

激活后增强效应研究进展述评

姜自立, 李庆

(清华大学 体育部, 北京 100084)

摘 要: 通过对激活后增强效应相关文献的梳理, 对激活后增强效应的生理机制、影响因素和应用策略等问题进行了述评, 得出如下结论: 肌肉激活后的增强作用源于肌球蛋白调节轻链的磷酸化、高阶运动单位募集能力的增加和肌肉收缩时羽状角的改变。个体因素(肌纤维类型和比例、训练经历、年龄、性别、最大力量、爆发力-力量比)和训练因素(激活方式、激活强度、激活量、恢复时间)都会对肌肉激活后的增强幅度和持续时间产生影响。通过选择与运动专项生物力学特征相似的激活方式、施加与运动员个人特点相匹配的激活负荷、掌握好增强作用与疲劳效应之间的平衡、避免静力性拉伸对激活后增强效应的负面影响, 可以实现激活后增强效应的最优化。

关 键 词: 运动生理学; 激活后增强效应; 发力速度; 爆发力; 竞技体育; 述评
中图分类号: G804.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2016)01-0136-09

A review of developments of researches on postactivation potentiation

JIANG Zi-li, LI Qing

(Department of Physical Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: By collating postactivation potentiation related literature, the authors reviewed issues such as the physiological mechanism, affecting factors and application strategies of postactivation potentiation, and drew the following conclusions: the postactivation potentiation of muscles originates from the phosphorylation of myosin regulatory light chains, the increase of higher order motor unit recruitment ability, and the change of pennation angle when muscles contract; individual factors (muscle fiber types and percentages, training experience, age, gender, maximum strength, explosive power / strength ratio) and training factors (activation manner, activation intensity, activation volume, recovery time) will affect the magnitude and duration of postactivation potentiation of muscles; the optimization of postactivation potentiation can be realized by selecting an activation manner similar to sports event specific biomechanical characteristics, adding an activation load that matches the athlete's individual characteristics, properly controlling the balance between potentiation and fatigue effect, and avoiding the negative effects of static stretching on postactivation potentiation.

Key words: sports physiology; postactivation potentiation; power explosion speed; explosive power; competitive sports; review

肌肉收缩力量是所有运动项目的基础, 尤其是对于短跑、跳跃和投掷等快速力量性项目而言, 肌肉收缩力量的大小将会直接影响比赛的成败。1982 年, 美国生物学家 Manning 等^[1]对大鼠跖伸肌和比目鱼肌施加了张力持续时间为 1 s 的强直刺激后, 发现被刺激肌群的单收缩峰值张力出现了显著增加, 这也是科学家首次观察到肌肉的“激活-增强”现象。1983 年,

Vandervoort 等^[2]在 Manning 等人研究的基础上首次对人体肌纤维的“激活-增强”现象进行了研究, 该实验对受试者的胫骨前肌和跖屈肌施加了 10 s 的等长最大自主收缩(maximal voluntary contraction, MVC)刺激, 同样观测到了被刺激肌群单收缩峰值张力的显著增加。然而, 在 1983—1997 年间, “激活-增强”现象并未引起学术界的足够重视, 研究成果也非常之少。1998

收稿日期: 2015-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(A020503)。

作者简介: 姜自立(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向: 运动训练理论与实践。E-mail: jiangzili2010@163.com

年, Brown 等^[3]正式提出了“激活后增强效应”(postactivation potentiation, PAP)的概念, 并将其定义为“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”。自此以后, PAP 受到了学术界的高度重视, 并进行了大量的研究。前期研究表明, 通过预先的抗阻力量练习可以急性提高不同年龄、性别、项目和运动水平受试者的纵跳高度、加速脉冲、峰值力矩、发力速度、快速反应力量和疾跑速度等运动表现^[4-8]。值得注意的是, 目前尚无文献证明预先的抗阻练习可以急性增加肌肉的最大力量和非负荷下肌肉的最大发力速度。

在学术界不断对 PAP 进行探索的同时, 也有不少国际体能训练专家和教练开始将 PAP 应用于竞技体育实践。在训练中, 他们将抗阻力量训练与超等长练习相结合, 创造了“复合式训练法”(complex training, CP), 以提高运动员爆发力训练的效果^[9]; 在比赛前, 他们将抗阻力量练习与惯常的赛前热身练习相结合, 形成了“PAP 热身方案”, 以提高运动员在随后爆发力项目中的运动表现^[10]。然而, 在过去的 10 多年中, “复合式训练法”已成为了运动训练实践中发展运动员爆发力最为常用和有效的训练手段^[11], 而“PAP 热身方案”却一直未能在赛前热身活动中得到广泛应用。究其原因, 在于影响 PAP 的因素太多, 应用时难以控制。鉴于此, 本研究旨在通过对 PAP 相关文献的综述, 在厘清 PAP 的生理机制和影响因素的基础上, 探讨 PAP 的最优化, 为其在赛前热身活动中的应用提供参考。

1 激活后增强效应的生理机制

1.1 肌球蛋白调节轻链的磷酸化

肌肉收缩时产生张力的大小主要取决于活化的横桥数目, 而肌肉收缩速度的快慢主要取决于能量的释放速度和肌球蛋白 ATP 酶的活性。肌球蛋白分子是一个六聚体, 由两个 H 链(重链)组成, 每条 H 链又包含两条调节轻链(肌肉收缩蛋白), 在每条轻链的肌球蛋白上端都会有一个肌动蛋白和 ATP 的结合位点, 以利于磷酸盐分子的并入^[12]。

调节轻链的磷酸化作用主要由肌球蛋白轻链激酶来催化。在肌肉收缩过程中, 当 Ca^{2+} 从肌质网中释放出来后, 会与钙调节蛋白结合, 这一方面激活了肌球蛋白轻链激酶, 催化肌球蛋白调节轻链的磷酸化, 进而激活肌球蛋白头部的 ATP 酶活性, 使肌球蛋白水解 ATP, 迅速释放能量, 供横桥摆动之用^[13]; 另一方面, 这也改变了肌钙蛋白和原肌球蛋白的构型, 使肌动蛋白分子活性位点暴露, 增加横桥与肌动蛋白之间的相互作用, 拉动粗、细肌丝相互滑行, 最终引起肌肉收

缩^[1]。强烈的肌肉收缩可以增加肌动蛋白和肌球蛋白结合位点对 Ca^{2+} 的敏感性, 增加流向肌质网的 Ca^{2+} 量, 随着 Ca^{2+} 量在细胞膜上的增加, 被激活的 ATP 酶总量也随之增加, ATP 释放能量的速度加快, 最终引起肌肉的收缩速度增大^[9-10, 14-15]。

1.2 高阶运动单位募集能力的提高

高阶或高阈值运动单位是指那些由大运动神经元控制的快缩运动单位。在肌肉收缩的过程中, 运动单位的募集遵循大小原则或有序募集原则, 即在较低强度运动时, 由小运动神经元控制的慢缩运动单位首先被募集; 而当执行的运动对力量需求增加时, 由大运动神经元控制的快缩运动单位才被募集。在惯常的热身方案中, 肌肉所承受的运动强度较小, 仅动员了低阶运动单位, 而高阶运动单位没有被募集。对于短跑、跳跃和投掷等快速力量性项目而言, 必须动员高阶运动单位参与运动才能取得理想的成绩。

在肌肉活动中, 突触前递质的释放数量必须与突触后受体的敏感性相匹配, 才能保证兴奋电位的成功传递, 但由于自主性抑制反应的存在, 在正常反射和自主反应活动中, 电信号在不同突触连接传递失败的现象非常之常见, 而对于高阶运动单位或快缩运动单位而言, 兴奋电位传递失败的可能性更大^[16]。研究表明, 通过预先的肌肉收缩不仅可以增加释放的神经递质数量, 增大神经递质的传输效率或减少兴奋电位在轴突分支处传输失败的可能性^[17], 还可以增加突触后电位的兴奋性, 兴奋的突触后电位增幅越大, 意味着更大的 α 运动神经元膜去极化, 这将使 α 运动神经元更容易达到起始动作电位要求的阈值, 进而增加了募集到高阶运动单位的可能性, 而且这一兴奋的适应性状态能够持续好几分钟^[16-17]。

1.3 肌肉收缩时羽状角的改变

人体骨骼肌可划分为若干个“解剖单位”, 在每个解剖单位上, 如果沿着肌腱轴画出一根直线, 然后再沿着单个肌纤维画出一根直线, 两根直线之间就会形成一个夹角, 在解剖学中, 习惯于把“肌腱线”与“肌纤维线”之间的夹角称之为“乳状角”^[18]。研究表明, 羽状角的变化会影响肌肉力量向结缔组织、肌腱和骨骼的传输。在肌肉收缩过程中, 传输到相关肌腱上的所有单个肌纤维力量总和会随着羽状角的缩小而增加^[19]。因此, 在力量向肌腱传输的过程中, 相对较小的羽状角更具机械效率。

Mahlfeld 等^[20]通过超声波检测了股外侧肌静息时羽状角的变化与力量表现的关系, 结果显示: 在对受试者施加 3 组 3 s 的等长 MVC 刺激后即刻, 羽状角仅由练习前的 16.2° 缩小到练习后的 15.7° , 在等长

MVC 刺激后 3~6 min, 羽状角显著地缩小到了 14.4° ($P < 0.05$), 羽状角的这一改变相当于向肌腱传输的力量增加了 0.9%。因此, 该研究认为, 可能正是羽状角的改变促成了 PAP 的产生, 这一结论也得到了 Reardon 等^[21]研究的支持。

2 激活后增强效应的影响因素

2.1 个体因素对激活后增强效应的影响

1) 肌纤维类型和比例。

在生理学中, 把人类骨骼肌分为 II 型肌纤维和 I 型肌纤维两个大类。一般情况下, II 型肌纤维的肌浆网比 I 型肌纤维发达, 摄 Ca^{2+} 能力也比 I 型肌纤维强 2.5 倍左右。另外, II 型肌纤维中的肌原纤维含量比 I 型肌纤维多, 肌纤维内部的肌球蛋白横桥数目也就比 I 型肌纤维多。因此, 从理论上讲, II 型肌纤维调节轻链的磷酸化作用将会比 I 型肌纤维强, 激活后产生的增强作用也将会比 I 型肌纤维大, 这一假设也得到了 Pääsuke 等^[22]和 Hamada 等^[23]研究的证实。Pääsuke 等^[22]的实验将受试者分为 3 组, 即由 12 名专业短跑和跳跃运动员组成的爆发力组、由 12 名专业长跑运动员组成的耐力组和由 12 名无训练经历者组成的业余组, 并对 3 组受试者的跖屈肌施加 3 s 的等长 MVC 刺激。结果显示, 相对于耐力组和业余组, 爆发力组运动员的发力速度、肌肉的收缩和放松能力都出现了更为显著的增加。很显然, 专业短跑和跳跃运动员的 II 型肌纤维比例要比长跑运动员或无训练经历者高; Hamada 等^[23]则将实验分成了两个阶段, 即在第 1 阶段的试验中, 通过一台与肌电测试仪相连的测力器, 对 20 名男性受试者在 10 s 等长 MVC 刺激中的肌肉收缩反应进行测试, 在第 2 阶段的试验中, 对 4 名增强作用最强和 4 名增强作用最弱的受试者股外肌进行穿刺活检, 以确定其肌纤维类型和比例。该研究结果, 当 II 型肌纤维被动员的比例较高时, 诱导出的增强作用也更为明显。综上, II 型肌纤维的数量和比例与肌肉激活后的增强幅度呈正相关性。

2) 训练经历。

长期的抗阻训练可以使运动员神经中枢的兴奋性、运动单位的募集能力和肌肉对抗疲劳的能力得到显著提高, 而神经-肌肉系统的上述适应性改变正是产生 PAP 的重要生理基础, 因此, 训练经历将会对 PAP 产生影响。

Hamada 等^[24]对具有不同训练经历受试者的 PAP 进行了对比研究, 该实验将受试者分为铁人三项组、长跑组、久坐不动组与控制组, 并对各组受试者的肘关节伸肌和踝关节屈肌施加了 10 s 的等长 MVC 刺激。

结果显示, (1)相对于久坐不动组, 铁人三项运动员的上肢和下肢因经过长期训练, 肘关节伸肌和踝关节屈肌峰值扭矩和发力速度的增强幅度都明显大于久坐不动组; (2)长跑运动员因长期对下肢进行训练, 仅踝关节屈肌峰值扭矩和发力速度获得了增加, 而肘关节并没有出现肌肉力量的增强作用; (3)经常运动组受试者的上肢和下肢都得到了长期训练, 肘关节伸肌和踝关节屈肌的峰值扭矩和发力速度均获得了增加, 但其增强幅度不如铁人三项运动员明显。Chiu 等^[4]对高水平爆发力项目运动员和业余运动员的 PAP 进行了对比试验。结果显示, 5 组 90%1RM 的杠铃深蹲刺激后, 高水平爆发力项目运动员的纵跳高度增加了 2.0%~3.2%, 而业余运动员的纵跳高度却下降了 2%~4%; Rixon 等^[25]研究报道, 相对于无抗阻训练经历的受试者, 在预先的肌肉收缩后, 举重运动员纵跳高度的增加幅度更为明显; Gourgoulis 等^[26]认为, 在抗阻练习后, 仅那些具有抗阻训练经历受试者的纵跳高度才会出现明显增加; Wilson 等^[27]认为, 至少具有 1 年抗阻训练经验的受试者才能诱导出肌肉的增强作用。综上, 训练水平或抗阻训练经历是影响 PAP 的重要因素, 且肌肉激活后的增强幅度在一定程度上与受试者的训练水平或训练经历呈正相关性。

3) 年龄和性别。

除了训练因素外, 肌纤维的类型和比例还会受到年龄和性别等因素的影响, 而肌球蛋白调节轻链的磷酸化作用与肌纤维的类型和比例密切相关。因此, 受试者的年龄和性别也是影响 PAP 的重要因素。

Pääsuke 等^[28]对不同年龄受试者的 PAP 进行了对比实验, 结果显示: 在 5 s 的等长 MVC 刺激后, 19~23 岁组受试者髋部屈肌发力速度的增加幅度优于 16 岁组, 而 16 岁组受试者髋部屈肌发力速度的增加幅度又优于 13 岁组; Arabatzi 等^[29]也得出了类似的结论, 该研究报道, 在 3 组 3 s 等长杠铃深蹲练习激活后, 24~25 岁成年男子组的纵跳高度和发力速度出现了显著增加, 但 10~12 岁和 14~15 岁组青少年的发力速度并没有出现明显变化; Baudry 等^[30]对 10 名 23~47 岁的成年受试者和 10 名 70~85 岁的老年受试者的 PAP 进行了对比实验, 结果显示, 在 6 s 的等长 MVC 刺激后, 成年组和老年组的收缩扭矩和发力速度都获得了显著增加, 但成年组的增幅明显高于老年组。由此可见, 年龄与 PAP 呈“倒 U 字型”关系, 即在成年前, 激活后的增强作用会随着年龄的增长而增加, 而在老年后, 增强增幅会随着年龄的增长而逐渐减弱。

由于肌纤维类型和比例存在性别差异, 且男性的 II 型肌纤维比例一般高于女性, 因此, PAP 也会存在

性别差异。Arabatzis 等^[29]对不同性别受试者的 PAP 进行了对比研究, 对具有 3~6 年抗阻训练经历的 28 名男性受试者和 26 名女性受试者施加了 3 组持续时间为 3 s 的最大等长深蹲刺激。结果显示, 男、女受试者都能诱导出肌肉力量的增强作用, 但男性受试者的增强幅度明显大于女性; Rixon 等^[25]认为, 相对于女性, 男性具有更大的 II 型肌纤维横断面积和更短的收缩时间, 而女性因为单收缩-强直比更低, 肌肉的抗疲劳能力更差, 因此, 女性激活后的增强增幅也会小于男性。

4) 最大力量和力量-爆发力比。

为了研究最大力量对 PAP 的影响, Seitz 等^[8]以最大力量为依据, 将 18 名专业运动员分为了两组, 即把杠铃深蹲 1RM 重量大于 2 倍体重的受试者视为“强壮组”, 而把杠铃深蹲 1RM 重量小于 2 倍体重的受试者视为“瘦弱组”, 并对所有受试者施加了 3 组 90%1RM 杠铃深蹲刺激。结果显示, 强壮组的增强作用明显大于瘦弱组; Kilduff 等^[31]研究报道, 受试者 1RM 值的大小与纵跳高度增加幅度的相关系数为 0.63 ($P < 0.05$); Gourgoulis 等^[26]认为, 在相同负荷刺激下, 运动员的绝对力量越大, 纵跳高度的增幅越明显。

为了研究爆发力-力量比与 PAP 之间的关系, Schneiker 等^[32]的实验将爆发力-力量比小于 19 W/kg 的受试者定义为 Group I, 而将爆发力-力量比大于 19 W/kg 的受试者定义为 Group II。结果显示, Group I 受试者的爆发力-力量比和峰值爆发力增强作用之间呈现高度的负相关 ($r^2=0.91$; $P < 0.05$), 相比之下, Group II 受试者并没有出现爆发力-力量比和峰值爆发力增强作用之间的相关性。以上结果提示, 爆发力-力量比与 PAP 呈负相关性, 即受试者的爆发力-力量比值越大, 激活后的增强作用越不明显, 但关于力量-爆发力比对 PAP 的影响机制目前尚不明确, 有待进一步研究。

2.2 训练学因素对激活后增强效应的影响

1) 激活方式。

在前期研究中, PAP 的激活练习主要包括等长收缩刺激(杠铃等长深蹲、肘关节或膝关节等长 MVC)和等张收缩刺激(杠铃卧推、杠铃深蹲、复合式练习、超等长练习)两种方式。研究表明, 等长收缩刺激和等张收缩刺激都能有效地诱导出肌肉的增强作用^[6, 9, 33-34], 但由于两种激活方式在刺激形式上存在显著差异, 因此, 对 PAP 的影响也必然存在差异。

Rixon 等^[25]对不同激活方式下的 PAP 进行了对比研究。结果显示, 在一组持续时间为 3 s 的杠铃等长深蹲刺激后, 受试者的纵跳高度增加了 2.9%, 峰值爆发力增加了 8.7%; 而在 3RM 的等张杠铃深蹲刺激后, 受试者的纵跳高度并未获得显著增加, 仅峰值爆发力

增加了 8.0%, 因此, 该研究认为, 等长收缩刺激对肌肉的增强作用优于等张收缩刺激; Esformes 等^[34]也对不同肌肉收缩形式刺激下的 PAP 进行了对比实验, 并将受试者分为离心-向心卧推组、离心卧推组、向心卧推组和等长卧推组。结果显示, 等长卧推组受试者峰值爆发力的增强幅度明显大于其他形式收缩组, 因此, 该研究认为, 等长收缩是 PAP 的最佳激活方式; Miarka 等^[35]对传统超等长练习和重抗阻练习的 PAP 进行了对比研究。结果显示, 两者在增强效应上相似, 但传统超等长练习刺激下增强作用的开窗期要短于大负荷抗阻练习刺激下的开窗期。

事实上, 由于等长收缩和等张收缩在刺激强度和量上并不匹配, 因此难以对两者激活后的增强效应进行直接比较。但从前期研究来看, 相对于等长收缩刺激, 研究者们更倾向于选择等张收缩刺激作为 PAP 的诱导方式^[5, 35-36], 一方面, 等张收缩练习的操作程序简单, 刺激负荷相对容易控制; 另一方面, 杠铃卧推、杠铃下蹲和复合式训练是训练实践中惯用的力量练习手段。

2) 激活强度。

练习强度与神经-肌肉系统的反应密切相关, 一般而言, 在进行中-高强度抗阻练习时快肌纤维才能被激活, 且练习强度越高, 募集的快肌纤维越多, 肌肉也就越容易疲劳^[35]。因此, 激活强度也是影响 PAP 的重要因素。

在前期研究中, 25%~100%强度的等长收缩刺激都能成功地诱导出肌肉的增强作用^[7, 34, 37]。为了探索峰值 PAP 的最佳等长刺激强度, Mettler 等^[38]对不同强度等长 MVC 刺激下的 PAP 进行了对比试验。结果表明, 25%、50%和 100% MVC 刺激都能诱导出肌肉的增强作用, 但随着刺激强度的逐渐递增, 增强作用也逐渐明显。值得注意的是, Requena 等^[39]报道, 小于 25%强度的等长 MVC 刺激不能诱导出肌肉的增强作用, 因为过低的刺激强度不能有效地动员快肌纤维参与收缩; Till 等^[12]报道, 100%强度等长 MVC 刺激也不能诱导出肌肉的增强作用, 因为过高的刺激强度容易导致肌肉微细结构损伤, 进而降低力量表现。

在等张收缩条件下, Lowery 等^[7]用 56%~93% 1RM 强度的杠铃深蹲有效地提高了受试者的纵跳高度和爆发力; Esformes 等^[40]用 100% 1RM 强度杠铃深蹲也成功地诱导出肌肉的增强作用; Fukutani 等^[41]为了探索峰值 PAP 的最佳等张刺激强度, 对 45%、60%、75%和 90% 1RM 强度杠铃深蹲刺激下的 PAP 进行了对比研究。结果显示, 45%~90%1RM 强度的杠铃深蹲都能诱导出肌肉的增强作用, 但随着刺激强度的增加, 受

试者的纵跳高度和峰值力矩的增强幅度逐渐明显; Wilson 等^[27]研究认为, 60%~84% 1RM 是峰值 PAP 最为有效的诱导强度, 因为这一强度区间既可以有效地动员高阶运动单位参与运动, 又能避免过高刺激强度造成的肌肉微细结构损伤。值得注意的是, 即使在相同激活方式和激活强度下, 不同动作幅度的激活练习对 PAP 的影响也会不同。Esformes 等^[40]就不同下蹲深度杠铃刺激对受试者纵跳表现的影响进行了对比研究。结果表明, 在相同负荷量和相同负荷强度下, 杠铃 1/2 蹲的 PAP 效果优于杠铃 1/4 蹲。因为相对于杠铃 1/4 蹲, 杠铃 1/2 蹲对臀大肌的激活效果更好, 更有利于增加臀部的角速度和髋、膝、踝关节的活动范围^[42]。

3) 激活量。

在抗阻负荷的刺激下, 肌肉的收缩活动会同时产生疲劳和增强两种效应。当增强作用占主导地位时, 肌肉的收缩历史就会提高随后的爆发力表现; 而当疲劳效应占主导地位时, 肌肉的收缩历史就会损害随后的爆发力表现^[31]。因此, 抗阻练习的重复次数或持续时间是影响肌肉疲劳, 进而影响 PAP 的重要因素。

在前期研究中, 等长收缩刺激主要包括单组刺激和多组刺激两种模式。在单组刺激模式中, Esformes 等^[34]用一组持续时间为 7 s 的等长 MVC 刺激有效地提高了受试者的爆发力和发力速度, Requena 等^[39]用一组持续时间为 10 s 的等长 MVC 刺激也使受试者的纵跳高度得到了显著增加, 但 Pearson 等^[43]发现, 一组持续时间为 5 s 的等长刺激对受试者膝关节峰值力矩的增强作用要明显大于一组 3 s 或一组 7 s 的等长刺激。在多组刺激模式中, Rixon 等^[25]用总张力持续时间为 9 s (3 s × 3) 的等长 MVC 刺激使受试者的纵跳高度获得了显著增加, French 等^[33]用总张力时间为 9 s (3 s × 3) 的等长 MVC 刺激也同样使受试者的爆发力获得了显著提高, 但当总张力持续时间增加至 15 s (5 s × 3) 时, 受试者的爆发力表现没有出现增加。由以上研究可知, 单组等长刺激的持续时间为 5~7 s 为宜, 多组等长刺激的持续时间为 9 s 左右为宜。但值得注意的是, 较长的刺激时间容易导致肌肉的深度疲劳, 进而降低激活后的增强作用。当前, 关于总张力时间相同的单组等长刺激模式和多组等长刺激模式对 PAP 的影响尚不完全清楚, 有待进一步研究。

在等张收缩条件下, Seitz 等^[8]和 Crewther 等^[44]用 1 次杠铃深蹲刺激显著地提高了受试者的爆发力表现, Lim 等^[10]和 West 等^[45]用 3~5 次杠铃深蹲刺激也显著地提高了受试者的爆发力表现, Chatzopoulos 等^[5]用 10 次 90% 1RM 的杠铃深蹲刺激同样也能使受试者的 10 m 和 30 m 疾跑表现获得显著提高。可见, 1~10 次杠铃等张

刺激都能有效地诱导出肌肉的增强作用, 但 Wilson 等^[27]研究表明, 杠铃多次重复刺激下的激活后增强作用要优于杠铃单次刺激。

4) 恢复时间。

事实上, PAP 是指肌肉增强作用与疲劳效应之间的“净差值”, 受试者在激活练习结束后只有经过适当的休息, 肌肉的增强作用才会大于疲劳效应, 肌肉的收缩痕迹也才会对随后的爆发力表现产生积极作用。因此, 恢复时间也是影响 PAP 的重要因素。

Mangus 等^[14]研究报道, 对于训练有素的举重运动员而言, 在抗阻练习结束后短于 3 min 的恢复时间将不足以引起肌肉的增强作用; Wilson 等^[27]研究报道, 抗阻练习结束后 7~10 min 是产生峰值 PAP 最为理想的恢复时间。为了探索产生峰值 PAP 的最佳恢复时间, Kilduff 等^[31]和 Lowery 等^[7]对不同恢复时间的 PAP 进行了对比研究。Kilduff 等^[31]的实验对 23 名职业橄榄球运动员施加了 1 组 3RM 的杠铃深蹲刺激, 并分别在刺激结束后 15 s、4 min、8 min、12 min、16 min 和 20 min 时对受试者的爆发力进行了测试。结果显示, 无论是反映上肢爆发力的“弹力卧推把”高度, 还是反映下肢爆发力的纵跳高度, 都在激活练习结束后 8~12 min 之间达到了峰值, 而当恢复时间少于 4 min 或长于 12 min 时, 爆发力表现并未出现提高; 而 Lowery 等^[7]的研究显示, 对于训练有素的受试者而言, 4~8 min 是最佳的恢复时间, 但当恢复时间超过 12 min 后, 肌肉的增强作用将会消失。由以上研究可知, 4~12 min 的恢复时间都能产生 PAP, 但产生峰值 PAP 的最佳恢复时间存在明显的个体差异性。Pääsuke 等^[23]分别对 12 名爆发力项目运动员、12 名耐力性项目运动员和 12 名业余运动员出现增强作用的恢复时间进行了对比研究。结果显示, 爆发力项目运动员产生 PAP 所需的恢复时间为 5~10 min, 明显长于耐力性运动员的 1~3 min; Gilbert 等^[46]研究发现, 优秀运动员出现 PAP 所需的恢复时间要长于训练水平较低的运动员或业余运动员。

3 激活后增强效应的应用策略

3.1 选择与运动专项生物力学特征相似的激活方式

尽管等长收缩刺激和等张收缩刺激都能有效地诱导出肌肉的增强效应, 但由于两者在激活强度和量上并不匹配, 难以对它们之间的激活负荷和增强效应进行直接比较。因此, 两者孰优孰劣, 难以定论。但从生物力学的视角看, 不同的运动项目具有不同的生物力学特征, 运动时对各肌群参与方式和比例的需求也就不同, 而等长收缩刺激和等张收缩刺激对受试者各

肌群的刺激方式和程度也存在显著差异,这就正好为激活方式的选择提供了依据。大量研究表明,当激活练习在生物力学特征上与专项动作不一致时,就会破坏上一环节中专项练习的神经肌肉状态,对随后的运动表现产生不利影响;而当激活练习与专项动作在生物力学特征上相似时,就会强化上一环节中专项练习的神经肌肉状态,对随后的运动表现产生积极影响^[6, 29]。以上结果提示,教练员应该根据运动项目的生物力学特征选择激活方式。以投掷、短跑和跳跃项目为例,铁饼和链球项目以屈肘内旋的发力方式为主,因此在生物力学特征上与肘关节等长 MVC 刺激方式更为接近;铅球和标枪项目以伸肘外旋的发力方式为主,因此在生物力学特征上与杠铃卧推练习更为接近;依此类推,短跑和跳跃项目在生物力学特征上与杠铃深蹲练习更为接近。由于短跑、跳跃项目高度依赖于髋部肌群的发力,因此,杠铃全蹲的激活效果必定要优于杠铃 1/2 蹲和 1/4 蹲的激活效果^[42]。综上,选择与运动专项生物力学特征相似的激活方式是实现 PAP 最佳化的基本前提。

3.2 施加与运动员个人特点相匹配的激活负荷

最佳激活负荷既与运动员的肌纤维类型和比例、年龄、性别、力量水平等个体因素有关,同时也会受到激活负荷强度和负荷量之间的相互影响。因此,如何选择与运动员个人特点相适宜的激活负荷是 PAP 应用于运动实践的一个亟待解决的难题。事实上,刺激负荷的选择也有规律可循。一般而言,较大的激活强度通常应用于具有较高力量水平的运动员身上,因为力量水平越高,运动时所能募集到的高阶运动单位就越多。具体而言,对于高水平爆发力项目运动员而言,刺激强度一般应该大于 85%1RM 或大于 2 倍体重^[8];而较多的重复次数或较长的刺激时间往往应用于训练有素的运动员身上,因为长年的训练增强了肌肉的抗疲劳能力。在诱导强度和量的组合上,70%~80%强度的等长刺激通常配以 5~7 s 的持续时间,当刺激强度增至 80%~90%时,持续时间应降至 3~5 s 为宜^[37];60%~85% 1RM 杠铃等张刺激通常配以 4~5 次重复,但当刺激强度增至 86%~93% 1RM 时,重复次数也应降至 1~3 次为宜^[27]。在运动实践中,高水平运动员在赛前的热身内容、强度、量和顺序上一般都会按照训练时的惯常程序进行。因此,教练员应该根据运动员的个体情况,在日常训练中通过反复尝试或测试,以确定能产生峰值 PAP 的激活负荷,这也成为了当前最为切实可行的策略。

3.3 掌握好增强作用和疲劳效应之间的平衡

“开窗期”是指增强作用大于疲劳效应的时距。

在“激活-增强”练习中,一般会出现两个开窗期。第 1 开窗期出现在激活练习的初始阶段,但由于该阶段的刺激负荷较低,增强作用并不明显,持续时间也较短,因此,不建议将爆发力活动安排在此阶段进行;随着激活负荷的递增,肌肉的疲劳效应会逐渐占据主导地位,若在此时进行爆发力活动,必然会降低运动表现;在激活练习结束后,经过几分钟的休息,肌肉的疲劳效应会逐渐消退,增强作用将重新占据主导地位,出现第 2 开窗期,若将爆发力活动安排在此时进行,必然有利于运动表现的提高。更为重要的是,第 2 开窗期的增强作用比第 1 开窗期明显,持续时间也更长。

然而,如何准确把握开窗期是 PAP 应用于运动实践时另一个亟待解决的难题。事实上,增强效应出现的早与晚,持续时间的长与短,都取决于增强作用与疲劳效应之间的平衡,这种平衡既会受到训练因素的影响,也会受到个体因素的影响^[31]。一般而言,开窗期会出现在诱导练习结束后 4~12 min,但训练有素的爆发力项目运动员的增强作用出现时间相对较晚,即刺激后所需要的恢复时间更长,开窗期的持续时间也相对较长;而业余运动员或耐力性项目运动员的增强作用出现时间相对较早,刺激后所需的恢复时间也相对较短,开窗期的持续时间相对较短或根本不存在开窗期^[4]。低负荷刺激虽只会引起较弱的疲劳,但也只能产生较小的增强作用,增强作用的出现时间相对较早,刺激后所需要的恢复时间相对较短,开窗期的持续时间也相对较短;高负荷刺激可能会诱导更大的增强作用,但也会导致更深的疲劳,增强作用的出现时间相对较晚,刺激后所需要的恢复时间也相对较长,开窗期的持续时间也较长^[7]。

3.4 避免静力性拉伸对激活后增强效应的负面影响

将诱导练习与惯常的热身方案相结合,形成“PAP 热身方案”,是 PAP 应用于赛前实践的最后一个步骤。在运动训练实践中,赛前惯常的热身方案一般包括“有氧练习+(静力性)拉伸+专项练习”3个环节^[47]。因此,将诱导练习置于传统热身方案中的恰当位置是发挥最佳增强作用的关键。由于有氧练习、(静力性)拉伸、专项练习都是运动训练和比赛前热身方案中防止运动损伤、增加关节活动范围、提高运动表现的必要环节,因此,“PAP 热身方案”也应包括上述环节。然而大量研究证实,静力性拉伸可能会引起神经抑制、肌肉松弛、运动单位募集能力的急性下降,从而对肌肉力量或爆发力表现产生负面影响。换言之,静力性拉伸可能会抵消或降低激活后的增强作用。因此,在“PAP 热身方案”中应尽量避免使用静力性拉伸。然而,静

力性拉伸作为赛前热身方案中应用最为广泛的拉伸方式,与诱导练习同时存在于准备活动中的情况也在所难免。因此,若赛前“PAP热身方案”中包含静力性拉伸环节,教练员应将静力性拉伸与激活练习分割开来,即热身方案应按照“有氧练习+静力性拉伸+专项练习+激活练习”的内容和顺序进行。

肌肉激活后的增强效应是一种客观存在的生理现象,虽然其力量表现的增强幅度和开窗期的持续时间会受到诸多个体因素和训练学因素的影响,在应用于赛前热身活动时非常难以掌控,但通过选择与运动专项生物力学特征相似的激活方式、施加个性化的激活负荷、控制好增强作用与疲劳效应之间的平衡、避免静力性拉伸对增强作用的负面影响,可以实现激活后增强效应的最优化。

在前期研究中,尽管学者们已经对PAP进行了大量的研究,但关于不同强度和量组合的激活练习对PAP及其开窗期的影响、总负荷相同的单组激活模式和多组激活模式对PAP及其开窗期的影响、相同力量水平且具有不同训练经历对PAP的影响及机制、力量-爆发力比对PAP的影响及其机制等问题的认识上仍存在一些盲区,有待进一步探析。另外,将来关于PAP的研究只有从实验室走出来,将其安排在模拟竞赛条件下进行,才能真正发挥理论研究对训练实践的指导作用。

参考文献:

[1] MANNING D R, STULL J T. Myosin light chain phosphorylation-dephosphorylation in mammalian skeletal muscle[J]. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 1982, 242(3): C234-C241.

[2] VANDERVOORT A A, QUINLAN J, MCCOMAS A J. Twitch potentiation after voluntary contraction[J]. *Experimental Neurology*, 1983, 81(1): 141-152.

[3] BROWN I E, LOEB G E. Post-activation potentiation—a clue for simplifying models of muscle dynamics[J]. *American Zoologist*, 1998, 38(4): 743-754.

[4] CHIU L Z, FRY A C, WEISS L W, et al. Postactivation potentiation response in athletic and recreationally trained individuals[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2003, 17(4): 671-677.

[5] CHATZOPOULOS D E, MICHAILIDIS C J, GIANNAKOS A K, et al. Postactivation potentiation effects after heavy resistance exercise on running speed[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2007, 21(4): 1278-1281.

[6] WEBER K R, BROWN L E, COBURN J W, et al. Acute effects of heavy-load squats on consecutive squat jump performance[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2008, 22(3): 726-730.

[7] LOWERY R P, DUNCAN N M, LOENNEKE J P, et al. The effects of potentiating stimuli intensity under varying rest periods on vertical jump performance and power[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2012, 26(12): 3320-3325.

[8] SEITZ L B, DE Villarreal E S, HAFF G G. The temporal profile of postactivation potentiation is related to strength level[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2014, 28(3): 706-715.

[9] EBBEN W P, WATTS P B. A review of combined weight training and plyometric training modes: complex Training[J]. *Strength & Conditioning Journal*, 1998, 20(5): 18-27.

[10] LIM J J, KONG P W. Effects of isometric and dynamic postactivation potentiation protocols on maximal sprint performance[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2013, 27(10): 2730-2736.

[11] EBBEN W P. Complex training: a brief review[J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2002, 1(2): 42-46.

[12] TILL K A, COOKE C. The effects of postactivation potentiation on sprint and jump performance of male academy soccer players[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2009, 23(7): 1960-1967.

[13] HODGSON M J, DOCHERTY D, ZEHR E P. Postactivation potentiation of force is independent of h-reflex excitability[J]. *International Journal of Sports Physiology And performance*, 2008, 3(2): 219-225.

[14] MANGUS B C, TAKAHASHI M, MERCER J A, et al. Investigation of vertical jump performance after completing heavy squat exercises[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2006, 20(3): 597-600.

[15] KILDUFF L P, OWEN N, BEVAN H, et al. Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2008, 26(8): 795-802.

[16] Lüscher H R, RUENZEL P, HENNEMAN E. Composite EPSPs in motoneurons of different sizes before and during PTP: implications for transmission failure and its relief in Ia projections[J]. *Journal of Neuro-*

- physiology, 1983, 49(1): 269-289.
- [17] ENOKA R M. Neuromechanics of human movement[M]. Champaign, IL: Human kinetics, 2008.
- [18] LEDOUX W R, HIRSCH B E, Church T, et al. Pennation angles of the intrinsic muscles of the foot[J]. Journal of Biomechanics, 2001, 34(3): 399-403.
- [19] FOLLAND J P, Williams A G. Morphological and neurological contributions to increased strength[J]. Sports Medicine, 2007, 37(2): 145-168.
- [20] MAHLFELD K, FRANKE J, Awiszus F. Post-contraction changes of muscle architecture in human quadriceps muscle[J]. Muscle & Nerve, 2004, 29(4): 597-600.
- [21] REARDON D, HOFFMAN J R, MANGINE G T, et al. Do changes in muscle architecture affect post-activation potentiation?[J]. Journal of Sports Science & Medicine, 2014, 13(3): 483-491.
- [22] Pääsuke M, ERELINE J, GAPEYEVA H. Twitch contractile properties of plantar flexor muscles in power and endurance trained athletes[J]. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 1999, 80(5): 448-451.
- [23] HAMADA T, SALE D G, MACDOUGALL J D, et al. Postactivation potentiation, fiber type, and twitch contraction time in human knee extensor muscles[J]. Journal of Applied Physiology, 2000, 88(6): 2131-2137.
- [24] HAMADA T, SALE D G, MACDOUGALL J D. Postactivation potentiation in endurance-trained male athletes.[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2000, 32(2): 403-411.
- [25] RIXON K P, LAMONT H S, BEMBEN M G. Influence of type of muscle contraction, gender, and lifting experience on postactivation potentiation performance[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2007, 21(2): 500-505.
- [26] GOURGOULIS V, AGGELOUSSIS N, KASIMATIS P, et al. Effect of a submaximal half-squats warm-up program on vertical jumping ability.[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2003, 17(2): 342-344.
- [27] WILSON J M, DUNCAN N M, MARIN P J, et al. Meta-analysis of postactivation potentiation and power: effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2013, 27(3): 854-859.
- [28] Pääsuke M, ERELINE J, GAPEYEVA H. Twitch contraction properties of plantar flexor muscles in pre-and post-pubertal boys and men[J]. European Journal of Applied Physiology, 2000, 82(5-6): 459-464.
- [29] ARABATZI F, PATIKAS D, ZAFEIRIDIS A, et al. The post-activation potentiation effect on squat jump performance: age and sex effect.[J]. Pediatric Exercise Science, 2014, 26(2): 187-194.
- [30] BAUDRY S, KLASS M, DUCHATEAU J. Postactivation potentiation influences differently the nonlinear summation of contractions in young and elderly adults[J]. Journal of Applied Physiology, 2005, 98(4): 1243-1250.
- [31] KILDUFF L P, BEVAN H R, KINGSLEY M I, et al. Postactivation potentiation in professional rugby players: optimal recovery[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2007, 21(4): 1134-1138.
- [32] SCHNEIKER K T, BILLAUT F, BISHOP D. The effects of preloading using heavy resistance exercise on acute power output during lower-body complex training[C]. 2006.
- [33] FRENCH D N, KRAEMER W J, COOKE C B. Changes in dynamic exercise performance following a sequence of preconditioning isometric muscle actions[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2003, 17(4): 678-685.
- [34] ESFORMES J I, KEENAN M, MOODY J, et al. Effect of different types of conditioning contraction on upper body postactivation potentiation[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2011, 25(1): 143-148.
- [35] MIARKA B, DEL VECCHIO F B, FRANCHINI E. Acute effects and postactivation potentiation in the special judo fitness test[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2011, 25(2): 427-431.
- [36] KILDUFF L P, CUNNINGHAM D J, OWEN N J, et al. Effect of postactivation potentiation on swimming starts in international sprint swimmers[J]. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2011, 25(9): 2418-2423.
- [37] JUBEAU M, GONDIN J, MARTIN A, et al. Differences in twitch potentiation between voluntary and stimulated quadriceps contractions of equal intensity[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2010, 20(1): e56-e62.

- [38] METTLER J A, GRIFFIN L. Postactivation potentiation and muscular endurance training[J]. *Muscle & nerve*, 2012, 45(3): 416-425.
- [39] REQUENA B, GAPEYEVA H, GARCIA I, et al. Twitch potentiation after voluntary versus electrically induced isometric contractions in human knee extensor muscles[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, 104(3): 463-472.
- [40] ESFORMES J I, BAMPOURAS T M. Effect of back squat depth on lower-body postactivation potentiation[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2013, 27(11): 2997-3000.
- [41] FUKUTANI A, TAKEI S, HIRATA K, et al. Influence of the intensity of squat exercises on the subsequent jump performance[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2014, 28(8): 2236-2243.
- [42] DOMIRE Z J, CHALLIS J H. The influence of squat depth on maximal vertical jump performance[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2007, 25(2): 193-200.
- [43] PEARSON S J, HUSSAIN S R. Lack of association between postactivation potentiation and subsequent jump performance[J]. *European Journal of Sport Science*, 2014, 14(5): 418-425.
- [44] CREWETHER B T, KILDUFF L P, COOK C J, et al. The acute potentiating effects of back squats on athlete performance[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2011, 25(12): 3319-3325.
- [45] WEST D J, CUNNINGHAM D J, CREWETHER B T, et al. Influence of ballistic bench press on upper body power output in professional rugby players[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2013, 27(8): 2282-2287.
- [46] GILBERT G, LEES A. Changes in the force development characteristics of muscle following repeated maximum force and power exercise[J]. *Ergonomics*, 2005, 48(11-14): 1576-1584.
- [47] BEHM D G, CHAOUACHI A. A review of the acute effects of static and dynamic stretching on performance[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2011, 111(11): 2633-2651.

