



激活后增强效应与激活后表现提升: 重塑定义与认知 Post-activation Potentiation and Post-activation Performance Enhancement: Reshaping Definitions and Perceptions

徐 恺, 唐文静, 路 恒, 王 然*

XU Kai, TANG Wenjing, LU Heng, WANG Ran*

摘 要: 激活后增强(post-activation potentiation, PAP)效应是指最大或接近最大强度自主收缩后颤搐力(矩)的急性增强,激活后表现提升(post-activation performance enhancement, PAPE)则尤指运动表现的急性提升。然而,两种术语的定义与应用存在混淆。研究通过系统检索和文献分析发现,术语PAP在发展的历史中逐渐从宽泛的概念转变为具体、明确的术语。目前,PAP效应的主要机制被认为是肌球蛋白调节轻链磷酸化,这可能会提升运动表现相关测试的发力速率和向心负荷-速度关系。然而,在纳入的32篇同时报告PAP效应和PAPE的研究中,50%的研究未同时观察到PAP效应和PAPE,9.4%的研究在PAP效应无差异和显著下降的同时却观察到了PAPE的显著提升。PAP效应只有在激活后的早期(5 min以内)且幅度极高时,才可能影响PAPE,但并不是PAPE的主要机制。结合国外学者对PAP和PAPE的定义,认为在以运动表现作为测量结果时,应统一使用术语PAPE描述相关内容。建议将PAPE翻译为“激活后表现提升”,定义为“最大或接近最大强度自主收缩后运动表现的急性提升”;将PAP翻译为“激活后增强”,定义为“最大或接近最大强度自主收缩后颤搐力(矩)的急性增强”。

关键词: 激活后表现提升;激活后增强效应;运动表现;颤搐;肌球蛋白调节轻链磷酸化

Abstract: The post-activation potentiation (PAP) effect refers to the acute potentiation of twitch force (torque) after an voluntary contraction of maximal or near-maximal intensity, while post-activation performance enhancement (PAPE) refers specifically to the acute enhancement of motor performance. However, there is confusion in the definition and application of the two terms. This study addresses this problem by systematically searching and analyzing the literature. The results of the analysis show that the term PAP has gradually changed from a broad concept to a specific and clear term in the history of development. Currently, the primary mechanism of the PAP effect is thought to be myosin-regulated light chain phosphorylation, which may increase the rate of force generation and load-velocity relationship in tests related to sports performance. However, the 32 included studies that reported both PAP effects and PAPE, 50% did not observe both PAP effects and PAPE, and an even greater 9.4% observed a significant enhancement in PAPE while there was no difference and a significant decrease in PAP effects. The PAP effect may only affect PAPE when it is early (less than 5 min) after activation and when its magnitude is extremely high but is not the main mechanism of PAPE. Combining the definitions of PAP and PAPE by foreign scholars, this study suggests that the term PAPE should be used uniformly to describe the relevant content when sports performance is used as a measurement outcome. In this study, it propose to translate PAPE as “post-activation performance enhancement”, which is defined as “acute enhancement of sports performance after maximal or near-maximal voluntary contraction”, and PAP as “post-activation augmentation”, defined as “acute enhancement of twitch force (torque) after maximal or near maximal voluntary contraction”.

基金项目:

上海市科委“地方院校能力建设计划”项目(21010503500)

第一作者简介:

徐恺(1998-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为优化运动任务中的运动表现,E-mail:2221152066@sus.edu.cn。

*通信作者简介:

王然(1987-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为竞技运动科学,E-mail:wangran@sus.edu.cn。

作者单位:

上海体育大学,上海 200438
Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China.

Keywords: *post-activation performance enhancement; post-activation potentiation; sport performance; twitch; myosin regulates light chain phosphorylation*

中图分类号: G804.6 **文献标识码:** A

运动训练的重要原理之一在于通过训练刺激使人体的神经肌肉系统产生应激和适应(Bompa et al., 2019)。在急性研究中,神经肌肉系统可能因内源性(自主)或外源性(非自主)刺激产生疲劳或兴奋。当兴奋导致骨骼肌颤搐力增强时,被称为活动依赖性增强(Sale, 2002)。通常由以下刺激引起:1)阶梯,即重复的外源性低频电刺激;2)强直后增强,即短暂的外源性高频电刺激;3)激活后增强(post-activation potentiation, PAP),即最大或接近最大强度的内源性自主收缩(Dote-Montero et al., 2022)。检验方式通常为电刺激诱发骨骼肌非自主收缩,以测量骨骼肌颤搐力和力矩(通常为峰值)的变化,确定增强幅度(MacIntosh, 2010)。值得注意的是,这种增强现象反应的是神经肌肉系统在单次强烈的电刺激后的急性增强(诱发人体骨骼肌中颤搐反应的典型轨迹如图 1 所示),是受神经支配的肌肉同步收缩的结果(Vandervoort et al., 1983)。

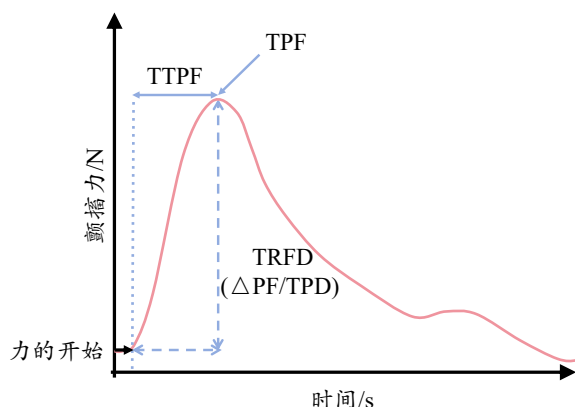


图1 强烈电刺激诱发人体骨骼肌颤搐反应的典型轨迹
Figure 1. Typical Trace of an Evoked Muscle Twitch Response in Human Skeletal Muscle by Supramaximal Electrical Stimulation

注: TPF. 峰值颤搐力(twitch peak force); TTPF. 达到峰值颤搐力的时间(twitch time to peak force); TRFD. 颤搐力的发展速率(twitch rate of force development)。

近年来,许多国内外的研究将运动表现相关的急性提升效果,如跳跃高度、冲刺速度、上下肢输出功率等,归因于 PAP 效应。多数研究在未对骨骼肌进行颤搐检验的情况下,将颤搐力(矩)增

强等同于运动表现提升(Blazevich et al., 2019),并将 PAP 效应错误地定义为最大或接近最大强度抗阻练习后的运动表现急性提升(Healy et al., 2017)。随着对 PAP 研究的深入,国外学者逐渐发现颤搐力(矩)增强并不影响或很少影响运动表现(Zimmermann et al., 2020)。因此,国外学者建议用术语“激活后表现提升”(post-activation performance enhancement, PAPE)指代运动表现的急性提升(Blazevich et al., 2019; Cuenca-Fernández et al., 2017),以区分颤搐力(矩)增强和运动表现提升。然而,目前国内仍广泛使用 PAP 这一术语指代运动表现的急性提升。更重要的是,对 PAP 早期发展历史和文献引用方面的误解,以及对 PAP 定义和翻译的混乱,在一定程度上阻碍了国内 PAP 和 PAPE 研究的发展。

鉴于此,本研究基于系统文献检索与分析,重点梳理 PAP 研究的发展历程,阐明 PAP 效应的生理机制,并分析 PAP 效应与 PAPE 之间的关系,旨在为国内相关研究提供更为精准的理论框架和术语规范。具体研究内容包括 3 个板块:1)梳理 PAP 研究的历史发展脉络;2)系统综述 PAP 效应与 PAPE 的概念差异及其内在联系;3)分析国内 PAP 研究现状及其术语使用的规范性问题。

1 国外 PAP 研究的发展历史

在谷歌学术数据库输入关键词“treppe”“staircase”“posttetanic”“potentiation”“postactivation”,检索了约 1 800 篇 PAP 相关研究(详见 osf.io/cvqq3)。结果表明, PAP 研究的发展可分为 4 个时期,分别为“初期 PAP 研究”“前期 PAP 研究”“中期 PAP 研究”“近期 PAP 研究”(图 2)。

在“初期 PAP 研究”时期(1859—1982 年), Schiff (1859)在针对青蛙腓肠肌的研究中提及了“激活—增强”现象。此后, Bowditch (1871)发现并命名了阶梯现象; Brown 等(1926)在人体骨骼肌中观察到了阶梯现象。术语“强直后增强”由 Rosenbluth 等(1937)提出,用以描述在猫腓肠肌和比目鱼肌中观察到的强直刺激后的颤搐力增强。另一方面, Lloyd (1949)和 Eccles 等(1953)将

强直后增强描述为猫脊髓中由强直刺激导致的突触前作用增加,进而引发的相同突触后放电增加现象。基于此,强直后增强的研究逐渐分化为2个主要方向:1)聚焦突触传递和神经回路的神经生理学研究;2)探索肌肉增强的肌肉生理学机制。在神经生理学领域,Liley (1956)发现单次神经齐射也能导致神经肌肉接头电位的增加。他认为“强直后增强”更适合描述高频电刺激引发的现

象,因此提出了PAP这一术语,以更广泛地涵盖神经肌肉接头增强的现象。在肌肉生理学领域,Burke等(1976)将PAP定义为任何类型的重复刺激后肌肉颤搐力的增强,而将“强直后增强”的使用限制在描述强直电刺激所引发的增强现象。总体上,PAP的提出是为了弥补强直后增强定义的限制性,使得研究者能够更全面地描述神经肌肉系统中所有形式的增强现象。

时期	重要节点	研究重点
初期PAP研究 (1859—1982年)	<ul style="list-style-type: none"> 1859年: Schiff从青蛙腓肠肌中发现了“激活—增强”现象 1871年: Bowditch提出术语阶梯(staircase/treppe) 1937年: Rosenblueth提出术语强直后增强(PTP) 1956年: Liley提出术语激活后增强(PAP) 1976年: Burke将PAP定义为“任何重复刺激后颤搐力的增强” 	 动物研究 离体肌纤维
前期PAP研究 (1983—2001年)	<ul style="list-style-type: none"> 1983年: Vandervoort和Belanger使用最大自主收缩作为诱导人体中PAP效应的激活方式 1996年: Schmidtleicher发现最大自主收缩可以急性提升随后的运动表现 1998年: Young等人发现动态收缩(深蹲)可以急性提升随后的运动表现 2000年: Gossen和Sale同时检测了膝关节颤搐力矩(非自主)和伸膝速度(自主) 	 动物研究 人体研究 研究趋势
中期PAP研究 (2002—2016年)	<ul style="list-style-type: none"> 2002年: Sale将PAP定义为“条件刺激后骨骼肌颤搐力和低频强直力的急性提升”,其中条件刺激包括强直刺激,最大自主收缩和阶梯 2005年: Hodgson等将PAP定义为“骨骼肌收缩历史对骨骼肌颤搐力和运动表现的提升” 2009年: Tillin和Bishop将PAP定义为“骨骼肌收缩历史(最大或接近最大强度)后肌肉表现特性的急性提升” 2015年: Suchomel将PAP定义为“收缩历史引起的肌肉表现急性提升” 	 颤搐力(矩) 运动表现 研究趋势
近期PAP研究 (2017年至今)	<ul style="list-style-type: none"> 2017年: Cuenca-Fernandez提出术语激活后表现提升(PAPE) 2019年: Blazeovich和Babault详细描述了PAP的发展历史、PAP的机制、PAPE的可能机制、PAP和PAPE之间的关系,并建议分别采用术语PAP和PAPE分别指代颤搐力(矩)增强和运动表现提升 2020年: Prieske等人进一步阐述了PAP效应与PAPE的区别,与Blazeovich和Babault提出了相同的建议 	 运动表现 颤搐力(矩) 研究趋势

图2 各个时期PAP研究的重要节点

Figure 2. Important Points in the Various Periods of PAP Research

注:图中描述的颤搐力和力矩指的是峰值颤搐力和力矩,某些研究也将颤搐力和力矩的发展速率视为增强的效应。

在前期PAP研究时期(1983—2001年),Vandervoort等(1983)在人体内探索PAP效应,发现足背屈肌和跖屈肌的颤搐力在10 s最大自主收缩后即刻达到峰值,然后迅速下降,在约28 s后下降至一半,随后呈指数下降并最终在5~10 min回归基线水平,最大自主收缩持续时间的延长或缩短会影响峰值颤搐力的幅度、到达峰值颤搐力的时间和半松弛时间。随后研究对这些现象进行了补充,Garner等(1989)发现,即使在骨骼肌疲劳的情况下,仍会观察到显著的颤搐力增强。这一现象引发了Green等(1989)的推测,即骨骼肌颤搐力增强可能是骨骼肌应对低频疲劳的一种补偿机

制,旨在节省能量。然而,这种机制尚未得到完全证明(Vandenboom, 2017),仍需谨慎理解。此外,研究还表明颤搐力增强的幅度受参与者年龄(Hicks et al., 1991)、性别(Pääsuke et al., 2000)和训练水平(Rice et al., 1993)的影响。基于对训练水平的研究,Hamada等(2000)和Pääsuke等(1998)进一步探讨了运动员类型对PAP效应的影响,研究发现,力量型运动员比耐力型运动员的颤搐力增强幅度更大。因此,前期PAP研究关注的重点逐渐从动物研究转为人体研究,术语PAP逐渐发展为仅代表最大自主收缩后颤搐力(矩)的急性增强,PAP的应用也开始向运动训练学领域靠拢,

研究领域更加关注人体运动表现的优化(图2)。

在中期 PAP 研究时期(2002—2016 年),加拿大运动生理学家 Sale (2002)发表了一篇具有里程碑意义的综述,提出肌肉颤搐力的增强可能会影响次最大自主收缩下的发力速率(rate of development),从而提升力量和爆发力表现,该研究为 PAP 效应进入训练学奠定了基础。至此,PAP 研究逐渐分化为 3 个主要方向(图3):1)探讨骨骼肌自主收缩对运动表现的急性提升;2)探讨骨骼肌自主收缩对颤搐力(矩)的影响;3)探讨骨骼肌颤搐力(矩)增强与运动表现提升的关系。其中

第 1 类研究主要探讨复合式训练的最佳组合和准备活动对运动表现的急性提升。然而,这类研究在没有对颤搐力(矩)进行检验的情况下直接采用术语 PAP 描述运动表现提升的现象。随着类似的研究越来越多,术语 PAP 逐渐被训练学领域的研究者错误定义为仅描述运动表现急性提升的现象。这是国外研究中术语 PAP 误用的主要原因。相反,在第 2 类和第 3 类研究中,研究者对术语 PAP 的定位仍然是用以描述颤搐力(矩)急性增强的现象。可见,术语 PAP 定义的转变主要由训练学研究者的错误借用导致。

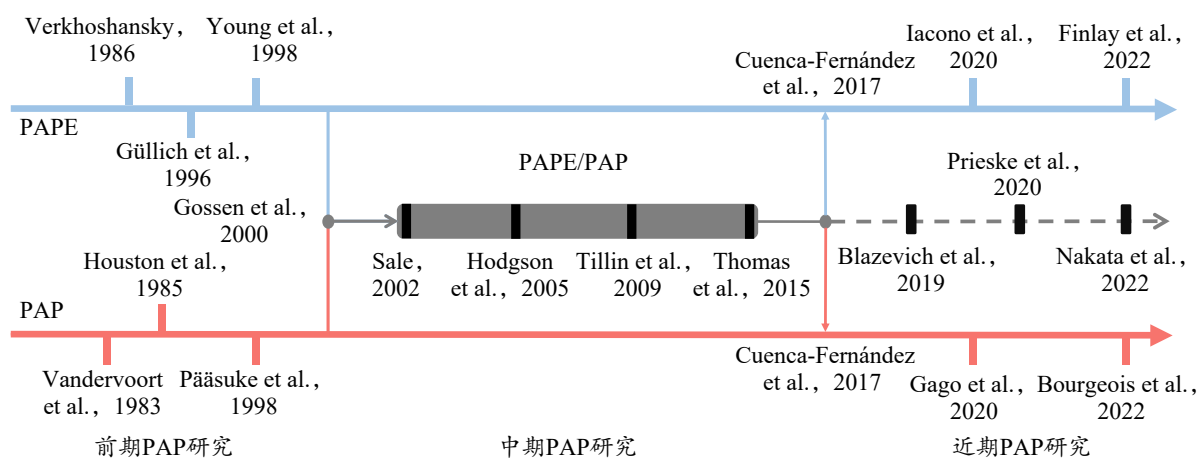


图3 PAP和PAPE研究的交叉与分离

Figure 3. Intersection and Separation of PAP and PAPE Studies

注:顶部时间轴表示仅以运动表现为测量结果的研究(PAPE),底部时间轴表示仅以颤搐特征为测量结果的研究(PAP),中部时间轴表示同时探讨PAP和PAPE的研究。

在近期 PAP 研究时期(2017 年至今),Cuenca-Fernández 等(2017)的开创性研究认为,运动表现的提升不仅由颤搐力(矩)增强导致,还可能涉及其他机制,如肌肉温度升高、高阶运动单位募集、运动神经元兴奋性增加以及血液中儿茶酚胺、肾上腺素和去甲肾上腺素浓度上升等。他们使用 PAPE 描述与运动表现提升相关的现象,使用 PAP 描述与颤搐力(矩)增强相关的现象。值得注意的是,这项研究的合作者之一 Brian MacIntosh 教授,在更早的时间讲述了颤搐力(矩)增强与运动表现提升不一致的关系,但并未得到广泛关注(MacIntosh, 2010; MacIntosh et al., 2012)。实际上,专注于生理学方向的研究者鲜少对术语 PAP 产生误用。术语 PAP 和 PAPE 的正式分离得益于 Blazeovich(2019)和 Prieske 等(2020)在各自综述中的贡献,明确了 2 种术语在科学研究中的概念差

异和适用范围,目前国际学术界普遍接受了他们对 PAP 和 PAPE 的定义。

整体来看,PAP 研究的 4 个发展时期可以总结为从“阶梯”到“强直后增强”再到“PAP”(时期 1),从“动物”到“人类”(时期 2),从“颤搐力(矩)增强”到“运动表现提升”(时期 3),从“运动表现提升”到“颤搐力(矩)增强”(时期 4)。这一发展历程标志着术语 PAP 从一个宽泛的概念转变为一个具体、明确的术语。此外,本研究总结了当前主流对“阶梯现象”、“强直后增强”、PAP 和 PAPE 的定义(表 1),以为相关研究提供清晰的术语框架。

2 PAP效应的机制和对PAPE的影响

虽然有其他机制,如神经冲动增加、高阶运动单位募集、羽状角改变和无机磷酸原转变等,可能会影响 PAP 效应,但目前主流观点仍将肌球蛋白


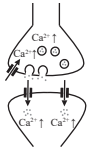
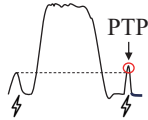
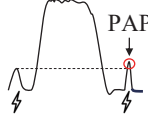
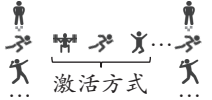
白调节轻链(myosin regulatory light chain, MRLC)磷酸化作为PAP效应的主要机制(Blazeovich et al., 2019; Prieske et al., 2020; Vandenboom, 2017)。早期研究观察到PAP效应与MRLC磷酸化的高相关性证明了这一点(Manning et al., 1979, 1982)。

MRLC磷酸化是指将一个磷酸基团从高能三磷酸腺苷转移到肌球蛋白的特定部位(Grange et al., 1993; Sweeney et al., 1993)。具体而言,在进行最大自主收缩期间,肌膜上的动作电位会使肌浆网通过雷诺丁受体释放足够多的钙离子(Ca^{2+})。4个游离的 Ca^{2+} 离子与钙调蛋白相互作用后激活肌球蛋白轻链激酶,这会使MRLC氨基端部分的特定丝氨酸残基磷酸化(Vandenboom, 2017)。当最大自主收缩停止时,肌浆网释放的 Ca^{2+} 离子停止,肌肉内 Ca^{2+} 离子浓度降低,导致钙调蛋白复合物的解离和肌球蛋白轻链激酶的失

活,同时肌球蛋白轻链磷酸酶对MRLC进行去磷酸化,最终使肌肉回到静息状态(图4)。值得注意的是。肌球蛋白轻链磷酸酶并不会受到最大自主收缩的影响,主要受到肌浆网回收 Ca^{2+} 离子的动力学调控(Blazeovich et al., 2019)。因此,肌肉对MRLC磷酸化反应较快,但解离速度相对较慢。最大自主收缩后,残留的MRLC磷酸化会导致肌球蛋白头部比静息时更加靠近肌动蛋白(MacIntosh, 2010)。此时若再进行短暂的强烈电刺激会使更多的肌球蛋白与肌动蛋白结合,从而产生更大的颤搐力(矩)增强。此外,MRLC磷酸还被证明会导致肌动蛋白复合物对钙的敏感性增加,增加横桥形成的可能性和速率(Blazeovich et al., 2019; Vandenboom, 2017)。总体上,MRLC磷酸化通常被描述成一种短期的肌肉记忆,允许肌球蛋白记住其最近被激活(Tillin et al., 2009)。

表1 阶梯、强直后增强、激活后增强和激活后表现提升的主流定义

Table 1 Mainstream Definitions of Staircase, Post-tetanic Potentiation, Post-activation Potentiation and Post-activation Performance Enhancement

术语名称	现象	定义
阶梯(staircase/treppe)		反复低频电刺激后颤搐力(矩)的急性增强
强直后增强(PTP)神经方面		重复刺激突触前神经元引起的突触效应出现的短时性增强
强直后增强(PTP)肌肉方面	短暂高频电刺激 	强直刺激后颤搐力(矩)的急性增强
激活后增强(PAP)*	最大自主收缩 	最大或接近最大强度自主收缩后颤搐力(矩)的急性增强
激活后表现提升(PAPE)	 激活方式 测量方式	最大或接近最大强度自主收缩后运动表现的急性提升

注:颤搐力(矩)主要为峰值颤搐力和力矩,某些研究也将颤搐力和力矩的发展速率视为增强。*激活后增强有时被用来表示所有颤搐力(矩)增强的总称,也包括低频强直力的增强。

中期研究认为,PAP效应可能会增加次最大自主收缩和低频强直收缩力,但对高频强直收缩力(最大等长收缩力)没有影响(Sale, 2002)。因

为在最大等长收缩力期间, Ca^{2+} 的浓度已经接近饱和,所有可能的横桥已经被连接(Blazeovich et al., 2019)。先前激活(预活动)增加的 Ca^{2+} 敏感性和

肌球蛋白头的扭转并不能建立更多的优势(图 5A 显示了 PAP 效应与等长收缩力-频率的关系)(MacDougall et al., 2014)。此外,PAP 效应还受

到干预类型、干预强度、干预时间、肌纤维类型和肌肉长度等的影响(MacDougall et al., 2014; MacIntosh, 2010)。

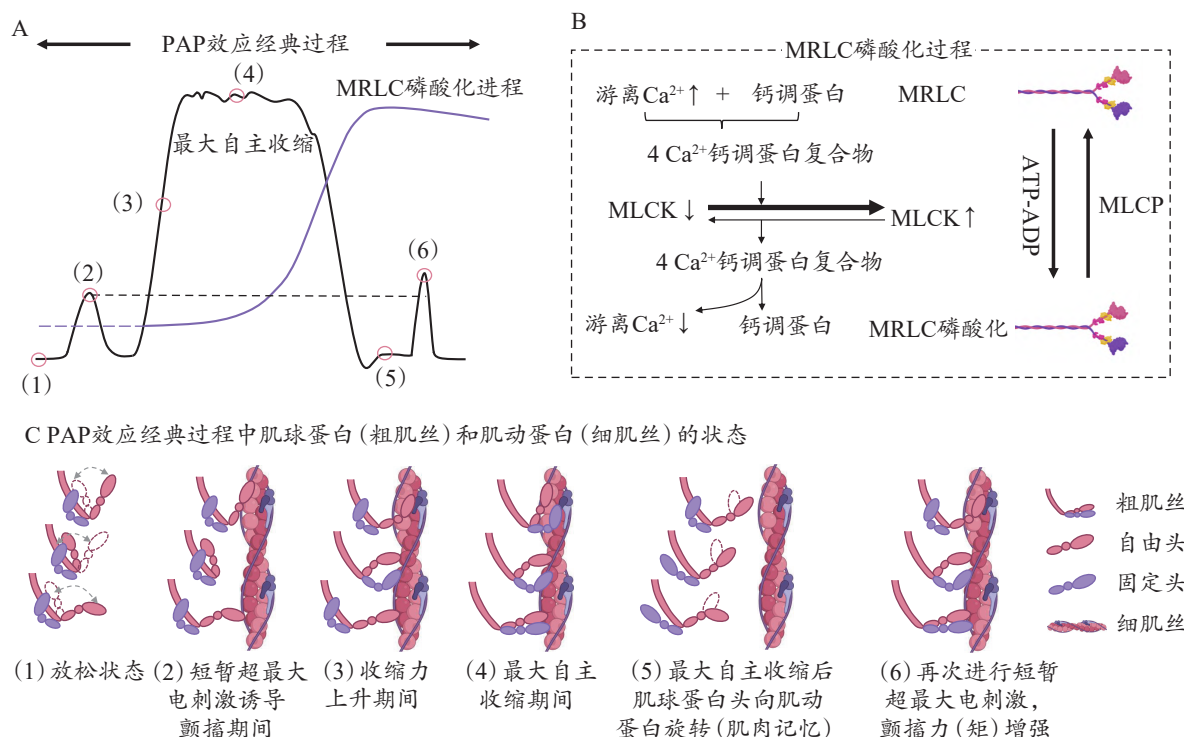


图4 PAP效应主要机制的反应过程

Figure 4. The Reaction Process of the Main Mechanism of PAP Effect

注:在(1)中,肌肉中少量的MRCL磷酸化会促使肌球蛋白部分头部发轻微的摆动,在进行短暂的强烈电刺激时,这些头部很容易与肌动蛋白结合;(2)和(3)表示肌肉收缩力上升期间,随着钙离子浓度上升,更多肌球蛋白与肌动蛋白结合;(4)表示最大自主收缩期间,几乎所有的肌球蛋白与肌动蛋白完成结合;(5)表示最大自主收缩后由于MRCL去磷酸化的速度相对缓慢(如A虚线曲线所示),肌球蛋白头向肌动蛋白发生了扭转,即“肌肉记忆”,记住了先前的肌肉收缩。最后,再次进行短暂的强烈电刺激后,颤搐力(矩)的峰值幅度会变大(6)。

Sale(2002)还探讨了PAP对运动表现(力量和爆发力表现)的可能影响。他认为PAP效应会改变运动表现中的向心负荷-速度关系(图5B),增加最大收缩速度到最大负荷之间的发力速率。这最终会增加力-速曲线的曲率(图5B),从而提升运动表现。考虑到PAP效应通常与疲劳共存,Sale(2002)建立了一个PAP效应模型,即疲劳和运动表现之间关系的理论模型(图5C)。这个理论模型被Tillin等(2009)改进(图5D),改进模型目前仍广为流传。

然而,早期研究者在探讨PAP效应对运动表现潜在影响的同时,鲜少考虑PAP效应与PAPE出现的时间是否一致(Zimmermann et al., 2020)。Blazevich等(2019)认为经典PAP效应会在激活后即刻最大,而后在28 s左右下降一半,随后呈指数下降,约在5 min后逐渐消失。相反,本课题组在

另一项研究中发现,PAPE出现的窗口期在2.5~11.0 min,峰值时间在5.5 min左右。图6A表示PAP效应与PAPE之间的关系。两者出现时间不一致意味着PAP效应与PAPE可能是完全不同的2个现象。Zimmermann等(2020)的系统综述证明了这一点,该研究纳入了19篇同时报告PAP效应和PAPE的研究,结果表明只有在PAP效应达到极高值时(峰值颤搐力和力矩提升的幅度),PAPE才会增加。

然而,当PAP效应不存在时,也有研究发现了PAPE。更重要的是当PAP效应存在时,一些研究却观察到PAPE不变或下降。本研究在PubMed、SPORTDiscus、Web of Science和中国知网(CNKI)数据库中检索得到了32篇同时报告PAP效应和PAPE的研究,结果表明仅有16篇(50.0%)研究观

观察到PAP效应(颤搐力和力矩显著增强)与PAPE(运动表现提升)的一致关系。然而,13篇(40.6%)研究在PAP显著提升的同时却观察到PAPE无差异或显著下降。更重要的是,有3篇(9.4%)研究在PAPE显著提升的同时却观察到PAP效应无差异或显著下降。此外,在16篇观察到PAP效应与

PAPE一致关系的研究中,14篇研究(87.5%)观察到的PAPE出现时间基本在5 min以内。这些研究中的颤搐力(矩)提升幅度最高可达200%。提示,PAP效应只有在激活后的早期(5 min以内)且幅度极高时,才可能影响PAPE,但并不是PAPE的主要机制。

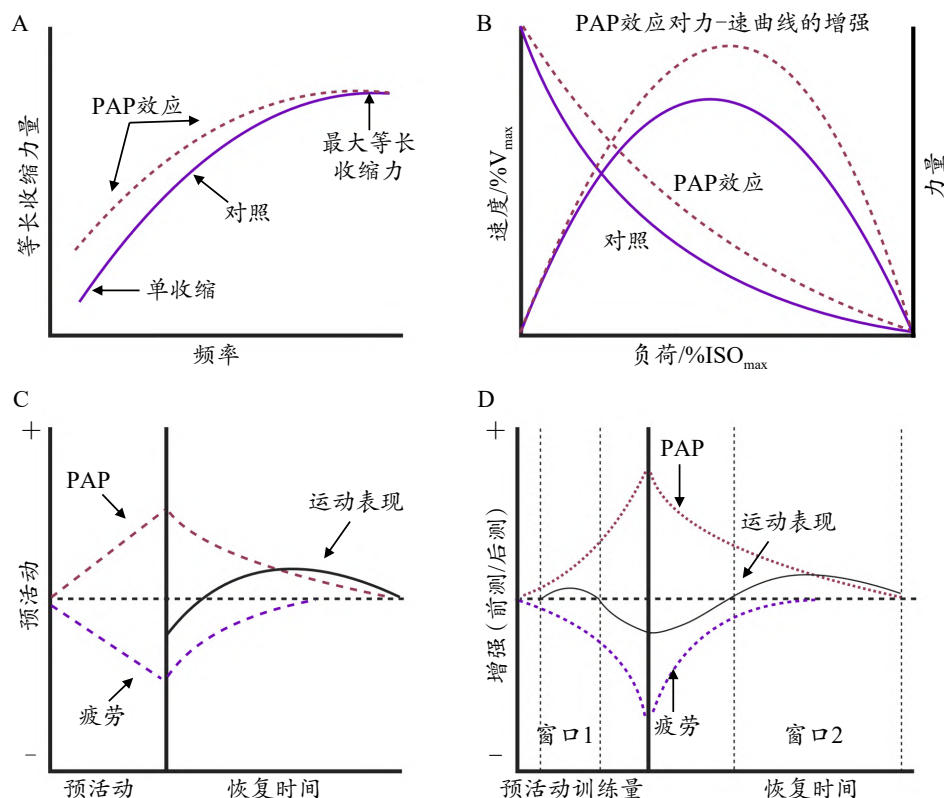


图5 PAP效应与运动表现之间的关系

Figure 5. Relationship between PAP Effects and Sports Performance

注:A. PAP效应对等长收缩力-频率关系的影响;B. PAP效应对向心负荷-速度关系和力-速曲线的影响,PAP效应不会增加最大无负荷(零载荷)、缩短速度(V_{\max})或最大等长收缩力(ISO_{\max}),但会降低负荷-速度关系的曲率以及增加力-速曲线的曲率;C. PAP效应(颤搐力和力矩增强)与疲劳对PAPE的影响,经典理论认为在预活动(通常是最大或接近最大强度自主收缩)后PAP幅度最大,并且当疲劳的恢复速度大于PAP的减弱速度时,会出现一个提升运动表现的窗口期;D. 预活动的训练量(负荷 \times 组数)与PAP效应和PAPE之间的关系,Tillin等(2009)认为在训练量相对较少和训练量适当时会出现2个PAPE窗口期,其中一个窗口期为预活动后运动表现即刻提升,另一个窗口期为预活动后运动表现先下降而后再提升。

除PAP效应外,一些其他的机制可能会影响PAPE,如肌肉温度的增加、运动单位募集的增加、运动神经元的兴奋性和肌纤维的动作电位传导速度(Blazevich et al., 2019; Cuenca-Fernández et al., 2017)。最近研究表明,急性局部运动会促进初级运动皮层特定区域的神经可塑性,增强皮质脊髓的兴奋性,使特定的相关运动神经元对神经冲动的反应更加灵敏(Anthi et al., 2014; Singh et al., 2015)。因此,除了非定位神经源效应外,具有相似运动模式和足够动态运动模式可能会显著增

强中枢运动输出,最终提升运动表现(Kolinger et al., 2024)。基于这些机制,本研究根据Sale的理论图更新了PAP效应与PAPE之间的可能关系(图6B)。

总之,PAP效应的主要机制是MRLC磷酸化,可能会提升运动表现相关测试的发力速率和向心负荷-速度关系。然而,PAP效应出现的时间与PAPE并不一致。显然,PAP效应和PAPE是完全不同的2种现象,通过自主收缩进行的运动表现测量并不能作为验证PAP效应的方式。

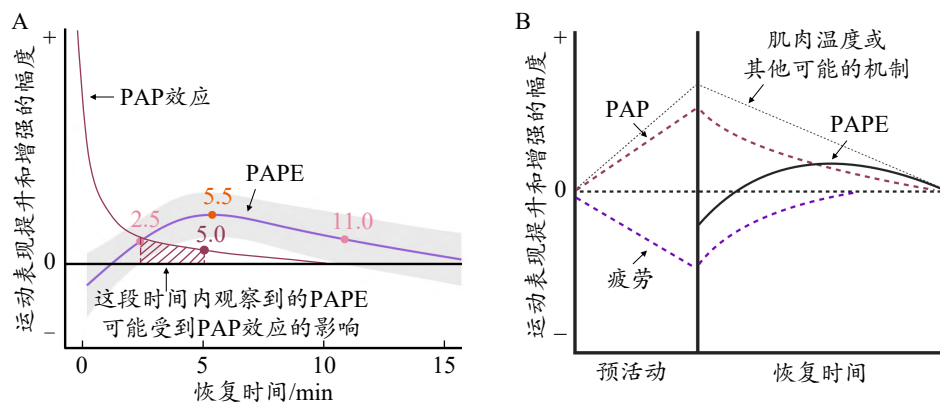


图6 PAP效应与PAPE出现时间和机制的相互关系

Figure 6. Relationship between the PAP Effect and the Timing and Mechanism of PAPE Appearance

注:图A中PAPE曲线是对62篇报道PAPE的研究进行合并后拟合的PAPE与恢复时间关系的曲线;图B改编自Sale(2002)制作的理论模型,PAPE还会受到其他机制的影响。

3 国内PAP研究的发展历史和存在的误解

在中国知网数据库输入关键词“激活后增强”“后激活增强”“预激活增强”“激活后表现增强”“激活后表现提升”,检索得到65篇已发表在期刊上的PAP研究。结果表明,胡敏等(2005)在一篇综述中提及术语PAP,称之为“激活后增强效应”。2011年,美国体能协会前任主席Gregory Half在国家体育总局的一次讲座中介绍了PAP效应,此后国内学者开始广泛关注PAP效应(宋兆铭等,2015)。王安利等(2014)总结了PAP效应与运动表现关系,将PAP翻译为“后激活增强效应”。宋兆铭等(2015)则将PAP翻译为“预激活增强效应”,引用自王安利等(2014)的定义,但并未完整表述“肌肉收缩和低频强直性力量增加”的内容(表2)。随后,更多学者将PAP效应解释为与运动表现提升相关的概念,如“肌肉爆发力增加”“肌肉发力增加”“肌肉发力能力增强”等。随着国内学者之间的交叉引用,对PAP效应的误解逐渐增多,导致对PAP效应概念的错误认知。这不仅影响了PAP研究的发展,也可能误导初次接触PAP效应的学者。目前仅有少数研究,如石林等(2023)在其综述中提及PAPE,而主流的PAP研究仍充斥着许多误解。

3.1 对PAP研究早期发展的错误理解

国内学者普遍认为Manning等(1982)首次发现了“激活—增强”现象,并认为Vandervoort等(1983)是第一个在人体肌纤维中观察到此现象的研究者,而这一现象在随后的15年里并未受到广泛关注,最终,Brown等(1998)首次提出并定义了

术语PAP。实际上,Manning等(1982)的主要贡献是证明了MRLC磷酸化与颤搐力增强之间的强相关性,并非由他们首次发现了“激活—增强”现象。此外,国内学者对PAP发展历史的主要误解来自对Brown等(1998)研究的错误认知和引用。实际上,Brown等(1998)对术语PAP的定义基于在猫尾骨肌电刺激实验中观察到的颤搐力增强,并非以人体为研究对象。他们将术语PAP定义为“短暂的肌肉激活显著增加了随后次最大激活所产生的力量,是一种仅发生在快肌纤维中的现象”,这与目前术语PAP的主流定义不同(表1),这实际上是描述对猫尾骨肌进行短暂高频电刺激,导致随后对猫尾骨肌进行次高频电刺激时肌肉颤搐力增强。最后,1983—1998年,“激活—增强”现象并非没有受到广泛关注。大量研究探讨了该现象在骨骼肌中的特征(Alway et al., 1987; Belanger et al., 1989; Hicks et al., 1991; Houston et al., 1985, 1990; Stuart et al., 1988; Stull et al., 1985),1993年的2篇综述(Grange et al., 1993; Sweeney et al., 1993)全面阐述了颤搐力与MRLC磷酸化的关系。可见,国内学者对PAP研究的早期发展存在较大误解,并延续至今。

3.2 国内学者对PAP定义和术语的翻译混乱

国内学者对术语PAP的定义,主要围绕在肌肉发力速度、爆发力和运动表现的提升。这可能 是对国外学者定义的错误翻译。追溯国内主流PAP研究引用的文献来源可知,Sale(2002)将肌肉颤搐力和低频强直力的增强定义为PAP的测量结果;Hodgson等(2005)将肌肉颤搐力和H反射

的增强定义为PAP的测量结果;Tillin等(2009)指出,PAP是自主收缩引发的肌肉峰值颤搐力和发力速率的增强。以上3篇文章均将肌肉颤搐力增强作为主要测量结果。这种误解可能来源于对英

文单词“twitch”的错误翻译。在此,“twitch”指的是“颤搐”,而非“收缩”。将“twitch”译为“收缩”可能是导致国内对术语PAP定义产生误解的根本原因。

表2 国内PAP的定义与引用来源

Table 2 Definition and Reference Sources of Domestic PAP

文献来源	术语翻译	定义	术语定义的引用来源
胡敏等, 2005	A类	肌肉前次收缩活动(包括一系列的电诱发的单收缩、不完全强直收缩、完全强直收缩和最大随意收缩)对后续的肌肉收缩功能有增强效应表现为对短促刺激的颤搐收缩力和对低频刺激的强直收缩反应加强	Sale, 2002
王安利等, 2014	B类	在某种特定条件的收缩刺激后,人体肌肉收缩以及低频强直性力量的增加,是一种由肌肉收缩经历(记忆)引起的肌肉运动能力提高的现象	Sale, 2002 Tillin, 2009
宋兆铭等, 2015	C类	一种由于肌肉收缩经历(记忆)引起的肌肉运动能力提高的现象	王安利等, 2014
姜自立等, 2016	A类	一种由预先短时间次最大强度抗阻练习引起的肌肉发力速度或爆发力急性增加的生理现象	Brown et al., 1998
王海宁等, 2018	A类	一种由预先短时间次最大强度抗阻练习诱发的肌肉发力速度急性增加的生理现象	Brown et al., 1998
梁美富等, 2018, 2019, 2020	A类	一种由预先短时间次最大强度抗阻练习引起的肌肉发力速度或爆发力急性增加的生理现象	Brown et al., 1998
雷正方等, 2019	B类	在某种特定条件的收缩刺激后,人体肌肉收缩以及低频强制性力量的增加,是一种由肌肉收缩经历(记忆)引起的肌肉运动能力提高的现象	侯世伦, 2015 王安利等, 2014
于亮等, 2020	A类	骨骼肌在进行大运动负荷抗阻练习后,一段时间内最大力量和输出功率提高的现象	Tillin, 2009
石林等, 2022	A类	一种由预先次最大强度抗阻训练引起的肌肉发力能力急性增强的生理现象	梁美富等, 2019
孙得朋等, 2023	A类	特定条件下(最大或接近最大强度)肌肉随意收缩刺激后引起随后肌肉表现急性增强,是一种肌肉记忆引起运动表现改善的现象	Hodgson, 2005 Robbins, 2005 Sale, 2002
石林等, 2023	D类	预刺激后运动表现提高	Cuenca-Fernández, 2017

注:A类将术语PAP翻译为激活后增强效应;B类翻译为后激活增强效应;C类翻译为预激活增强效应;D类翻译为激活后表现增强。

国内学者在PAP术语翻译方面存在分歧,主要有3种翻译:“激活后增强效应”“后激活增强效应”“预激活增强效应”。在中文体育类核心期刊发表的论文中,有32篇使用“激活后增强效应”,16篇使用“后激活增强效应”,2篇使用“预激活增强效应”。截至2024年1月22日,仅有1篇论文使用了术语PAPE,并将其翻译为“激活后表现增强”。

4 厘清术语PAP和PAPE以及打破PAP研究术语的使用困境

目前,对术语PAP的翻译仍存在争议。周彤

(2018)支持“后激活增强”的翻译,认为它保留了原意且符合英文原文结构。宋兆铭等(2015)通过试译法将PAP翻译为“预激活增强”或“后激活增强”。然而,术语翻译不应仅基于词语意义,还需考虑PAP的研究流程。PAP和PAPE均通过“前测→激活→后测”的方式确定效果,通过对比测试后与测试前的差异确定增强效果,强调的是“激活后”的“增强效应”。此外,目前中文体育类核心期刊中“激活后增强”的使用频率是“后激活增强”的2倍。因此,无论从术语的使用频率、定义内容,还是研究流程来看,“激活后增强”是更

准确的表达。

对于术语 PAPE 的翻译,目前只有石林等(2022)在综述中将其翻译为“激活后表现增强”。综合分析,“post-activation”最适宜译为“激活后”,“performance”表示运动成绩提升时通常译为“表现”,而“enhancement”通常译为“提升”,与“potentiation”的“增强”含义不同。因此,本研究认为,“激活后表现提升”是对 PAPE 的更合理翻译。

“激活后增强效应”“后激活增强效应”2 个术语,以及“post-activation potentiation”及其缩写“PAP”都已在国内广泛使用。然而,科学进步在于不断的质疑、突破和重构。因此,国内研究者在未来的研究中应明确区分 PAP 和 PAPE 的差异。尤其是在未进行颤搐力(矩)测量而直接以运动表现提升作为测量结果的研究中,宜采用“激活后表现提升”(PAPE)这一术语。

5 结论

在 PAP 研究的发展历史中,术语 PAP 从一个宽泛的概念逐渐转变为一个具体、明确的术语。目前,PAP 效应的主要机制被认为是 MRLC 磷酸化,可以增加次最大收缩下(低频强直收缩力)肌动蛋白对 Ca^{2+} 的敏感性以及促使肌球蛋白头向肌动蛋白移动。这可能会提升运动表现相关测试的发力速率和向心负荷-速度关系。然而,PAP 效应出现的时间与 PAPE 并不一致。PAP 效应通常在激活后即刻最大,在 5 min 后逐渐消失,PAPE 峰值时间通常在 5.5 min 左右。因此,PAP 效应只有在激活后的早期(5 min 以内)且幅度极高时,才可能影响 PAPE,但并不是 PAPE 的主要机制。结合国内外研究现状,本研究建议“post-activation potentiation”(PAP)的中文翻译应为“激活后增强”,定义为“最大或接近最大强度自主收缩后骨骼肌颤搐力(矩)的急性增强”;将“post-activation performance enhancement”(PAPE)的中文翻译为“激活后表现提升”,定义为“最大或接近最大强度自主收缩后运动表现的急性提升”。未来研究者和从业者在使用 PAP 或 PAPE 时应明确指出两者区别,以免对读者造成误解。

参考文献:

胡敏,程蜀琳,邹亮畴,等,2005. 电刺激神经技术在运动性疲劳研究中的应用[J]. 广州体育学院学报, 25(6): 43-46.

姜自立,李庆,2016. 激活后增强效应研究进展述评[J]. 体育学刊, 23(1): 136-144.

侯世伦,张新,王安利,2015. 下肢力量与负荷后恢复时间对后激活增强效应的影响[J]. 北京体育大学学报, 38(5): 57-62.

雷正方,王东阳,江栩波,等,2019. 传统抗阻与末端释放训练对网球发球表现的不同 PAP 效应[J]. 西安体育学院学报, 36(3): 356-363.

梁美富,郭文霞,2019. 骨骼肌激活后增强效应的研究进展[J]. 体育科学, 39(5): 70-80.

梁美富,郭文霞,孔振兴,等,2018. 激活后增强效应的间歇时间对下蹲跳高度影响的 Meta 分析[J]. 武汉体育学院学报, 52(2): 49-56.

梁美富,张怀川,张树峰,等,2020. 不同力量水平运动员激活后增强效应的时域特征[J]. 上海体育学院学报, 44(6): 54-61.

石林,韩冬,蔡治东,等,2022. 可变阻力训练对力量表现干预效果的系统综述与 Meta 分析[J]. 上海体育学院学报, 46(9): 90-104.

石林,韩冬,郭炜,等,2023. 不同运动干预诱导激活后表现增强的系统综述[J]. 体育科研, 44(4): 84-95.

宋兆铭,张辉,张诚,等,2015. 预激活增强效应对散打运动员冲拳峰值功率的影响[J]. 体育科学, 35(11): 52-60.

孙得朋,车同同,李志远,等,2023. 加压训练诱导不同训练水平女子足球运动员肌肉活性及激活后增强效应的时域特征[J]. 首都体育学院学报, 35(2): 196-207.

王安利,张新,2014. 力量训练的理论探索及实践进展:后激活增强效应的生理学机制[J]. 中国学校体育(高等教育), 1(10): 80-83.

王海宁,陈万,王颖,等,2018. 高温高湿环境长时间运动后神经肌肉疲劳类型与 PAP 的关系[J]. 中国体育科技, 54(6): 83-89.

于亮,周志博,赵丽,2020. 激活后增强效应提高青少年足球运动员冲刺能力的研究[J]. 首都体育学院学报, 32(6): 550-554.

周彤,2018. 基于后激活增强效应的跳远起跳力量训练理论与实践研究[D]. 北京:北京体育大学.

ALWAY S E, HUGHSON R L, GREEN H J, et al., 1987. Twitch potentiation after fatiguing exercise in man[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 56(4): 461-466.

ANTHI X, DIMITRIOS P, CHRISTOS K, 2014. On the mechanisms of post-activation potentiation: The contribution of neural factors[J]. J Physical Education Sport, 14(2): 134-137.

BELANGER A, MCCOMAS A, 1989. Contractile properties of human skeletal muscle in childhood and adolescence[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 58(6): 563-567.

BLAZEVOICH A J, BABAUULT N, 2019. Post-activation potentiation versus post-activation performance enhancement in humans: Historical perspective, underlying mechanisms, and current issues[J/OL]. Front Physiol, 10: 1359 [2025-

- 01-05]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01359>.
- BOMPA T O, BUZZICHELLI C, 2019. Periodization-: Theory and Methodology of Training[M]. Cham: Human Kinetics.
- BOWDITCH H, 1871. Ueber die Eigentümlichkeiten der Reizbarkeit, welche die Muskelfasern des Herzens zeigen[J]. Berichte des Math-Phys sächs Gesellsch d Wissensch, 23: 652-689.
- BROWN I E, LOEB G E, 1998. Post-activation potentiation: A clue for simplifying models of muscle dynamics[J]. Amer Zool, 38: 743-754.
- BROWN L, TUTTLE W, 1926. The phenomenon of treppe in intact human skeletal muscle[J]. Am J Physiol-Leg Cont, 77: 483-490.
- BURKE R, RUDOMIN P, ZAJAC III F, 1976. The effect of activation history on tension production by individual muscle units[J]. Brain Res, 109(3): 515-529.
- CUENCA-FERNÁNDEZ F, SMITH I C, JORDAN M J, et al., 2017. Nonlocalized postactivation performance enhancement (PAPE) effects in trained athletes: A pilot study[J]. Appl Physiol Nutr Metab, 42(10): 1122-1125.
- DOTE-MONTERO M, PELAYO-TEJO I, MOLINA-GARCIA P, et al., 2022. Effects of post-tetanic potentiation induced by whole-body electrostimulation and post-activation potentiation on maximum isometric strength[J]. Biol Sport, 39(2): 451-461.
- ECCLES J C, MCINTYRE A, 1953. The effects of disuse and of activity on mammalian spinal reflexes[J]. J Physiol, 121(3): 492-516.
- GARNER S H, HICKS A L, MCCOMAS A J, 1989. Prolongation of twitch potentiating mechanism throughout muscle fatigue and recovery[J]. Exp Neurol, 103(3): 277-281.
- GRANGE R W, VANDENBOOM R, HOUSTON M E, 1993. Physiological significance of myosin phosphorylation in skeletal muscle[J]. Can J Appl Physiol, 18(3): 229-242.
- GREEN H J, JONES S R, 1989. Does post-tetanic potentiation compensate for low frequency fatigue?[J]. Clin Physiol, 9(5): 499-514.
- HAMADA T, SALE D G, MACDOUGALL J D, et al., 2000. Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles[J]. J Appl Physiol, 88(6): 2131-2137.
- HEALY R, COMYNS T, 2017. Application of postactivation potentiation methods to improve sprint speed[J]. Strength Cond J, 39(1): 1-9.
- HICKS A L, CUPIDO C M, MARTIN J, et al., 1991. Twitch potentiation during fatiguing exercise in the elderly: The effects of training[J]. Eur J Appl Physiol Occup Physiol, 63(3-4): 278-281.
- HODGSON M, DOCHERTY D, ROBBINS D, 2005. Post-activation potentiation: Underlying physiology and implications for motor performance[J]. Sports Med, 35: 585-595.
- HOUSTON M E, GRANGE R W, 1990. Myosin phosphorylation, twitch potentiation, and fatigue in human skeletal muscle[J]. Can J Physiol Pharmacol, 68(7): 908-913.
- HOUSTON M E, GREEN H J, STULL J T, 1985. Myosin light chain phosphorylation and isometric twitch potentiation in intact human muscle[J]. Pflugers Arch [J], 403: 348-352.
- KOLINGER D, STASTNY P, PISZ A, et al., 2024. High-intensity conditioning activity causes localized postactivation performance enhancement and nonlocalized performance reduction[J/OL]. The J Strength Cond Res, 38(1): e1-e7 [2025-01-05]. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004590>.
- LILEY A, 1956. The quantal components of the mammalian end-plate potential[J]. J Physiol, 133(3): 571-581.
- LLOYD D P, 1949. Post-tetanic potentiation of response in monosynaptic reflex pathways of the spinal cord[J]. J Gen Physiol, 33(2): 147-170.
- MACDOUGALL D, SALE D, 2014. The Physiology of Training for High Performance[M]. Oxford, USA: Oxford University Press.
- MACINTOSH B R, 2010. Cellular and whole muscle studies of activity dependent potentiation[J]. Adv Exp Med Biol, 682: 315-342.
- MACINTOSH B R, ROBILLARD M E, TOMARAS E K, 2012. Should postactivation potentiation be the goal of your warm-up?[J]. Appl Physiol Nutr Metab, 37(3): 546-550.
- MANNING D R, STULL J T, 1979. Myosin light chain phosphorylation and phosphorylase A activity in rat extensor digitorum longus muscle[J]. Biochem Biophys Res Commun, 90(1): 164-170.
- MANNING D R, STULL J T, 1982. Myosin light chain phosphorylation-dephosphorylation in mammalian skeletal muscle[J]. Am J Physiol, 242(3): C234-C241.
- PÄÄSUKE M, ERELINE J, GAPEYEVA H, 1998. Twitch potentiation capacity of plantarflexor muscles in endurance and power athletes[J]. Biol Sport, 15(3): 171-178.
- PÄÄSUKE M, ERELINE J, GAPEYEVA H, 2000. Twitch contraction properties of plantar flexor muscles in pre- and post-pubertal boys and men[J]. Eur J Appl Physiol, 82(5-6): 459-464.
- PRIESKE O, BEHRENS M, CHAABENE H, et al., 2020. Time to differentiate postactivation “potentiation” from “performance enhancement” in the strength and conditioning community[J]. Sports Med, 50(9): 1559-1565.
- RASSIER D E, MACINTOSH B R, 2000. Coexistence of potentiation and fatigue in skeletal muscle[J]. Braz J Med Biol Res, 33(5): 499-508.
- RICE C L, CUNNINGHAM D A, PATERSON D H, et al., 1993. Strength training alters contractile properties of the

- triceps brachii in men aged 65—78 years [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 66(3): 275-280.
- ROBBINS D W, 2005. Postactivation potentiation and its practical applicability: A brief review [J]. *J Strength Cond Res*, 19: 453-458.
- ROSENBLUETH A, MORISON R, 1937. Curarization, fatigue and Wedensky inhibition [J]. *Am J Physiol*, 119: 236-256.
- SALE D G, 2002. Postactivation potentiation: Role in human performance [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 30(3): 138-143.
- SCHIFF M, 1859. *Lehrbuch der Physiologie des Menschen* [M]. Lahr, Germany: M. Schauenburg & C.
- SINGH A M, STAINES W R, 2015. The effects of acute aerobic exercise on the primary motor cortex [J]. *J Mot Behav*, 47(4): 328-339.
- STUART D, LINGLEY M, GRANGE R, et al., 1988. Myosin light chain phosphorylation and contractile performance of human skeletal muscle [J]. *Can J Physiol Pharmacol*, 66(1): 49-54.
- STULL J T, NUNNALLY M H, MOORE R L, et al., 1985. Myosin light chain kinases and myosin phosphorylation in skeletal muscle [J]. *Adv Enzyme Regul*, 23: 123-140.
- SWEENEY H, BOWMAN B F, STULL J T, 1993. Myosin light chain phosphorylation in vertebrate striated muscle: Regulation and function [J]. *Am J Physiol*, 264(5 Pt 1): C1085-C1095.
- TILLIN N A, BISHOP D, 2009. Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities [J]. *Sports Med*, 39(2): 147-166.
- VANDENBOOM R, 2017. Modulation of skeletal muscle contraction by myosin phosphorylation [J]. *Compr Physiol*, 7(1): 171-212.
- VANDERVOORT A, QUINLAN J, MCCOMAS A, 1983. Twitch potentiation after voluntary contraction [J]. *Exp Neurol*, 81(1): 141-152.
- ZIMMERMANN H B, MACINTOSH B R, DAL PUPO J, 2020. Does postactivation potentiation (PAP) increase voluntary performance? [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 45(4): 349-356.
- (收稿日期:2024-10-17; 修订日期:2025-01-06; 编辑:高天艾)

欢迎订阅 2025 年《中国体育科技》

《中国体育科技》(月刊)96 页/期,国际流行大 16 开,胶版印刷,国内定价 25.00 元/期,300.00 元/套。

订阅办法:

1. 通过国家体育总局体育科学研究所科技书刊部订购,汇款方式:

(1) 邮局汇款:100061 北京市东城区体育馆路 11 号国家体育总局体育科学研究所科技书刊部 王静 收(请在汇款单“附言”中注明订阅杂志的名称、期号和订购数量)

(2) 银行汇款:户名:国家体育总局体育科学研究所,开户行:中国工商银行北京体育馆路支行,账号:0200008109088090158(注明:订阅人姓名,订阅杂志的名称、期号和订购数量)

2. 各地邮局均可订阅:

《中国体育科技》(月刊)邮发代号:82-684

3. 联系电话:010-87182591 E-mail:bjb@ciss.cn