sports Nutr*, 2023, 20: 2206809
- [49] Faria FR, Gomes AC, Antunes A, et al. Effects of turmeric extract supplementation on inflammation and muscle damage after a half-marathon race: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Eur J Appl Physiol*, 2020, 120: 1531-40
- [50] Díaz-Castro J, Guisado R, Kajarabille N, et al. *Phlebodium decumanum* is a natural supplement that ameliorates the oxidative stress and inflammatory signalling induced by strenuous exercise in adult humans. *Eur J Appl Physiol*, 2012, 112: 3119-28
- [51] Romain C, Freitas TT, Martínez-Noguera FJ, et al. Supplementation with a polyphenol-rich extract, TensLess®, attenuates delayed onset muscle soreness and improves muscle recovery from damages after eccentric exercise. *Phytother Res*, 2017, 31: 1739-46
- [52] Martin-Rincon M, Gelabert-Rebato M, Galvan-Alvarez V, et al. Supplementation with a mango leaf extract (Zynamite®) in combination with quercetin attenuates muscle damage and pain and accelerates recovery after strenuous damaging exercise. *Nutrients*, 2020, 12: 614
- [53] Jo E, Bartosh R, Auslander AT, et al. Post-exercise recovery following 30-day supplementation of trans-resveratrol and polyphenol-enriched extracts. *Sports (Basel)*, 2019, 7: 226
- [54] Machado Á S, da Silva W, Souza MA, et al. Green tea extract preserves neuromuscular activation and muscle damage markers in athletes under cumulative fatigue. *Front Physiol*, 2018, 9: 1137
- [55] da Silva W, Machado ÁS, Souza MA, et al. Effect of green tea extract supplementation on exercise-induced delayed onset muscle soreness and muscular damage. *Physiol Behav*, 2018, 194: 77-82
- [56] 黄廷芳. 绿茶提取物对篮球运动员抗疲劳作用研究. *福建茶叶*, 2018, 40: 19
- [57] 鄧季焯. 绿茶提取物对消除无氧性运动疲劳的功效分析. *福建茶叶*, 2017, 39: 235
- [58] Jówko E, Długołęcka B, Makaruk B, et al. The effect of green tea extract supplementation on exercise-induced oxidative stress parameters in male sprinters. *Eur J Nutr*, 2015, 54: 783-91
- [59] Hadi A, Pourmasoumi M, Kafeshani M, et al. The effect of green tea and sour tea (*Hibiscus sabdariffa* L.) supplementation on oxidative stress and muscle damage in athletes. *J Diet Suppl*, 2017, 14: 346-57
- [60] Townsend JR, Stout JR, Jajtner AR, et al. Polyphenol supplementation alters intramuscular apoptotic signaling following acute resistance exercise. *Physiol Rep*, 2018, 6: e13552
- [61] Lima LCR, Barreto RV, Bassan NM, et al. Consumption of an anthocyanin-rich antioxidant juice accelerates recovery of running economy and indirect markers of exercise-induced muscle damage following downhill running. *Nutrients*, 2019, 11: 2274: 2274
- [62] Hunt JEA, Coelho MOC, Buxton S, et al. Consumption of new zealand blackcurrant extract improves recovery from exercise-induced muscle damage in non-resistance trained

- men and women: a double-blind randomised trial. *Nutrients*, 2021, 13: 2875
- [63] Costello R, Willems MET, Myers SD, et al. No effect of new zealand blackcurrant extract on recovery of muscle damage following running a half-marathon. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2020, 30: 287-94
- [64] 王德娴, 胡新月, 翁学煌, 等. 中药皂苷的提取及其在化妆品中的研究进展. *中成药*, 2024, 46: 866-73
- [65] 祝明涛, 孙延平, 王艺萌, 等. 中药皂苷类成分的抗癌作用及机制研究进展. *中国实验方剂学杂志*, 2024, 30: 236-45
- [66] Sánchez-Marzo N, Lozano-Sánchez J, Cádiz-Gurrea ML, et al. Relationships between chemical structure and antioxidant activity of isolated phytochemicals from lemon verbena. *Antioxidants (Basel)*, 2019, 8: 324
- [67] Lee MC, Hsu YJ, Ho CS, et al. Evaluation of the efficacy of supplementation with Planox® lemon verbena extract in improving oxidative stress and muscle damage: a randomized double-blind controlled trial. *Int J Med Sci*, 2021, 18: 2641-52
- [68] Buchwald-Werner S, Naka I, Wilhelm M, et al. Effects of lemon verbena extract (Recoverben®) supplementation on muscle strength and recovery after exhaustive exercise: a randomized, placebo-controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr*, 2018, 15: 5
- [69] Lu Y, Deng B, Xu L, et al. Effects of rhodiola rosea supplementation on exercise and sport: a systematic review. *Front Nutr*, 2022, 9: 856287
- [70] Jówko E, Sadowski J, Długołęcka B, et al. Effects of *Rhodiola rosea* supplementation on mental performance, physical capacity, and oxidative stress biomarkers in healthy men. *J Sport Health Sci*, 2018, 7: 473-80
- [71] Shanely RA, Nieman DC, Zwetsloot KA, et al. Evaluation of *Rhodiola rosea* supplementation on skeletal muscle damage and inflammation in runners following a competitive marathon. *Brain Behav Immun*, 2014, 39: 204-10
- [72] Zha W, Sun Y, Gong W, et al. Ginseng and ginsenosides: therapeutic potential for sarcopenia. *Biomed Pharmacother*, 2022, 156: 113876
- [73] Ratan ZA, Haidere MF, Hong YH, et al. Pharmacological potential of ginseng and its major component ginsenosides. *J Ginseng Res*, 2021, 45: 199-210
- [74] Hong BN, Ji MG, Kang TH. The efficacy of red ginseng in type 1 and type 2 diabetes in animals. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2013, 2013: 593181
- [75] Lin CH, Lin YA, Chen SL, et al. American ginseng attenuates eccentric exercise-induced muscle damage via the modulation of lipid peroxidation and inflammatory adaptation in males. *Nutrients*, 2021, 14: 78
- [76] Jung HL, Kwak HE, Kim SS, et al. Effects of *Panax ginseng* supplementation on muscle damage and inflammation after uphill treadmill running in humans. *Am J Chin Med*, 2011, 39: 441-50
- [77] Ma Y, Guo Z, Wang X. *Tribulus terrestris* extracts alleviate muscle damage and promote anaerobic performance of trained male boxers and its mechanisms: roles of androgen, IGF-1, and IGF binding protein-3. *J Sport Health Sci*, 2017, 6: 474-81
- [78] Burgos J, Viribay A, Calleja-González J, et al. Long-Term combined effects of citrulline and nitrate-rich beetroot extract supplementation on recovery status in trained male triathletes: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Biology (Basel)*, 2022, 11: 75
- [79] Wankhede S, Langade D, Joshi K, et al. Examining the effect of *Withania somnifera* supplementation on muscle strength and recovery: a randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr*, 2015, 12: 43