

中药有效成分干预运动性骨骼肌损伤的作用机制研究进展



张碧峰¹, 刘建军¹, 安文博¹, 元宝华², 刘晓婷²

1. 甘肃中医药大学附属医院骨科 (兰州 730000)

2. 甘肃中医药大学中医临床学院 (兰州 730000)

【摘要】运动性骨骼肌损伤 (exercise-induced skeletal muscle damage, EIMD) 属于运动医学科高发病率疾患之一, 对患者日常生活和工作有较大影响。研究表明, 中药有效成分包括皂苷类、多酚类、多糖类、黄酮类及其他异硫氰酸酯类、苯丙素类、羧酸类等活性物质可抑制实验动物及临床观察患者的炎症反应、氧化应激和线粒体自噬, 促进肌卫星细胞增殖分化, 调控核红细胞 2 相关因子 2 (nuclear factor erythroid-2 related factor 2, Nrf2)/ 血红素氧合酶 1 (heme oxygenase-1, HO-1)、磷脂酰肌醇-3 激酶 (phosphatidylinositol 3-kinase, PI3K)/ 蛋白激酶 B (protein kinase B, PKB/Akt)、磷酸化 38 丝裂原活化蛋白激酶 (phosphorylation mitogen 38-activated protein kinase, p38 MAPK) 等相关信号通路, 促使受损的骨骼肌组织修复并加速修复进程。中药历史悠久, 具有副作用小、多治疗靶点及价格实惠等优势, 在 EIMD 的治疗中具有极大的潜力和应用前景。本文就近年来关于中药有效成分治疗 EIMD 的作用机制做一综述, 以期为 EIMD 治疗和康复提供参考和依据。

【关键词】运动性骨骼肌损伤; 中药有效成分; 氧化应激; 线粒体; 信号通路

Research progress on the mechanism of effective components of traditional Chinese medicine in the intervention of exercise-induced skeletal muscle damage

ZHANG Bifeng¹, LIU Jianjun¹, AN Wenbo¹, YUAN Baohua², LIU Xiaoting²

1. Department of Orthopaedics, Affiliated Hospital of Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China

2. Clinical College of Chinese Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China

Corresponding author: LIU Jianjun, Email: g.sljj@163.com

【Abstract】Exercise-induced skeletal muscle damage (EIMD) is one of the diseases with high incidence in sports medicine, which has a great impact on the daily life and work of patients. Studies have shown that the effective components of traditional Chinese medicine, including saponins, polyphenols, polysaccharides, flavonoids and other active substances, such as isothiocyanates, phenylpropanoids and carboxylic acids, can inhibit inflammation, oxidative stress and mitochondrial autophagy in experimental animals and patients for clinical observation, promote the proliferation and differentiation of muscle satellite cells, regulate nuclear factor erythroid-2 related factor 2 (Nrf2)/heme-oxygenase-1 (HO-1),

DOI: 10.12173/j.issn.1004-4337.202312176

通信作者: 刘建军, 主任医师, 硕士研究生导师, Email: g.sljj@163.com

phosphatidylinositol 3-kinase (PI3K)/protein kinase B (PKB/Akt), phosphorylation mitogen 38-activated protein kinase (p38 MAPK) and other related signaling pathways, and promote the repair of damaged skeletal muscle tissue and speed up the repair process. Traditional Chinese medicine has the characteristics of long history, few side effects, multiple treatment targets and affordable price, so it has great potential and bright application prospect in the treatment of EIMD. This article reviews the mechanism of effective components of traditional Chinese medicine in the treatment of EIMD in recent years, in order to provide reference and basis for the treatment and rehabilitation of EIMD.

【Keywords】 Exercise-induced skeletal muscle damage; Active components of traditional Chinese medicine; Oxidative stress; Mitochondria; Signaling pathway

长时间体力活动或高强度剧烈活动可诱发自由基生成、炎症反应、激素水平波动甚至骨骼肌质膜破坏等一系列生化变化,从而导致运动性骨骼肌损伤(exercise-induced skeletal muscle damage, EIMD)^[1]。EIMD 发生率约占运动医学损伤的 10%~55%^[2],对于体育运动爱好者及专业运动员的成绩表现及肌肉损伤后竞技状态恢复情况具有重要影响,并且严重影响体力劳动者的工作和生活。本文就近年来关于中药有效成分治疗 EIMD 的作用机制做一综述,以期 EIMD 治疗和康复提供参考和依据。

1 EIMD概述

EIMD 是指宏观和微观结构水平上的肌肉纤维发生了物理损伤,涉及肌节、细胞膜和结缔组织,多表现为暂时性肌肉功能损害,如力量产生能力下降、活动度缩小、患肢肿胀、僵硬增加和肌肉疼痛^[3]。影响 EIMD 发生的因素较多,包括离心肌收缩、运动强度、运动期间募集的骨骼肌纤维类型、肌肉收缩速度和运动期间关节活动度等^[4]。

EIMD 在中医学上属于“筋伤”范畴,病机多为筋扭挫致气滞血瘀、脉络不通,治疗以活血化瘀、舒筋活络为主,临床常用消肿止痛、活血化瘀的方药^[5]。中药治疗 EIMD 具有价格实惠、治疗靶点多、疗效明显、副作用小等特点^[6]。研究表明,随着中药成分的分离、提纯及合成等技术的快速发展,中药有效成分逐渐被多靶点、多途径应用,为指导 EIMD 临床用药提供了参考和方向^[7]。

2 中药有效成分促EIMD修复机制及参与调控的通路

皂苷类、多酚类、多糖类、黄酮类等中药有

效成分可以抑制受损骨骼肌组织的炎症及氧化应激(oxidative stress, OS)反应,干预线粒体自噬,促进肌卫星细胞(muscle satellite cells, SCs)增殖分化,调控相关信号通路,缓解骨骼肌受损状态,促进受损骨骼肌组织修复。中药有效成分治疗 EIMD 的概况见表 1。

2.1 多酚类

刺梨果中的有效成分刺梨果粉属多酚类物质,可以提高骨骼肌损伤模型大鼠体内谷胱甘肽(glutathione, GSH)浓度及超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,上调核红细胞 2 相关因子 2(nuclear factor erythroid-2 related factor 2, Nrf2)、血红素氧合酶 1(heme oxygenase-1, HO-1)、抗凋亡因子 B 淋巴细胞瘤-2(B-cell lymphoma-2, Bcl-2)表达,降低 Bcl-2 相关 X 蛋白(Bax)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)水平,通过激活抗氧化基因,减少活性氧(reactive oxygen species, ROS)导致的细胞损伤,调控 Bcl-2 表达以减轻细胞凋亡,使细胞处于稳定状态,提示刺梨果粉可介导 Nrf2 信号通路,有效增加抗氧化能力,保护骨骼肌减缓骨骼肌损伤^[8,32]。

白藜芦醇从中草药虎杖中提取而来,属多酚类化合物。炎症反应可影响受损肌肉的修复进程,超量运动导致的肌肉受损会造成肌原纤维结构破坏、肌纤维节段性坏死和肌膜稳定性降低,中性粒细胞和巨噬细胞等免疫细胞在肌肉组织受损后被激活,巨噬细胞可影响炎症和急性损伤愈合反应的特化细胞^[33-34]。在此过程中,部分巨噬细胞向 M1 型极化吞噬坏死纤维并释放大量促炎细胞因子,激发促肌信号传导和多个细胞内信号级联;另一部分巨噬细胞则向 M2 型极化,减轻炎症反应,避免过度的组织损伤,同时分泌高

水平的胰岛素样生长因子-1 (insulin-like growth factor-1, IGF-1) 支持肌肉修复, 促进骨骼肌细胞增殖分化, 加速肌源分化进程^[35-36]。白藜芦醇可促使肥胖骨骼肌损伤大鼠机体中巨噬细胞向 M2 方向极化, 并降低 M1 促炎细胞因子白细胞介素-1 β (interleukin-1 β , IL-1 β)、白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6) 及肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α) 表达, 抑制炎症并促进受损骨骼肌修复^[9]。

2.2 黄酮类

柚皮素从中药枳实、陈皮中提取而来, 属黄酮类物质。柚皮素可使骨骼肌损伤模型大鼠肌源性分化的标志物 Pax7、肌肉转录调节因子 (myogenic determination, MyoD)、成肌分化抗原 mRNA、M2 型巨噬细胞、SCs 数量增多, 降低 M1 型巨噬细胞、腓肠肌 I 型胶原、III 型胶原水平, M2 型巨噬细胞能够损伤修复并促进 SCs 这一类骨骼肌干细胞增殖分化, 因此, 柚皮素可以通过巨噬细胞发生 M2 型极化从而促进 SCs 增殖分化的方式, 加快损伤骨骼肌的修复过程^[10, 37-38]。

超负荷运动会诱导大量 ROS 产生, ROS 在维持细胞稳态方面起着重要作用, 它们在各种代谢途径中充当细胞信号传导因子, 然而持续高水平的 ROS 可能导致氧化还原平衡向 OS 转变^[39]。辣木叶提取物中多种活性成分属黄酮类, 可降低力竭低氧运动小鼠骨骼肌组织中半胱氨酸天冬氨酸蛋白酶 3 (cysteinyl aspartate specific proteinase-3, caspase-3) 含量, 增加小鼠机体内 GSH、谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 和 SOD 表达水平, 降低 ROS 及 MDA 含量, 增加机体抗氧化和清除自由基的能力, 降低脂质过氧化, 减轻 OS 反应^[11]。毛竹叶中分离的木犀草素-6-C-新橙皮苷可促进糖原合成, 降低肌酸激酶 (creatinase, CK)、乳酸脱氢酶 (lactic dehydrogenase, LDH)、IL-1 β 、TNF- α 、IL-6、MDA、干扰素调节因子 4 (interferon regulatory factor 4, IRF4) 水平, 提高 SOD 活性, 从而增强抗氧化能力, 抑制 OS 反应, 促进损伤肌肉修复再生^[12, 40]。

中药竹叶提取物荳蔻苷可以降低 EIMD 模型大鼠的 IL-1 β 、IL-6、TNF- α 、p-p38MAPK 和 MDA 水平, 降低炎症反应, 保护骨骼肌减轻损伤^[13]。在中药桑葚、山楂、黑枸杞中均发现有

低聚原花青素成分, 可降低 p38 MAPK 和 p-p38 MAPK 表达, 下调 EIMD 模型大鼠血清中 CK、LDH 及 MDA 水平, 改善大鼠骨骼肌超微结构^[14]。连翘提取物可促进 GSH-Px 和 SOD 的活性, 降低 LDH、MDA 表达, 抑制 OS 反应, 增强抗氧化能力以减轻肌肉损伤^[15]。中药葛根有效成分葛根黄酮, 通过降低 EIMD 模型大鼠 CK、LDH、MDA、p38 MAPK 表达, 提高 SOD 和 GSH-Px 活性, 保护受损肌肉^[16]。

EIMD 可导致骨骼肌细胞的线粒体遭到破坏, 引起线粒体应激, 并通过线粒体自噬途径使已经受损的线粒体从健康骨骼肌细胞中消除, 防止受损线粒体聚积, 继而保护细胞能量代谢, 最大限度地减少细胞损伤并保持体内能量代谢平衡^[41]。槲皮素是中药高良姜、桑寄生提取物之一, 可提高肌肉损伤模型 FOXO3a、B 淋巴细胞瘤-2 基因 / 腺病毒 E1B 相互作用蛋白 3 (B-cell lymphoma-2/adenovirus E1 B interacting protein 3, Bnip3) 和腺苷酸活化蛋白激酶 (adenosine monophosphate-activated protein kinase, AMPK) 表达, 抑制 ROS 和 OS 水平, 激活 AMPK 通路, 促进 FOXO3a-Bnip3 介导的线粒体自噬, 进而抑制炎症反应保护受损肌肉组织^[17, 42]。漆黄素又称为非瑟酮, 属于天然黄酮类膳食, 广泛存在于草莓、柿子、黄瓜等水果、蔬菜中。漆黄素可降低力竭运动大鼠骨骼肌血清中 IL-1 β 、IL-6 和 TNF- α 表达水平, 抑制炎症反应, 增加 SOD 和过氧化氢酶 (catalase, CAT) 水平, 随着漆黄素剂量依赖性增加, 下调 MDA 表达, 减轻 OS 反应。同时, 漆黄素可激活骨骼肌线粒体酶的活性, 改善线粒体呼吸功能, 促进线粒体生物发生, 有利于维护骨骼肌健康和线粒体功能的长久发展^[18]。

2.3 皂苷类

运动可以通过自噬溶酶体复合物清除受损的线粒体, 然而长时间高强度运动可能引发骨骼肌线粒体过度自噬^[43]。PTEN 诱导假定激酶 1 (PTEN-induced putative kinase 1, PINK1) / E3 泛素连接酶 (Parkin) 信号通路是最典型的线粒体自噬机制, PINK1 位于线粒体外膜 (outer mitochondrial membrane, OMM) 中, 当 OMM 的完整性受损时, PINK1 大量累积, 继而泛素化直接或间接使 Parkin 蛋白磷酸化, 高度活化的 Parkin 蛋白可以用泛素标记多种 OMM 蛋白, 使它们随

表 1 中药有效成分治疗 EIMD
Table 1. Active components of traditional Chinese medicine in the treatment of EIMD

分类	有效成分	来源	研究对象	剂量/给药方式	作用机制
多酚类	刺梨果粉 ^[8]	刺梨果	骨骼肌损伤模型大鼠	20 mL · kg ⁻¹ /灌胃	GSH, SOD, Nr12, HO-1, Bcl-2 ↑ Bax, MDA ↓
	白藜芦醇 ^[9]	藜芦	肥胖骨骼肌损伤模型大鼠	-	TNF-α, IL-1β, IL-6, M1 巨噬细胞 ↓ M2 巨噬细胞 ↑
黄酮类	柚皮素 ^[10]	枳实、陈皮	肌肉损伤模型大鼠	20 mg · kg ⁻¹ /腹腔注射	干扰素γ, I 型胶原 mRNA, III 型胶原 mRNA, M1 型巨噬细胞 ↓ IL-4, IL-13, 干扰素α, 肌分化抗原 mRNA, M2 型巨噬细胞, SCs ↑
	辣木叶提取物 ^[11]	辣木叶	力竭低氧运动小鼠	1000 mg · kg ⁻¹ · bw, 2000 mg · kg ⁻¹ · bw/灌胃	Caspase-3, ROS, MDA ↓ GSH, GSH-Px, SOD ↑
	木犀草素-6-C-新橙皮苷 ^[12]	毛竹叶	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	25 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 50 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ ,	IL-1β, TNF-α, IL-6, MDA, IRF4, CK, LDH ↓ PTG, GS, SOD ↑
	荜苳甘 ^[13]	竹叶	EIMD 模型大鼠	100 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ /灌胃 20 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 40 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ ,	IL-1β, IL-6, TNF-α, MDA, p-p38MAPK, MDA ↓ SOD, GSH-Px ↑
连翘提取物 ^[15]	低聚原花青 ^[14]	桑葚、山楂、黑枸杞	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	80 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ /灌胃 150 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ /灌胃	p38 MAPK, p-p38 MAPK, CK, MDA, 3-NT, 8-OHdG ↓ T/Cor, SOD ↑
	连翘提取物 ^[15]	连翘	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	40 mg · kg ⁻¹ /灌胃	LDH, MDA ↓ SOD, GSH-Px ↑
	葛根黄酮 ^[16]	葛根	EIMD 模型大鼠	100 mg · kg ⁻¹ , 200 mg · kg ⁻¹ , 400 mg · kg ⁻¹ /灌胃	CK, LDH, MDA, p38 MAPK ↓ SOD, GSH-Px ↑
皂苷类	榭皮素 ^[17]	高良姜、桑寄生	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	100 mg · kg ⁻¹ /灌胃	IL-1β, MDA ↓ AMPK, FOXO3a, Bnip3 ↑
	漆黄素 ^[18]	草莓、柿子、黄爪	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	10 mg · kg ⁻¹ , 20 mg · kg ⁻¹ , 40 mg · kg ⁻¹ /灌胃	IL-1β, IL-6, TNF-α, MDA ↓ SOD, CAT ↑
	红景天提取物 ^[19]	红景天	力竭运动肌肉损伤模型小鼠	1.02 mL · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 3.03 mL · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 6.06 mL · kg ⁻¹ · d ⁻¹ /灌胃	Parkin mRNA, LA, CK, LDH, MDA, PINK1 ↓ SOD, CAT, T-AOC, SDH, ATP酶 ↑

续表1

分类	有效成分	来源	研究对象	剂量/给药方式	作用机制
多糖类	黄芪甲苷 ^[20-21]	黄芪	单侧股四头肌肌肉损伤的成年男性/EIMD模型大鼠	1.746 mg~4.365 mg/口服; 100 mg · kg ⁻¹ ; 200 mg · kg ⁻¹ /灌胃	CK, LDH, Mb, IL-6, TNF-α ↓ IGF-2 ↑ LDH, CK, MDA, 骨骼肌细胞凋亡率, Bax, caspase-3 mRNA ↓ CAT, SOD, Bcl-2 mRNA, PI3Kp85, p-Akt, mTOR ↑
	虎杖苷 ^[22]	虎杖	EIMD模型大鼠	20 mg · kg ⁻¹ /腹腔注射	TNF-α, IL-6, MDA, p-p38 MAPK ↓
	黑灵芝多糖 ^[23]	黑灵芝	力竭运动肌肉损伤模型小鼠	50 mg · kg ⁻¹ · bw, 100 mg · kg ⁻¹ · bw, 200 mg · kg ⁻¹ · bw/灌胃	SOD, CAT, GSH-Px ↑ MDA ↓
	香菇多糖 ^[24]	香菇	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	10 mg · kg ⁻¹ /灌胃	LDH, CK ↓
其他	草珊瑚多糖 ^[25]	草珊瑚	EIMD模型大鼠	210 mg · kg ⁻¹ · bw · d ⁻¹ /灌胃	LDH, CK, TNF-α, IL-1β, IL-18 ↓
	花生低聚肽 ^[26]	花生	力竭运动肌肉损伤模型小鼠	0.25 g · kg ⁻¹ · bw, 0.50 g · kg ⁻¹ · bw, 1.00 g · kg ⁻¹ · bw/灌胃	LDH, CK, MDA ↓ SOD, ATP酶 ↑
	萝卜硫素 ^[27]	西兰花	力竭运动肌肉损伤模型小鼠	20 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 40 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 60 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ /灌胃	PINK1, Parkin, Lc3-II, p62, ubiquitin, PINK1, Parkin mRNA, CK, LA, LDH, MDA ↓ SOD, CAT ↑
	虾青素 ^[28]	牡蛎、紫菜、海藻	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	20 mg · kg ⁻¹ /灌胃	CK, LDH, Bax, MDA ↓ Bcl-2, SOD, Nrf2, HO-1 ↑
多糖类	毛蕊花糖苷 ^[29]	肉苁蓉	力竭运动肌肉损伤模型大鼠	20 mg · kg ⁻¹ · bw, 50 mg · kg ⁻¹ · bw, 100 mg · kg ⁻¹ · bw/灌胃	MDA, CK, AST, ALT ↓ SOD, GSH-Px, CAT ↑
	芥子酸 ^[30]	芥子	EIMD模型大鼠	50 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 100 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 200 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ /灌胃	MDA ↓ HO-1, Nrf2, NQO-1, SOD, CAT ↑
	胡椒碱 ^[31]	胡椒	EIMD模型大鼠	10 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 20 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ , 40 mg · kg ⁻¹ · d ⁻¹ /灌胃	MDA, CK ↓ SOD, CAT, PI3K/PI3K, p-AKT/AKT ↑

后可以与自噬体相关蛋白相互作用,从而介导线粒体自噬的发生^[44-45]。红景天可降低运动肌肉损伤小鼠体内 PINK1、Parkin mRNA 及相关蛋白表达,通过调控 PINK1/Parkin 信号通路抑制线粒体自噬,改善受损肌肉的微观结构,增加 SOD 和 CAT 的活性,减轻 OS 反应,促进肌肉组织修复^[19]。

黄芪甲苷是中药黄芪的主要有效成分,具有抗炎、抗氧化等作用。黄芪甲苷可减少骨骼肌损伤患者血清中 LDH、CK 和肌酸激酶同工酶(creatin kinase-MB, CK-MB)水平,抑制 TNF- α 及 IL-1 表达,释放胰岛素样生长因子-2(insulin-like growth factor-2, IGF-2)水平,缩短 EIMD 炎症水平的持续时间,加速损伤肌肉再生^[20]。PI3K/Akt/mTOR 通路可以加速细胞代谢周期、抑制细胞凋亡和促进细胞迁移,在血管生成、肿瘤迁移、软骨细胞代谢和骨骼肌再生方面具有重要作用^[46]。黄芪甲苷可提高 PI3K、磷酸化蛋白激酶 B(p-Akt)和 mTOR 表达,通过调控 PI3K/Akt/mTOR 通路,抑制骨骼肌细胞凋亡,降低 EIMD 模型大鼠 LDH、CK、MDA、caspase-3 mRNA、Bax 表达水平,提高 CAT、SOD、Bcl-2 mRNA 表达,增强抗氧化能力,减轻 OS 反应,有效保护骨骼肌^[21]。

中药虎杖中含有的皂苷类有效成分虎杖苷,可调控 p38 MAPK 信号通路,降低 EIMD 模型大鼠 TNF- α 、IL-6、MDA、p-p38 MAPK 表达,抑制 OS 及炎症反应^[22]。p38 MAPK 信号通路是一条经典的信号通路,常被炎症和缺氧激活,活化的 p38 进入细胞核或转移到其他部位,进而激活转录因子或细胞蛋白激酶等,协调细胞对多种压力的反应,控制特定细胞的增殖、分化、存活和迁移等^[46]。

2.4 多糖类

黑灵芝中的提取物黑灵芝多糖可以提高骨骼肌损伤机体中的 SOD、CAT 和 GSH-Px 水平,降低 MDA 水平,增加肝糖原和肌糖原含量^[23]。香菇中含有的多糖类物质香菇多糖,可降低骨骼肌损伤模型大鼠 LDH、CK 水平,增强抗氧化及清除自由基的能力,减轻 OS 损伤^[24]。中药草珊瑚具有清热凉血、活血通络的功效,草珊瑚多糖是其主要有效水溶性成分,可降低 EIMD 模型大鼠血清中 LDH、CK、TNF- α 、IL-1 β 、白细胞介素-18(interleukin-18, IL-18)的表达,骨骼肌纤维结构得到一定程度的修复改善,提示草珊瑚多糖可以抑制相关炎症因子的表达,减轻局部骨骼肌疼

痛,对 EIMD 具有良好的改善效果^[25,47]。虽然局部炎症信号的短暂增加被认为是骨骼肌修复和重塑的重要过程,但肌肉炎症的慢性持续可能延长恢复期并导致骨骼肌适应不良,因此,避免长时间肌肉炎症可以缓解肌肉损伤症状,从而及时促进肌肉再生,更快地恢复骨骼肌组织超微结构^[48]。

2.5 其他

因大量运动产生的自由基通过脂质过氧化破坏细胞和线粒体,可抑制三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)的合成,花生低聚肽可缓解这一现象^[49]。MDA 是脂质过氧化过程中导致生物膜系统损伤的关键因素,是评估 OS 损伤的重要指标之一^[50]。花生低聚肽可提高腓肠肌中血清 SOD 水平,促进线粒体中抗氧化酶生成,降低 CK、LDH、MDA 含量,清除体内积累的代谢物质^[26]。萝卜硫素是西兰花的主要有效成分,属异硫氰酸酯类化合物,可明显减轻运动肌肉损伤模型小鼠的骨骼肌损伤,降低小鼠 Lc3-II、p62、ubiquitin、PINK1、Parkin、PINK1 mRNA 和 Parkin mRNA 的表达,通过调控 PINK1/Parkin 信号通路抑制线粒体自噬,减轻骨骼肌损伤并促进其修复再生^[27]。中药牡蛎、紫菜、海藻提取的有效成分虾青素属萜烯类物质,通过调控 Nrf2 信号通路降低骨骼肌损伤模型大鼠 CK、LDH、Bax、MDA 水平,提高 Bcl-2、SOD、Nrf2、HO-1 表达,抑制 OS,减少细胞凋亡,进而保护大鼠骨骼肌^[28]。毛蕊花糖苷是从洋丁香中分离并提取的苯丙素化合物,具有抗氧化和抗疲劳作用,可通过降低骨骼肌损伤模型大鼠 CK、天门冬氨酸氨基转移酶(aspartate aminotransferase, AST)、MDA 和丙氨酸氨基转移酶(alanine aminotransferase, ALT)水平,提高骨骼肌中 SOD 和 CAT 的水平,从而减少 OS 并增加抗氧化能力来减轻骨骼肌损伤^[29]。芥子酸是中药芥子的有效成分,属羧酸类化合物,具有保护肌肉、抗氧化、抗炎等作用,可明显提高 EIMD 模型大鼠体内 HO-1、Nrf2、NADPH 醌氧化还原酶-1(NADPH quinone oxidoreductase-1, NQO-1)蛋白含量,激活 Nrf2/HO-1 信号通路,上调 SOD 和 CAT 水平,抑制 MDA 表达,增强线粒体的保护功能,减轻大鼠骨骼肌的 OS 损伤,有效防治 EIMD^[30]。胡椒碱是主要从胡椒中提取的桂皮酰胺类活性物质,具有抗氧化、抗炎等作用。胡椒碱可提高 EIMD 大鼠体内 SOD 和 CAT 表达,

降低 MDA 水平,抑制 OS 反应,同时刺激 p-PI3K/PI3K 和 p-AKT/AKT 蛋白表达,激活 PI3K/AKT 信号通路,发挥正向调节作用,降低血清 CK 含量,改善肌肉损伤,增强对骨骼肌的保护作用^[31]。

3 小结

EIMD 的相关机制尚未明确,涉及多个生理和病理反应,使得 EIMD 的治疗和快速康复难度加大。EIMD 的治疗关乎人们的日常工作和生活,并对专业运动员的损伤恢复和运动成绩提高有重要影响。研究发现,中药有效成分可以促进受损的骨骼肌组织逐渐修复,抑制炎症反应、OS 反应和线粒体自噬,促进 SCs 增殖分化,调控相关信号通路。经实验或临床应用验证,中药有效成分治疗 EIMD 疗效明确,具有价格实惠、治疗靶点多、疗效明显、副作用小等特点,在后续康复中具有极大的应用价值和潜力。

尽管中药有效成分治疗 EIMD 具有明显优势,但仍有不足之处:目前中药防治 EIMD 的相关研究相对较少,且多集中于体外实验;尽管大多中药有效成分在相关体内外实验中表现出 EIMD 治疗潜力,但其具体治疗靶点尚不明确,作用机制尚未完全揭示,仍需在现有研究基础上进一步探索。

未来可利用生物信息学、网络药理学、分子对接等技术明确中药有效成分的具体靶点和作用机制,将相应研究结果逐步转化为临床治疗手段,补充中药治疗 EIMD 的基础理论,丰富中药治疗 EIMD 相关药剂类型,从而为 EIMD 的临床治疗提供更多理论依据和治疗选择。

参考文献

- Allard NAE, Janssen L, Lagerwaard B, et al. Prolonged moderate-intensity exercise does not increase muscle injury markers in symptomatic or asymptomatic statin users[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2023, 81(14): 1353-1364. DOI: [10.1016/j.jacc.2023.01.043](https://doi.org/10.1016/j.jacc.2023.01.043).
- D'amico A, Cavarretta E, Fossati C, et al. Platelet activation favours NOX2-mediated muscle damage in elite athletes: the role of cocoa-derived polyphenols[J]. *Nutrients*, 2022, 14(8): 1558. DOI: [10.3390/nu14081558](https://doi.org/10.3390/nu14081558).
- 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[J]. *Nutrients*, 2022, 14(9): 1769. DOI: [10.3390/nu14091769](https://doi.org/10.3390/nu14091769).
- Curty VM, Zovico PVC, Salgueiro RB, et al. Blood flow restriction attenuates muscle damage in resistance exercise performed until concentric muscle failure[J]. *Int J Exerc Sci*, 2023, 16(2): 469-481. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37124449/>.
- 黄博, 阮磊, 王兰兰, 等. 推拿治疗骨骼肌损伤的分子生物学机制研究进展[J]. *湖南中医药大学学报*, 2023, 43(4): 753-758. [Huang B, Ruan L, Wang LL, et al. Research progress on the molecular biological mechanism of tuina in treating skeletal muscle injury[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine University of Hunan*, 2023, 43(4): 753-758.] DOI: [10.3969/j.issn.1674-070X.2023.04.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-070X.2023.04.029).
- 华晓琼, 李彦杰, 张淑芹, 等. 中医药调控脊髓损伤后肢体痉挛状态的机制及研究进展[J]. *中国老年学杂志*, 2023, 43(7): 1779-1782. [Hua XQ, Li YJ, Zhang SQ, et al. Mechanism and research progress of traditional Chinese medicine in regulating limb spasticity after spinal cord injury[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2023, 43(7): 1779-1782.] DOI: [10.3969/j.issn.1005-9202.2023.07.061](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9202.2023.07.061).
- 杜海涛, 王琳, 丁洁, 等. 分子对接在中药开发的应用现状与挑战[J/OL]. *中国中药杂志*: 1-11. (2023-10-17) [Du HT, Wang L, Ding J, et al. Application status and challenges of molecular docking in the development of traditional Chinese medicine[J/OL]. *China Journal of Chinese Materia Medica*: 1-11. (2023-10-17)] <https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20231013.703>.
- 张帅军, 唐月梅, 张大鼎, 等. 刺梨果粉缓解过度训练大鼠骨骼肌氧化应激损伤效果的研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(12): 338-346. [Zhang SJ, Tang YM, Zhang DD, et al. Effect of rosa roxburghii tratt powder on alleviating oxidative stress injury of skeletal muscle in overtrained rat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(12): 338-346.] DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2021090352](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090352).
- Shabani M, Sadeghi A, Hosseini H, et al. Resveratrol alleviates obesity-induced skeletal muscle inflammation via decreasing M1 macrophage polarization and increasing the regulatory T cell population[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 3791. DOI: [10.1038/s41598-020-60185-1](https://doi.org/10.1038/s41598-020-60185-1).
- 徐明奎, 许日明, 林业武, 等. 柚皮素调控巨噬细胞极化和肌卫星细胞增殖修复骨骼肌损伤[J]. *中国组织工程研究*, 2023, 27(14): 2133-2138. [Xu MK, Xu RM, Lin YW, et al. Naringenin repairs skeletal muscle injury by regulating

- polarization of macrophages and proliferation of muscle satellite cells[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2023, 27(14): 2133–2138.] <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/ChlQZXJpb2RpY2FsQ0hJTMV3UzIwMjMxMjI2Eg14ZGtmMjAyMzE0MDAzGgh0dXprZmgxMg%3D%3D>.
- 11 常燕云, 朱云峰, 边祥雨, 等. 高原低氧环境下辣木叶提取物对小鼠抗疲劳的作用及其机制 [J/OL]. 营养学报: 1–11. (2024–01–23). [Chang YY, Zhu YF, Bian XY, et al. Anti-fatigue effect of Moringa oleifera leaves extract and mechanism explore under highland hypoxia environment[J/OL]. Acta Nutrimenta Sinica: 1–11. (2024–01–23)] <https://link.cnki.net/urlid/12.1074.r.20240118.1442.002>.
 - 12 夏庚, 韩芸. 毛竹木犀草素–6–C–新橙皮苷通过调节 IRF4PTG 糖原途径促进力竭运动小鼠的糖原合成 [J]. 分子植物育种, 2022, 20(15): 5143–5149. [Xia G, Han Y. Mao bamboo LN promotes glycogen synthesis in exhaustive exercise mice by regulating the IRF4PTG glycogen pathway[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(15): 5143–5149.] DOI: [10.13271/j.mpb.020.005143](https://doi.org/10.13271/j.mpb.020.005143).
 - 13 袁书立. 竹叶黄酮活性物质对运动性骨骼肌损伤大鼠的干预作用及机制 [J]. 分子植物育种, 2023, 21(6): 2045–2050. [Yuan SL. Intervention effect and mechanism of bamboo leaf flavonoids on exercise-induced skeletal muscle injury in rats[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(6): 2045–2050.] DOI: [10.13271/j.mpb.021.002045](https://doi.org/10.13271/j.mpb.021.002045).
 - 14 周海涛, 曹建民, 胡戈, 等. 低聚原花青素对过度训练大鼠骨骼肌损伤的保护作用机制 [J]. 生命科学, 2021, 25(1): 24–30. [Zhou HT, Cao JM, Hu G, et al. Protective effect of oligomerized proanthocyanidins on skeletal muscle injury in overtraining rats[J]. Life Science Research, 2021, 25(1): 24–30.] DOI: [10.16605/j.cnki.1007-7847.2020.01.0112](https://doi.org/10.16605/j.cnki.1007-7847.2020.01.0112).
 - 15 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 [J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(1): 53–58. [Chen C. Effective relief of forsythia suspensa extract in the skeletal muscle oxidative injury by acute exhaustive exercise[J]. Genomics and Applied Biology, 2018, 37(1): 53–58.] DOI: [10.13417/j.gab.037.000053](https://doi.org/10.13417/j.gab.037.000053).
 - 16 朱晓东. 葛根黄酮对大强度运动大鼠骨骼肌氧化应激损伤的保护作用及其机制研究 [J]. 美食研究, 2020, 37(3): 78–82. [Zhu XD. Protective effect of pueraria flavonoids on oxidative stress injury of skeletal muscle in high-intensity exercise rats and its mechanism[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2020, 37(3): 78–82.] DOI: [10.3969/j.issn.1009-4717.2020.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-4717.2020.03.015).
 - 17 马玉珍, 舒田, 潘子君, 等. 槲皮素促进大鼠离心运动后骨骼肌线粒体自噬相关蛋白的表达 [J]. 武警后勤学院学报(医学版), 2018, 27(6): 477–480. [Ma YZ, Shu T, Pan ZJ, et al. Quercetin elevates the expression of mitochondrial autophagy related proteins in rat skeletal muscle after eccentric exercise[J]. Journal of Logistics University of PAP (Medical Sciences), 2018, 27(6): 477–480.] DOI: [10.16548/j.2095-3720.2018.06.004](https://doi.org/10.16548/j.2095-3720.2018.06.004).
 - 18 郭涛, 贾新会. 漆黄素对力竭运动大鼠骨骼肌细胞凋亡和线粒体功能的影响 [J]. 分子植物育种, 2024, 22(4): 1281–1289. [Guo T, Jia XH. Effects of fisetin on apoptosis and mitochondrial function of skeletal muscle cells in exhausted exercise rats[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(4): 1281–1289.] DOI: [10.13271/j.mpb.022.001281](https://doi.org/10.13271/j.mpb.022.001281).
 - 19 Hou Y, Tang Y, Wang X, et al. *Rhodiola Crenulata* ameliorates exhaustive exercise-induced fatigue in mice by suppressing mitophagy in skeletal muscle[J]. Exp Ther Med, 2020, 20(4): 3161–3173. DOI: [10.3892/etm.2020.9072](https://doi.org/10.3892/etm.2020.9072).
 - 20 Yeh TS, Lei TH, Barnes MJ, et al. Astragalosides supplementation enhances intrinsic muscle repair capacity following eccentric exercise-induced injury[J]. Nutrients, 2022, 14(20): 4339. DOI: [10.3390/nu14204339](https://doi.org/10.3390/nu14204339).
 - 21 王冠锦, 赵暘. 黄芪甲苷对力竭运动致大鼠骨骼肌损伤及细胞凋亡的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(1): 80–86. [Wang GJ, Zhao Y. Effects of astragaloside IV on damage and cell apoptosis of skeletal muscle induced by exhaustive exercise in rats[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2023, 38(1): 80–86.] https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=WVDzDAe5jxbjtMRygY5JQ-sjgen--E3dst8ENDfPk6sj_ehaDPJmVaDnordapmouyowFWWCYAxzVZt7Q_pD2jBbn3skSeo6m8Ty4G5o6DBmCaVf0708f3Jt62Rm563KWdQMqLosmcDac22we6QDSA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
 - 22 范龙. 药用植物虎杖的活性物虎杖苷对急性运动过程中骨骼肌炎症反应及氧化应激的影响 [J]. 分子植物育种, 2022, 20(6): 2024–2029. [Fan L. Effects of polydatin from polygonum cuspidatum on skeletal muscle inflammation and oxidative stress during acute exercise[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(6): 2024–2029.] DOI: [10.13271/j.mpb.020.002024](https://doi.org/10.13271/j.mpb.020.002024).

- j.mpb.020.002024.
- 23 万利. 黑灵芝多糖提取物对力竭运动小鼠的抗疲劳作用[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(9): 4339–4344. [Wan L. Anti-fatigue effect of polysaccharide extract from ganoderma atrum on exhausted mice[J]. Genomics and Applied Biology, 2020, 39(9): 4339–4344.] DOI: [10.13417/j.gab.039.004339](https://doi.org/10.13417/j.gab.039.004339).
 - 24 蔡科. 香菇多糖对运动性骨骼肌损伤的恢复作用[J]. 中国食用菌, 2020, 39(8): 68–71. [Cai K. The recovery effect of lentinan on exercise-induced skeletal muscle injury[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(8): 68–71.] DOI: [10.13629/j.cnki.53-1054.2020.08.017](https://doi.org/10.13629/j.cnki.53-1054.2020.08.017).
 - 25 王勇, 侯改霞, 刘艳秋. 草珊瑚粗多糖对运动性骨骼肌损伤(EIMD)的干预效果及机制[J]. 三明学院学报, 2020, 37(2): 1–9. [Wang Y, Hou GX, Liu YQ. Intervention effect and mechanism of polysaccharides of sarcandra glabra on exercise-induced muscle damage[J]. Journal of Sanming University, 2020, 37(2): 1–9.] DOI: [10.14098/j.cn35-1288/z.2020.02.001](https://doi.org/10.14098/j.cn35-1288/z.2020.02.001).
 - 26 Liu R, Li Z, Yu XC, et al. The effects of peanut oligopeptides on exercise-induced fatigue in mice and its underlying mechanism[J]. Nutrients, 2023,15(7):1743. DOI: [10.3390/nu15071743](https://doi.org/10.3390/nu15071743).
 - 27 国春鼎, 杨军霞, 李鹏程. 萝卜硫素通过抑制 PINK1/Parkin 信号通路介导的线粒体自噬减轻力竭运动诱导的骨骼肌损伤和疲劳[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(6): 1158–1165. [Guo CD, Yang JX, Li PC. Reduction effect of sulforaphane on skeletal muscle injury and fatigue induced by exhaustive exercise through inhibiting mitochondrial autophagy mediated by PINK1/Parkin signal pathway[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(6): 1158–1165.] DOI: [10.13590/j.cjfh.2022.06.006](https://doi.org/10.13590/j.cjfh.2022.06.006).
 - 28 牛衍龙, 曹建民, 王祯, 等. 虾青素对大强度运动致大鼠骨骼肌氧化应激损伤及细胞凋亡的影响[J]. 营养学报, 2021, 43(3): 274–278. [Niu YL, Cao JM, Wang Z, et al. Effects of astaxanthin on oxidative stress injury and apoptosis of skeletal muscle induced by high-intensity exercise in rats[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2021, 43(3): 274–278.] DOI: [10.3969/j.issn.0512-7955.2021.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.0512-7955.2021.03.012).
 - 29 丁雨. 毛蕊花糖苷对力竭运动的骨骼肌损伤的保护作用[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(9): 4289–4294. [Ding Y. Protective effect of verbascoside on skeletal muscle injury induced by exhaustive exercise[J]. Genomics and Applied Biology, 2020, 39(9): 4289–4294.] DOI: [10.13417/j.gab.039.004289](https://doi.org/10.13417/j.gab.039.004289).
 - 30 张红波. 植物源性芥子酸对运动性骨骼肌损伤大鼠骨骼肌氧化应激和线粒体功能的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(24): 8227–8233. [Zhang HB. Effects of sinapic acid on oxidative stress and mitochondrial function in skeletal muscles of rats with exercise injury[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21 (24): 8227–8233.] DOI: [10.13271/j.mpb.021.008227](https://doi.org/10.13271/j.mpb.021.008227).
 - 31 刘东彪. 胡椒活性物质胡椒碱通过调节 PI3K/AKT 改善大鼠运动性骨骼肌损伤[J]. 分子植物育种, 2024, 22(5): 1654–1662. [Liu DB. Piperine in pepper, improves exercise-induced skeletal muscle damage in rats by regulating the PI3K/AKT pathway[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(5): 1654–1662.] DOI: [10.13271/j.mpb.022.001654](https://doi.org/10.13271/j.mpb.022.001654).
 - 32 刘军舰, 陈帅, 袁红霞, 等. 基于 Nrf2 信号通路探讨茵陈蒿汤对阻塞性黄疸大鼠肾氧化应激损伤的影响及其作用机制[J]. 临床肝胆病杂志, 2023, 39(5): 1126–1133. [Liu JJ, Chen S, Yuan HX, et al. Effects of Yinchenhao decoction on renal oxidative stress injury in rats with obstructive jaundice and its mechanism of action based on the nuclear factor erythroid 2-related factor 2 signaling pathway[J]. Journal of Clinical Hepatology, 2023, 39(5): 1126–1133.] DOI: [10.3969/j.issn.1001-5256.2023.05.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5256.2023.05.019).
 - 33 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]. J Int Soc Sports Nutr, 2023, 20(1): 2206809. DOI: [10.1080/15502783.2023.2206809](https://doi.org/10.1080/15502783.2023.2206809).
 - 34 Chazaud B. Inflammation and skeletal muscle regeneration: leave it to the macrophages![J]. Trends Immunol, 2020, 41(6): 481–492. DOI: [10.1016/j.it.2020.04.006](https://doi.org/10.1016/j.it.2020.04.006).
 - 35 Dong Y, Zhang X, Miao R, et al. Branched-chain amino acids promotes the repair of exercise-induced muscle damage via enhancing macrophage polarization[J]. Front Physiol, 2022, 13: 1037090. DOI: [10.3389/fphys.2022.1037090](https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1037090).
 - 36 Bernard C, Zavoriti A, Pucelle Q, et al. Role of macrophages during skeletal muscle regeneration and hypertrophy—Implications for immunomodulatory strategies[J]. Physiol Rep, 2022, 10(19): e15480. DOI: [10.14814/phys2.15480](https://doi.org/10.14814/phys2.15480).
 - 37 Romagnoli C, Zonefrati R, Lucatelli E, et al. In vitro effects of PTH (1–84) on human skeletal muscle-derived satellite

- cells[J]. *Biomedicines*, 2023,11(4):1017. DOI: [10.3390/biomedicines11041017](https://doi.org/10.3390/biomedicines11041017).
- 38 杨思梦, 贺庆, 石丽君, 等. Omega-3 多不饱和脂肪酸对运动性骨骼肌损伤修复的促进作用及相关机制研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(21): 359-367. [Yang SM, He Q, Shi LJ, et al. Advances in understanding the role of Omega-3 polyunsaturated fatty acids in promoting recovery from exercise-induced muscle injury and its underlying mechanism[J]. *Food Science*, 2023, 44(21): 359-367.] DOI: [10.7506/spkx1002-6630-20221028-293](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20221028-293).
- 39 Hung CH, Tsai MH, Wang PS, et al. Oxidative stress involves phenotype modulation of morbid soreness symptoms in fibromyalgia[J]. *RMD Open*, 2023, 9(1): e002741. DOI: [10.1136/rmdopen-2022-002741](https://doi.org/10.1136/rmdopen-2022-002741).
- 40 Rahman FA, Quadriatero J. Mitochondrial network remodeling: an important feature of myogenesis and skeletal muscle regeneration[J]. *Cell Mol Life Sci*, 2021, 78(10): 4653-4675. DOI: [10.1007/s00018-021-03807-9](https://doi.org/10.1007/s00018-021-03807-9).
- 41 梁建庆, 张媛媛, 朱向东, 等. 基于 AMPK-FoxO3a 自噬轴探讨葛根苓连汤改善 2 型糖尿病 db/db 小鼠肝脏脂质异位蓄积的机制[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2023, 29(18): 1-7. [Liang JQ, Zhang YY, Zhu XD, et al. Mechanism of Gegen Qinliantang in improving ectopic lipid accumulation in liver of db/db mice with type 2 diabetes mellitus by regulating AMPK-FoxO3a autophagy axis[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2023, 29(18): 1-7.] DOI: [10.13422/j.cnki.syfjx.20231002](https://doi.org/10.13422/j.cnki.syfjx.20231002).
- 42 Chatzinikita E, Maridaki M, Palikaras K, et al. The role of mitophagy in skeletal muscle damage and regeneration[J]. *Cells*, 2023, 12(5): 716. DOI: [10.3390/cells12050716](https://doi.org/10.3390/cells12050716).
- 43 Sekine S. PINK1 import regulation at a crossroad of mitochondrial fate: the molecular mechanisms of PINK1 import[J]. *J Biochem*, 2020, 167(3): 217-224. DOI: [10.1093/jb/mvz069](https://doi.org/10.1093/jb/mvz069).
- 44 张格第, 刘庚鑫, 郭敏, 等. 肾衰方干预 PINK1/Parkin 介导的线粒体自噬治疗 CKD 心肌损伤的作用机制研究[J]. *中国实验动物学报*, 2023, 31(5): 567-575. [Zhang GD, Liu GX, Guo M, et al. Mechanism of Shenshuai recipe in PINK1/Parkin-mediated mitochondrial autophagy for treatment of CKD myocardial injury[J]. *Acta Laboratorium Animalis Scientia Sinica*, 2023, 31(5): 567-575.] DOI: [10.3969/j.issn.1005-4847.2023.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-4847.2023.05.002).
- 45 Yang L, Dong Z, Li S, et al. ESM1 promotes angiogenesis in colorectal cancer by activating PI3K/Akt/mTOR pathway, thus accelerating tumor progression[J]. *Aging (Albany NY)*, 2023, 15(8): 2920-2936. DOI: [10.18632/aging.204559](https://doi.org/10.18632/aging.204559).
- 46 Huang YK, Chang KC, Li CY, et al. AKR1B1 represses glioma cell proliferation through p38 MAPK-mediated Bcl-2/BAX/caspase-3 apoptotic signaling pathways[J]. *Curr Issues Mol Biol*, 2023, 45(4): 3391-3405. DOI: [10.3390/cimb45040222](https://doi.org/10.3390/cimb45040222).
- 47 Fernández-Lázaro D, Mielgo-Ayuso J, Seco Calvo J, et al. Modulation of exercise-induced muscle damage, inflammation, and oxidative markers by curcumin supplementation in a physically active population: a systematic review[J]. *Nutrients*, 2020,12(2): 501. DOI: [10.3390/nu12020501](https://doi.org/10.3390/nu12020501).
- 48 Nosrati-Oskouie M, Aghili-Moghaddam NS, Tavakoli-Rouzbehani OM, et al. Curcumin: a dietary phytochemical for boosting exercise performance and recovery[J]. *Food Sci Nutr*, 2022, 10(11): 3531-3543. DOI: [10.1002/fsn3.2983](https://doi.org/10.1002/fsn3.2983).
- 49 Martínez-Reyes I, Chandel NS. Mitochondrial TCA cycle metabolites control physiology and disease[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 102. DOI: [10.1038/s41467-019-13668-3](https://doi.org/10.1038/s41467-019-13668-3).
- 50 Liu R, Hao YT, Zhu N, et al. The gastroprotective effect of small molecule oligopeptides isolated from walnut (*Juglans regia* L.) against ethanol-induced gastric mucosal injury in rats[J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 1138. DOI: [10.3390/nu12041138](https://doi.org/10.3390/nu12041138).

收稿日期: 2023 年 12 月 28 日 修回日期: 2024 年 02 月 02 日
本文编辑: 王雅馨 黄笛

引用本文: 张碧峰, 刘建军, 安文博, 等. 中药有效成分干预运动性骨骼肌损伤的作用机制研究进展[J]. *数理医药学杂志*, 2024, 37(4): 303-312. DOI: [10.12173/j.issn.1004-4337.202312176](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202312176).
Zhang BF, Liu JJ, An WB, et al. Research progress on the mechanism of effective components of traditional Chinese medicine in the intervention of exercise-induced skeletal muscle damage[J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2024, 37(4): 303-312. DOI: [10.12173/j.issn.1004-4337.202312176](https://doi.org/10.12173/j.issn.1004-4337.202312176).