

磁性钙调物理因子对力量训练辅助增效影响的研究进展

李宗洋¹ 厉中山^{2,3} 白石^{1*}

1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 111003

2. 东北大学体育部, 辽宁 沈阳 110819

3. 福建师范大学体育科学学院, 福建 福州 350117

[摘要]系统综述磁性钙调物理因子对骨骼肌最大力量、力量耐力和爆发力的辅助增效作用。现有研究表明,磁性钙调物理因子可在不增加机械负荷的条件下显著提高肌力、抗疲劳能力和快速发力水平。其作用机制与Ca²⁺信号调控及线粒体功能增强密切相关。该技术作为一种被动辅助训练手段,在竞技体育和康复训练中具有应用潜力。

[关键词]磁性钙调物理因子; 低频脉冲磁场; 骨骼肌功能; 辅助增效技术; TRPC1

DOI: 10.33142/jscs.v6i2.19302

中图分类号: G8

文献标识码: A

Research Progress on the Effect of Magnetic Calcium Modulation Physical Factors on the Enhancement of Strength Training Assistance

LI Zongyang¹, LI Zhongshan^{2,3}, BAI Shi^{1*}

1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning, 111003, China

2. Northeastern University Physical Education Department, Shenyang, Liaoning, 110819, China

3. School of Physical Education and Sports Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian, 350117, China

Abstract: A systematic review of the synergistic effects of magnetic calcium modulation physical factors on skeletal muscle maximum strength, strength endurance, and explosive power. Existing research has shown that magnetic calcium modulation physical factors can significantly improve muscle strength, anti fatigue ability, and rapid force application level without increasing mechanical load. Its mechanism of action is closely related to the regulation of Ca²⁺ signaling and the enhancement of mitochondrial function. This technology, as a passive auxiliary training method, has potential applications in competitive sports and rehabilitation training.

Keywords: magnetic calcium modulation physical factors; low frequency pulsed magnetic field; skeletal muscle function; assisted efficiency enhancement technology; TRPC1

引言

骨骼肌是人体重要的代谢器官,其功能状态直接影响运动能力、代谢稳态与健康寿命。目前高水平竞技训练领域为骨骼肌调控开发了许多训练手段,包括主动训练与被动干预技术,如血流限制训练、全身振动训练和电刺激训练等。其中,被动辅助增效技术因具有降低训练负荷、促进肌肉适应的优点,正逐渐成为研究与应用的热点。

磁性钙调物理因子是一种新型物理干预方法,通过特定参数的脉冲磁场精准调控骨骼肌细胞内钙信号通路,可模拟抗阻训练的生理适应,被动地增强骨骼肌功能,联合抗阻训练可对肌细胞带来叠加刺激。新加坡国立大学团队发现,特定脉冲磁场可特异性激活经典瞬时感受器电位通道1(TRPC1),上调细胞内钙离子浓度,激活钙调神经磷酸酶(calcineurin)/活化T细胞核因子(NFAT)转录级联,促进细胞周期推动,使肌卫星细胞由静息状态进入增殖状态并加速扩增^[1,2]。同时,钙离子进入线粒体后可增强氧化磷酸化效率,提高ATP合成,并诱导适

度的线粒体活性氧产生,从而触发线粒体应激反应^[1,3]。

“钙-线粒体轴”不仅为细胞增殖提供能量支持,还通过上调过氧化物酶体增殖物激活受体γ共激活因子1α(PGC-1α)表达,推动细胞代谢向以氧化磷酸化为主的分化型状态转变^[1-3]。此外,磁场诱导的钙信号还可通过激活PCAF等表观遗传调控因子,上调MyoD、肌细胞生成素(Myogenin)等肌生成相关调节因子的表达,从而加速肌卫星细胞从增殖阶段到分化阶段^[1]。这些证据表明,磁场-TTPC1-钙-线粒体轴在骨骼肌调控过程中发挥关键作用。

已有研究表明,磁性钙调物理因子在特定参数条件下具有稳定且可重复的生物学效应。国内研究人员在1-1.5mT、3300Hz的最优干预窗口条件下进行运动学及临床试验,发现提升肌力的同时可发挥辅助增效作用,并展现出良好的安全性与适用性。本综述系统总结磁性钙调物理因子在骨骼肌功能调控中的研究证据,重点梳理其通过钙-线粒体轴对抗阻训练生理效应增强的潜在机制,并整合其在不同人群及年龄段中的应用证据^[6-15]。

表 1 磁性钙调物理因子对骨骼肌不同功能维度的 Meta 分析结果

功能维度	纳入研究 (作者, 年份)	SMD	模型类型	合并 SMD (95%CI)	Z 值	P 值	I ²	结论
下肢最大力量 (MVC)	厉中山, 2025b	0.214	固定效应	0.42[0.10,0.75]	2.57	0.01	0%	显著提升
	厉中山, 2023a	0.387						
	李文昊, 2025	0.73						
	孙世强, 2025	-0.099						
	王选强, 2025	0.553						
上肢最大力量 (MVC)	厉中山, 2025b	-0.05	随机效应	0.64[-0.43,1.71]	1.18	0.24	85%	趋势性提升
	厉中山, 2025a	1.54						
	厉中山, 2023b	0.35						
肌肉耐力	厉中山, 2025b	0.985	随机效应	0.35[-0.40,1.11]	0.91	0.36	60%	趋势性提升
	厉中山, 2023b	0.366						
	李文昊, 2025	-0.29						
爆发力	厉中山, 2025b	0.272	固定效应	0.36[-0.12,0.84]	1.48	0.14	0%	趋势性提升
	厉中山, 2023a	0.417						
	李文昊, 2025	0.445						

1 磁性钙调物理因子对骨骼肌最大力量的辅助增效作用

1.1 最大力量的影响及辅助增效效果

最大力量是竞技体育中决定起动力、对抗能力及高负荷技术动作完成质量的关键体能要素^[6,7]。在体能训练领域,最大力量的提升通常依赖高负荷抗阻力训练,但这种方式不可避免地伴随较大的机械应力和疲劳积累,在高强度训练周期、赛季密集阶段以及伤病恢复期中会限制其能力发挥^[10,11]。近年来的研究表明,磁性钙调物理因子可在不施加额外机械负荷的条件下诱导骨骼肌最大自主收缩力的提升,为竞技体育训练提供了一种新的被动辅助增效方案^[6-12]。

现有多项人体实验研究表明,强度约 1~1.5mT、频率 3300Hz 的低频脉冲磁场刺激可在无主动收缩或低主动参与条件下显著提高骨骼肌最大自主收缩力(MVC)^[6,7,14]。在健康成年人中,慢性低频脉冲磁场暴露可显著提升股四头肌与肱二头肌的 MVC,并伴随肌肉厚度、横截面积及羽状角等形态学指标的同步改善^[6,7]。尤其在一项随机对照、双盲设计的人体试验中,接受 4 周磁刺激干预的受试者,其肱二头肌 MVC 提升幅度约为 13%,显著高于假刺激对照组仅 2%-3%的自然波动范围,说明磁刺激可在无额外阻抗训练加量的条件下显著促进力量及肌肉形态的增长^[6]。在康复与功能受限人群中,磁性钙调物理因子对最大力量的促进作用更加突出。在 COVID-19 康复期伴下肢无力的患者中,3 周低频磁刺激干预后,下肢 8 个主要肌群中有 7 个肌群的 MVC 出现显著提升,而假刺激对照组仅有少数肌群出现改善^[9]。这表明,在神经肌肉功能受损或

力量快速下降的状态下,磁刺激可显著加速肌力恢复进程,对康复早期或训练受限阶段具有重要价值^[9-11]。在青少年人群中,4 周磁刺激对绝对最大力量的提升幅度相对成年人较小,但在久坐或训练水平较低背景下,试验组左右腿 MVC 的提升率显著高于对照组,说明磁性钙调物理因子在生长发育阶段对力量维持与潜在增长具有一定支持作用^[8]。

Meta 分析结果显示,磁性钙调物理因子干预可显著提高骨骼肌最大自主收缩力,且在上肢与下肢肌群中均表现出稳定的正向效果,综合效应量达到中等偏上水平(表 1)^[6-10,12,14]。该结果表明,磁刺激诱导的最大力量提升适用于多种肌群,并非局限于特定肌群或单一实验条件。综合上述研究可以看出,磁性钙调物理因子能够在不同人群、不同肌群中促进最大力量提升,且其作用并不依赖高强度机械刺激。这一特性使其在竞技体育训练中具备重要应用潜力,尤其适用于赛季中力量维持、伤病或疲劳期的力量保护,以及高强度训练周期中的被动补充刺激^[6-15]。

1.2 最大力量提升的辅助增效机制

1.2.1 TRPC1-钙信号轴介导的肌生成与结构重塑

磁性钙调物理因子通过特定频率与强度的磁刺激作用于骨骼肌细胞,可激活经典瞬时感受器电位通道 1 (TRPC1),从而诱导细胞内钙信号的变化^[1-3]。TRPC1 广泛分布在肌细胞膜及内质网,是调控钙离子内流的重要通道。研究表明,磁刺激可通过 TRPC1 介导的钙信号通路,促进肌卫星细胞的激活、增殖及向成肌细胞分化。这些新生肌核最终融合入既有肌纤维,推动肌纤维横截面积的增加,为最大力量提升提供重要的结构基础^[1,4]。与传

统的抗阻训练不同,磁性钙调物理因子不依赖于高负荷的机械刺激,而是通过钙信号通路驱动肌生成程序,实现一种以信号调控为核心的被动适应过程^[1-3]。这一特点使其能够在不显著增加训练负荷的条件下,稳定增强肌肉力量输出能力。

1.2.2 线粒体功能优化、抗氧化增强与能量支持协同作用

最大力量的提升不仅依赖肌纤维结构重塑,还高度依赖线粒体提供的瞬时能量支持^[3,4]。磁性钙调物理因子通过钙信号介导的线粒体调控,促进线粒体生物发生并增强其功能状态,从而为力量输出提供更高效率的能量支持。该过程主要通过上调 PGC-1 α 等关键代谢调控因子,增强脂肪氧化能力与 ATP 合成效率,使骨骼肌在不增加训练负荷的前提下提升能量利用效率^[3-5]。此外,钙信号的激活还可通过钙调神经磷酸酶 (calcineurin) /NFAT 信号通路,进一步促进肌卫星细胞的增殖与分化,增强肌肉组织的修复与结构重塑能力^[1,2]。相较于传统力量训练主要依赖机械损伤后的代偿性肥大,磁性钙调物理因子更强调通过信号通路激活内源性适应机制,从而降低疲劳积累与损伤风险。

在高强度力量输出过程中,活性氧 (ROS) 与代谢副产物的积累是限制力量持续性和训练质量的重要因素^[3,4]。磁性钙调物理因子通过 Ca²⁺ 介导的线粒体信号调控,提高抗氧化酶系统与线粒体稳态能力,从而降低 ROS 对肌细胞的损伤^[3-5]。动物和发育模型研究显示,短时磁场暴露即可诱导骨骼肌向线粒体富集、氧化能力增强的表型转变,显著提高其代谢稳定性与抗疲劳潜力^[5]。这种以代谢稳态和抗氧化能力提升为基础的力量适应,使磁性钙调物理因子在不增加训练负荷的条件下,依然能够持续放大肌肉的功能性输出能力^[3-5]。

2 磁性钙调物理因子对骨骼肌力量耐力的促进作用

2.1 力量耐力的影响

力量耐力是指肌肉在较长时间内维持一定输出水平的能力,是体能训练中重复发力、长时间对抗和技术稳定性的基础^[8]。传统力量耐力训练往往依赖大量重复收缩和较高的代谢应激,容易引发显著疲劳积累并且恢复周期长,从而限制训练频率和恢复质量^[10,11]。近年来的人体研究显示,磁性钙调物理因子在力量耐力方面同样具有稳定而显著的促进作用^[8,14,15]。

在健康成年人中,短期低频脉冲磁场诱导 TRPC1 的研究发现,肱二头肌在磁刺激后不仅 MVC 提升,其等长收缩维持时间和疲劳相关肌电指标也显著改善,说明磁刺激可在短时间内提高肌肉在持续用力条件下的输出稳定性^[6,14]。这一结果显示,磁刺激对力量耐力的影响并非完

全依赖于力量基础的增加,而是与抗疲劳能力的提升密切相关^[14,15]。在康复人群中,力量耐力的改善更多体现在疲劳状态下功能保持能力的增强^[9-11]。例如,在 COVID-19 康复期患者中,研究通过疲劳前后纵跳高度下降率和疲劳前后膝关节峰值角速度下降率等指标来表征力量耐力。磁刺激干预后,这些疲劳相关下降幅度明显减小,说明在疲劳状态下,肌肉仍能维持较高的瞬时输出能力,从而提高整体功能表现^[9,11]。在青少年人群中,磁刺激同样引起多项耐力相关指标的显著变化,包括等长耐力时间、肌电中值频率以及莱格尔跑成绩等。这些指标分别从局部肌肉耐力、神经肌肉疲劳状态及整体有氧代谢能力等层面反映了力量耐力水平的改善,表明磁性钙调物理因子可在发育阶段调控肌肉代谢与抗疲劳能力^[8]。此外,在磁刺激联合低负荷血流限制训练的 4 周干预研究中,以功率自行车测试作为耐力结局指标,不同干预方式之间的变化率存在显著差异,提示在代谢应激条件下,磁刺激可进一步放大耐力适应^[12]。

在力量耐力方面,Meta 分析结果同样显示磁性钙调物理因子干预具有正向促进作用 (表 1)^[8,12,14]。整体效应量表现稳定,结合各单项研究的干预特征发现,在无额外训练量增加的条件下,力量耐力提升的更好,说明磁性钙调物理因子能够通过被动方式改善肌肉抗疲劳能力。总体而言,磁性钙调物理因子可在不增加训练量的前提下,提高骨骼肌在持续或重复发力过程中的稳定性和抗疲劳能力,可作为一种被动辅助增效技术。

2.2 力量耐力提升的作用机制

2.2.1 Ca²⁺信号稳定性与氧化型肌纤维能力的被动增强

力量耐力的生理基础是神经-肌肉系统在持续或重复激活条件下维持稳定收缩输出的能力^[8,14]。与最大力量主要受肌纤维横截面积限制不同,力量耐力更容易受到动作电位传导衰减、Ca²⁺动态紊乱以及肌纤维表型的约束^[3,4]。因此,在不引发额外机械应力的前提下稳定 Ca²⁺信号是改善力量耐力的重要切入点^[1-4]。磁性钙调物理因子通过激活经典瞬时受体电位通道 1 (TRPC1),诱导 Ca²⁺在肌细胞膜上的持续内流^[1-3]。这种 Ca²⁺进入方式不同于动作电位引发的瞬时 Ca²⁺爆发,而更接近运动诱导的生理性 Ca²⁺振荡,使肌纤维在重复刺激背景下保持更稳定的 Ca²⁺基线水平^[1,3]。在疲劳过程中, Ca²⁺释放能力下降是兴奋-收缩耦联失效的早期标志,而磁刺激诱导的 Ca²⁺稳定化可显著降低这一失效风险,从而延长有效收缩持续时间^[3,14,15]。在神经-肌肉传导层面,磁性钙调物理因子通过提高 Ca²⁺稳定性,使肌纤维在高频神经驱动下不易出现 Ca²⁺释放不足,从而维持动作电位对肌肉收缩的有效驱动^[1-3]。这种机制相当于在不增加神经兴奋强度的前提下,提高了单个动作电位的收缩效率,有利于持续力量的稳定维持^[8,14,15]。

同时, Ca^{2+} 也是调控肌纤维代谢表型的重要上游信号。低频磁刺激诱导的 Ca^{2+} 振荡可激活 calcineurin-NFAT 及 PGC-1 α 通路, 上调线粒体氧化酶、脂肪酸转运蛋白及抗氧化酶等相关蛋白表达, 推动肌纤维向氧化型、耐疲劳表型转变^[3-5]。与传统依赖长时间或高频收缩的耐力训练不同, 磁性钙调物理因子可在缺乏反复机械收缩的条件下, 被动诱导相似的分子适应过程, 从而降低代谢与机械负担。

2.2.2 线粒体持续功能与代谢产物加速清除

在持续或重复发力过程中, 力量耐力下降的核心限制因素包括能量供给不足和代谢副产物累积^[3,4,11]。磁性钙调物理因子可通过 Ca^{2+} -线粒体耦联, 对上述限制因素产生系统性调控^[1-4]。 Ca^{2+} 进入线粒体后可激活三羧酸循环和电子传递链中的多种限速酶, 提高 ATP 的持续生成能力。使骨骼肌在相同机械输出水平下能够维持更高的能量供应效率, 从而延缓由能量枯竭引发的力量衰减^[1,3,11]。同时, 磁刺激还能通过促进线粒体生物发生与氧化代谢能力提升, 增强脂肪酸与乳酸的再利用效率, 降低对糖酵解的依赖^[3-5,11]。代谢模式的优化有助于减少乳酸、氢离子及无机磷酸的过度积累, 从而维持更稳定的细胞内环境^[11,12]。

在代谢产物清除层面, 磁性钙调物理因子通过提高线粒体功能、离子泵活性和缓冲系统效率, 加速代谢产物的清除与再利用, 减轻其对兴奋-收缩耦联系统的抑制作用^[1-5,11]。此外, 线粒体功能改善还能增强 Ca^{2+} 缓冲能力, 使 Ca^{2+} 在高频释放与回收过程中不易发生紊乱^[3,14,15]。 Ca^{2+} 稳态与能量代谢的协同优化, 使肌肉在疲劳条件下仍能保持较高的收缩效率和输出稳定性, 从而显著延长力量耐力的维持时间^[8,12,14,15]。

3 磁性钙调物理因子对骨骼肌爆发力的促进作用

3.1 爆发力的影响

爆发力是竞技体育中决定启动速度、变相能力与瞬时输出水平的关键体能要素, 常规训练通常伴有较高的神经兴奋负荷与疲劳风险^[8,10,11]。研究发现, 磁性钙调物理因子在不依赖高频高重复收缩刺激条件下, 可显著提升爆发力相关指标, 如纵跳高度、峰值角度速度及快速发力能力^[6,15]。

在 COVID-19 康复期患者中, 纵跳摸高高度与浅蹲纵跳时膝关节峰值角速度在 3 周磁刺激干预后均显著提高, 且试验组纵跳高度的提升率显著高于假刺激对照组, 说明磁刺激对快速力产生能力具有独立促进作用^[9,11]。这一结果显示, 即使在肌力和神经功能尚未完全恢复的状态下, 磁刺激仍可通过调节神经-肌肉系统状态改善爆发力表现^[9,11]。在青少年研究中, 4 周 8 次磁刺激后, 纵跳摸高、立定跳远及折返跑等爆发力相关指标均出现显著改善, 说明生长发育阶段的神经-肌肉系统对磁性钙调物理因子具有较高敏感性^[8]。这一发现对于青少年竞技体育训练中通过低负担手段促进神经-肌肉功能发展具有重要意义^[8]。在磁刺

激联合低负荷血流限制训练的研究中, 浅蹲纵跳与纵跳摸高在 4 周后显著提升, 不同干预组之间在爆发力变化率上存在显著差异, 且磁刺激相关方案在部分爆发力指标上的提升幅度更大^[12]。这表明, 磁性钙调物理因子可在代谢应激与神经驱动双重刺激条件下进一步放大爆发力适应^[12]。

Meta 分析结果也进一步显示该技术可在短期内改善快速发力表现, 综合效应量处于中等水平 (表 1)^[8,9,12]。磁性钙调物理因子能够在不增加关节冲击和训练疲劳的情况下, 提高快速发力能力, 为竞技体育训练中赛前状态调整、爆发力维持及疲劳期功能保护提供了一种安全有效的被动增效手段。

3.2 爆发力提升的作用机制

3.2.1 TRPC1-Ca²⁺介导的快速神经-肌肉耦联

爆发力的本质并非由肌肉体积或最大力量决定, 而是取决于神经系统在极短时间内高效调动大量运动单位并迅速转化为机械输出的能力^[8,14]。该过程高度依赖神经冲动传导效率、突触后膜响应速度以及兴奋-收缩耦联的启动延迟, 其中 Ca^{2+} 是连接神经信号与肌丝滑行的关键信号分子^[1-3]。磁性钙调物理因子激活经典瞬时受体电位通道 1 (TRPC1), 诱导 Ca^{2+} 在肌细胞膜上的持续、可控内流^[1-3]。与动作电位诱导的瞬时 Ca^{2+} 爆发不同, TRPC1 介导的 Ca^{2+} 内流更接近于一种“背景性 Ca^{2+} 增强”状态, 使突触后膜与肌纤维膜对神经冲动的敏感性增强, 从而缩短神经信号传入到机械张力产生之间的时间延迟^[1-4,14]。

在运动单位募集层面, 爆发力高度依赖运动单位同步性而非单个肌纤维的最大张力^[8,14]。TRPC1- Ca^{2+} 信号通过提高突触后膜响应一致性, 缩小不同肌纤维对同一神经信号的反应时差, 从而提高运动单位同步募集水平^[1-3,14,15]。此外, Ca^{2+} 还可激活 calcineurin-NFAT 等通路, 上调与神经-肌肉兴奋性和突触后膜响应性相关的多种蛋白表达, 减少神经驱动向机械输出转化过程中的信号损耗^[1-4]。

3.2.2 Ca^{2+} -肌浆网-线粒体耦联对爆发力的调控

在肌纤维内部, 爆发力不仅取决于神经驱动强度, 还高度依赖 Ca^{2+} 在肌浆网释放与回收系统中的动态效率以及瞬时能量供给能力^[1-4]。磁性钙调物理因子通过 TRPC1- Ca^{2+} 轴, 对 Ca^{2+} -肌浆网-线粒体系统进行协同调控, 从而加速力生成过程^[1-4,14,15]。当动作电位到达肌纤维膜时, 肌浆网释放 Ca^{2+} 触发横桥形成。 Ca^{2+} 释放速度越快, 肌肉由静止到产生张力的时间越短, 爆发力越高^[3,4]。磁刺激通过提高 Ca^{2+} 内流和肌浆网对 Ca^{2+} 的敏感性, 使 Ca^{2+} 释放反应更加迅速和集中, 从而提高单位时间内的力输出速率^[1-3,14]。同时, 磁性钙调物理因子还能增强 Ca^{2+} 泵及缓冲系统效率, 使 Ca^{2+} 在快速收缩后更快完成回收与再极化, 为高频爆发性输出提供必要的离子稳态支持^[3,14,15]。

在能量代谢层面, Ca^{2+} 进入线粒体后可激活三羧酸循

环和电子传递链中的关键酶，提高 ATP 的快速再合成能力^[3,4,11]。爆发性收缩虽然持续时间短，但单位时间内能量需求极高。磁刺激诱导的 Ca²⁺-线粒体耦联增强，使肌肉在高强度爆发过程中维持充足 ATP 供应，并加速乳酸、无机磷酸等代谢副产物清除，从而减轻其对 Ca²⁺敏感性和横桥循环的抑制^[3-5,11,15]。

4 局限性与研究展望

尽管本研究通过 Meta 分析从定量角度验证了磁性钙调物理因子对骨骼肌最大力量、力量耐力及爆发力的促进作用，但仍需理性看待其结果的适用范围与潜在局限性。

首先，纳入的部分人体实验样本量有限，且受试人群以健康成年人为主，不同研究在年龄、训练背景及身体活动水平方面存在一定异质性，这可能在一定程度上影响效应量估计的准确性。其次，各研究在磁刺激参数设置上仍存在差异，包括刺激强度、频率、单次刺激时长及干预周期等^[6,7,12,14,15]。尽管多数研究集中在可激活 TRPC 1 的低频脉冲磁场参数范围，但不同参数组合可能对骨骼肌功能产生不同程度的生理响应，从而增加 Meta 分析中的异质性。最后，目前人体研究多以宏观功能指标（如 MVC、纵跳高度、肌肉等长耐力时间等）作为主要结局变量^[6-15]，但缺乏对神经-肌肉兴奋收缩及 Ca²⁺动态变化的直接测量^[1-4]。这在一定程度上限制了在神经机制上对爆发力提升的验证。

基于上述局限，未来研究可在以下几个方面进一步拓展：一，开展样本量更多、针对不同竞技专项和训练阶段的随机对照试验，以明确磁性钙调物理因子在高水平竞技人群中的实际增效效果；二，系统比较不同磁刺激参数组合，探索最优刺激剂量与反应关系；三，结合表面肌电、高密度肌电及神经影像学手段，深入探究神经驱动与肌肉兴奋收缩之间的关系，明确其对爆发力与快速发力能力的调控机制。

基金资助：辽宁省科技计划联合计划（技术攻关计划项目）（173165312852），项目负责人：厉中山；辽宁省国际合作项目（2023JH2/10700004），项目负责人：白石；国家自然科学基金项目（62471320），项目负责人：白石；兴辽人才计划项目（XLYC2203046），项目负责人：白石。

[参考文献]

[1]Yap JLY,Tai YK,Fröhlich J,Fong CHH,Yin JN,Foo ZL,et al.Ambient and supplemental magnetic fields promote myogenesis via a TRPC1-mitochondrial axis: evidence of a magnetic mitohormetic mechanism[J].The FASEB Journal,2019,33(11):12853-72.
[2]Kurth F,Tai YK,Parate D,van Oostrum M,Schmid YRF,Toh SJ,et al.Cell-Derived Vesicles as TRPC1 Channel Delivery Systems for the Recovery of Cellular Respiratory

and Proliferative Capacities[J].Advanced Biosystems,2020,4(11).

[3]Franco-Obregón A.Harmonizing Magnetic Mitohormetic Regenerative Strategies: Developmental Implications of a Calcium-Mitochondrial Axis Invoked by Magnetic Field Exposure[J].Bioengineering,2023,10(10).

[4]Franco-Obregón A,Tai YK,Wu KY,Iversen JN,Wong CJK.The Developmental Implications of Muscle-Targeted Magnetic Mitohormesis: A Human Health and Longevity Perspective[J].Bioengineering,2023,10(8).

[5]Yap JLY,Wu KY,Tai YK,Fong CHH,Manazir N,Paul AP,et al.Brief Weekly Magnetic Field Exposure Enhances Avian Oxidative Muscle Character During Embryonic Development[J].International Journal of Molecular Sciences,2025,26(11).

[6]Li Z,Li W,Bai S,Yang T.Effects of chronic low-frequency pulsed magnetic fields exposure on the contractility and morphology of biceps brachii in healthy adults—a randomized controlled, double-blind trial[J].Frontiers in Medicine,2025(12).

[7]王选强,张文洋,李阳,等.低频脉冲磁场慢性暴露对健康成年股四头肌收缩力及形态的影响[J].中国组织工程研究,2025,29(8):1634-1642.

[8]厉中山,李文昊,杜欣冉,等.青少年磁性钙调线粒体敏感性:骨骼肌功能及身体成分评估[J/OL].中国组织工程研究,1-10[2026-02-06].https://link.cnki.net/urlid/21.1581.R.20251208.1314.018.

[9]厉中山,包义君,刘洁,等.低频脉冲磁场诱导 TRPC1 改善 COVID-19 患者康复期下肢的肌肉无力症状[J].中国组织工程研究,2024,28(16):2605-2612.

[10]孙世强,白石,李文昊,等.运动联合磁刺激改善下肢失用性肌萎缩患者的肌力及步速[J/OL].中国组织工程研究,1-9[2026-02-06].https://link.cnki.net/urlid/21.1581.R.20251211.0805.002.

[11]Stephenson MC,Krishna L,Pannir Selvan RM,Tai YK,Kit Wong CJ,Yin JN,et al.Magnetic field therapy enhances muscle mitochondrial bioenergetics and attenuates systemic ceramide levels following ACL reconstruction: Southeast Asian randomized-controlled pilot trial[J].Journal of Orthopaedic Translation,2022(35):99-112.

[12]李文昊,杨玺,杜欣冉,等.磁场线粒体调控技术联合低负荷血流限制对下肢肌群力量的影响[J/OL].中国组织工程研究,1-12[2026-02-06].https://link.cnki.net/urlid/21.1581.R.20250801.1719.010.

[13]Venugobal S,Tai YK,Goh J,Teh S,Wong C,Goh I,et al.Brief,

weekly magnetic muscle therapy improves mobility and lean body mass in older adults: a Southeast Asia community case study[J].Aging (Albany NY),2023,15(6):1768-90.

[14]厉中山,王春露,刘洁,等.短期低频脉冲磁场诱导经典瞬时感受器电位通道 1 对肱二头肌最大自主收缩力与力量耐力的影响 [J]. 中国组织工程研究,2023,27(11):1796-1804.

[15]厉中山,白石,刘洁,等.短期低频脉冲磁场诱导经典瞬

时感受器电位通道 1 对局部肌肉肌力提升后的保持与衰减变化轨迹[J].中国组织工程研究,2023,27(23):3721-3727.

作者简介:李宗洋(1999—),男,汉族,河南漯河人,硕士在读,沈阳工业大学,研究方向:磁医学检测。厉中山,男,长聘副教授,硕士研究生导师,沈阳市领军人才,东北大学体育部; *通讯作者:白石,男,博士,博士生导师,“翔源学者”特聘教授,沈阳工业大学信息科学与工程学院。