

竞技健美操 PAP 干预策略研究述评：时序效应与表现优化的协同机制及实践启示

易 均 李 南*

长春师范大学体育学院, 吉林 长春 130032

[摘要] 本研究通过系统分析 2015—2025 年间与后激活增强效应 (PAP) 相关的文献, 结合 FIG 2022—2024 周期新规则要求, 探讨 PAP 干预在竞技健美操中的时序效应与表现优化协同机制。分析发现, PAP 通过改善神经肌肉适应性和生物力学效率, 显著提升难度动作完成度与艺术表现稳定性。实践层面提出基于规则导向的分段介入策略和动态监控体系, 为竞技健美操科学化训练提供理论支持。

[关键词] PAP 干预; 竞技健美操; 时序效应; 运动表现

DOI: 10.33142/jscs.v5i2.16242

中图分类号: G4

文献标识码: A

Review of Research on PAP Intervention Strategies in Competitive Aerobics: the Collaborative Mechanism and Practical Implications of Temporal Effects and Performance Optimization

YI Jun, LI Nan*

College of Physical Education, Changchun Normal University, Changchun, Jilin, 130032, China

Abstract: This study systematically analyzed the literature related to Post Activation Enhancement Effect (PAP) from 2015 to 2025, and combined with the new rules of FIG 2022-2024 cycle, explored the temporal effects and performance optimization synergistic mechanism of PAP intervention in competitive aerobics. Analysis found that PAP significantly improves the completion of difficult movements and artistic expression stability by improving neuromuscular adaptability and biomechanical efficiency. At the practical level, a rule-based segmented intervention strategy and dynamic monitoring system are proposed to provide theoretical support for the scientific training of competitive aerobics.

Keywords: PAP intervention; competitive aerobics; temporal effect; athletic performance

引言

FIG 2022—2024 周期规则强化了对动作完成度与艺术表现的评分权重^[4]。竞技健美操作为高爆发力项目, 需在短时间内完成多组复合动作, PAP 通过预激活快肌纤维募集能力, 成为提升动作质量的关键工具^[1]。现有研究对 PAP 干预的负荷强度阈值与恢复间歇存在显著分歧^[2]。此外, 艺术表现指标的 PAP 响应机制尚未明确^[3], 导致训练实践缺乏针对性。

本文整合生理学、生物力学与规则评分体系, 构建“时序调控-表现维度-规则响应”的三元协同模型, 为突破理论与实践的脱节提供新视角。

1 文献述评体系构建

1.1 文献检索与筛选

为整合后激活增强效应 (PAP) 在竞技健美操领域的理论与实践成果, 本研究采用文献资料法, 以 Web of Science、CNKI 为数据库, 以“post-activation potentiation”OR“后激活增强效应”“aerobics gymnastics”OR“竞技健美操”为关键词进行检索, 筛选 2015—2025 年间相关文献, 为本文的撰写提供理论支持。

1.2 分析维度

基于竞技健美操项目特性与 FIG 规则要求, 本研究从以下四个维度构建分析框架, 旨在系统揭示 PAP 干预的多

层次效应, 如表 1 所示。

表 1 分析维度

维度	关键发现	文献支持
生理机制	PAP 通过肌球蛋白轻链磷酸化增强钙离子敏感性, 提升快肌纤维募集效率	Taylor-Burt 等 (2020)
时间窗口	最佳干预窗口为负荷后 4~8min, 超出 12min 后效应衰减显著	刘圣圣等 (2019)
表现类型	PAP 对难度动作完成度 (+8.3%) 的提升优于艺术表现 (+4.1%)	Ma 等 (2024)
个体差异	男性运动员对高负荷 ($\geq 80\%1RM$) 响应更显著, 女性需延长恢复间歇	何卫等 (2017)

1.2.1 生理机制

聚焦 PAP 的生物学基础, 尤其是肌球蛋白轻链磷酸化 (MLCP) 对钙离子敏感性的调节作用^[6]。研究表明, MLCP 通过增强快肌纤维 (II 型) 横桥循环速率, 缩短肌肉收缩潜伏期约 12% ($p < 0.01$), 直接影响爆发力输出效率。该维度为理解 PAP 的时效性提供了分子层面的解释。

1.2.2 时间窗口

整合现有研究对 PAP 效应峰值时间的分歧, 提出“动态窗口”概念。研究发现, 4~8 分钟为下肢爆发力增益的最佳窗口^[4], 但上肢肌群的峰值响应延后至 6 分钟^[3]。此外, 神经疲劳阈值如血乳酸浓度 $> 4mmol/L$ 会缩短有效窗口期, 需结合个体恢复能力调整时序^[2]。

1.2.3 表现类型

依据 FIG 规则对难度动作 (D-score) 与艺术表现 (A-score) 的差异化评分, 量化 PAP 的异质性影响。有研究显示, PAP 对难度动作完成度的提升 (+8.3%) 显著高于艺术表现 (+4.1%), 可能与快肌纤维募集对爆发力动作的优先支持有关^[5]。这一发现为分段干预策略提供了理论依据。

1.2.4 个体差异

强调性别、训练水平与基因多态性对 PAP 效应的调节作用。男性运动员因睾酮水平较高, 对大于 80%1RM 高负荷的响应更显著, 而女性需延长恢复间歇以平衡雌激素对疲劳代谢的影响^[2]。此外, 高水平运动员的神经适应能力更强, PAP 效应持续时间延长约 2 分钟^[1]。

2 协同机制解构

2.1 生物力学耦合机制

基于赵蕊^[1]关于 PAP 效应对跳马运动员下肢爆发力影响的研究, 可进一步探讨 PAP 干预对竞技体操 C 组难度动作的优化机制。研究发现, PAP 通过增强神经肌肉激活效率与运动单位募集能力, 显著提升下肢动力学表现: 其一, 踝关节刚度增加约 15% ($p < 0.05$), 表现为踝关节在踏跳阶段的弹性势能储存与释放效率提高, 减少了能量耗散, 从而优化了垂直力传导路径; 其二, 地面反作用力峰值提升 12% ($p < 0.01$), 这与股四头肌和腓肠肌积分肌电值的同步增长密切相关, 表明肌肉收缩速度与力量的急性增强。上述生物力学改善直接作用于躯体分腿跳的腾空阶段, 实验数据显示, 受试者在 PAP 干预后腾空高度平均增加 $8.3 \pm 1.2\text{cm}$, 且动作完成质量评分 (E-score) 提高 0.5 分。这一现象可归因于 PAP 诱导的肌球蛋白轻链磷酸化效应与运动神经元兴奋性提升的双重作用, 其效果在干预后 4~8 分钟达到峰值, 与跳马踏跳阶段的优化窗口期一致。研究建议将 60° 膝关节角度、90% 1RM 连续 5 次的颈后蹲作为 PAP 标准化干预方案, 结合 4 分钟恢复间歇, 可系统性提升体操运动员爆发力主导型动作的竞技表现。

FIG 规则对“静态姿势保持”的要求需要结合后激活增强效应 (PAP) 恢复期的神经疲劳阈值来调整干预时序^[4]。这主要是因为 PAP 机制在高强度肌肉收缩后, 会在一定时间内短暂增强肌肉的爆发力和收缩能力, 而随后进入神经疲劳阶段。学者刘圣圣通过研究表明^[4], 不同运动员在不同时间点的 PAP 效应表现存在差异, 在竞技健美操运动中, PAP 影响的最佳时间域通常出现在 8~12 分钟之间。因此, 在竞技健美操等需要精确控制动作质量的运动项目中, 教练员和运动员应结合个体神经肌肉疲劳的恢复情况, 合理安排 PAP 干预时间, 以确保运动员在 FIG 规则要求的静态姿势保持过程中, 能够最大限度地发挥肌肉控制能力, 避免因疲劳导致动作质量下降或失误。

2.2 神经肌肉适应路径

PAP 的神经肌肉适应机制具有时序特异性与肌群异

质性。肌电图分析显示, 干预后 6 分钟肱二头肌积分肌电值提升 20%^[3], 但艺术表现相关肌群的响应滞后约 2~3 分钟, 需差异化设计负荷方案。这一差异可能是因为快肌纤维对 PAP 的高敏感性使其在干预后迅速激活, 而慢肌纤维主导的姿势控制肌群则需更长时间达到峰值响应^[2], 又或者是由于高负荷 PAP 干预通过增强运动皮层兴奋性, 优先优化爆发力相关神经通路, 而低负荷模式则通过小脑-脊髓环路调节耐力与协调性^[6], 从而导致艺术表现相关肌群响应滞后。因此, 针对这一特性, 在难度动作训练阶段采用 85%1RM×3 组, 间歇 4 分钟的高负荷短间歇模式进行练习, 以强化神经驱动效率; 而在过渡段训练中采用 60%1RM×2 组, 间歇 8 分钟的低负荷长间歇模式进行练习, 以平衡疲劳积累与艺术表现稳定性^[2]。此外, 结合实时肌电反馈技术, 可动态调整干预时序, 确保神经适应与动作编排的精准匹配。

2.3 规则响应特性

新规则对“动作停顿”扣分条款的细化要求, 使得 PAP 干预策略需与成套动作结构合理匹配, 以优化竞技健美操运动员的表现。根据 Ma Dong^[5]等人的研究, 在竞技健美操训练中, 不同负荷和间歇时间的安排对有氧、无氧能力以及跳跃能力的影响各异。因此, 在 PAP 干预策略的设计上, 难度动作集宜采用 85%1RM×3 组、间歇 4min 高负荷短间歇模式, 以激活神经肌肉系统, 提高爆发力和快速收缩能力; 而过渡段则适合采用 60%1RM×2 组、间歇 8min 的低负荷长间歇模式, 以减少疲劳积累, 提升整体动作连贯性和耐力。研究表明^[5], 高强度间歇跳跃训练 (JIT) 在提高无氧能力和跳跃表现方面较传统的高强度跑步间歇训练 (HIIT) 更具优势, 这表明在 PAP 干预时应优先采用与健美操动作特征相匹配的训练模式, 以确保运动员在完成成套动作时既能保持高质量的技术动作, 又能符合 FIG 规则对动作连贯性和停顿时间的要求。

3 实践启示体系

3.1 训练设计原则

3.1.1 分段介入策略

根据成套动作编排, 将 PAP 干预分为“爆发期” (如高难度跳跃组合前) 与“维持期” (如过渡段或静态姿势保持阶段), 分别匹配不同负荷强度。在“爆发期”, 采用高负荷短间歇模式, 通过激活快肌纤维募集能力, 显著提升踝关节刚度与地面反作用力峰值^[1], 从而优化腾空高度与动作完成质量。而在“维持期”, 则切换至低负荷长间歇模式, 以降低神经疲劳累积, 确保动作连贯性与艺术表现稳定性^[5]。

3.1.2 性别差异化方案

结合激素水平与代谢特征, 如表 2 所示。男性运动员因睾酮对高负荷的敏感性强, 可采用 85%1RM 并缩短恢复时间至 4~6 分钟; 而女性运动员受雌激素对疲劳代谢的影响, 建议采用 75%1RM 并延长间歇至 8~10 分钟^[2]。实

践中,教练员可结合运动员的基因多态性进一步优化负荷阈值,以提升个体化适配效果^[6]。

表 2 不同性别运动员 PAP 负荷强度与恢复时间对照表

参数	男性运动员	女性运动员	差异显著性 (p 值)
最佳负荷强度	85%1RM	75%1RM	<0.05*
恢复时间阈值	4-6min	8-10min	<0.01**
EMG 响应峰值延迟	5.2±0.8min	7.1±1.2min	<0.05*
血乳酸阈值	4.2±0.5mmol/L	3.8±0.6mmol/L	>0.05

数据来源:何卫等^[2]的性别差异研究、张霞等^[3]的生理指标分析。

注释:*p<0.05,**p<0.01;EMG 数据基于肱二头肌积分肌电值^[3]。

3.2 监控指标体系

生物力学与生理学指标的动态整合是科学化训练的关键。通过三维动作捕捉系统实时监测踝关节角度变化与腾空高度,可量化 PAP 对动作质量的即时影响^[1]。同时,血乳酸清除率与主观疲劳量表的联合评估,能够精准判断神经疲劳阈值,避免过度负荷导致动作失误^[3]。值得注意的是,规则关联模型的引入可显著提升训练效率,如在落地偏移距离>0.2m 时触发预警系统,结合扣分项预测算法,帮助运动员在训练中即时修正技术细节^[4]。未来可进一步融合人工智能技术,通过机器学习分析历史数据,动态生成个性化干预建议。

3.3 周期调控策略

PAP 干预的周期化设计应紧密围绕竞赛日程与运动员状态。在赛季准备期,以高负荷训练为主,重点提升基础力量与神经适应能力^[1]。进入竞赛期后,需优化时序匹配,将 PAP 干预窗口精准控制在负荷后 6 分钟,以确保难度动作集的峰值效应与 FIG 规则要求的动作节奏同步^[4]。此外,低负荷模式在恢复期的应用可维持肌肉激活水平,同时避免过度训练风险。实践中,教练团队需结合运动员的生理周期与伤病史动态调整方案,特别是女性在黄体期适当降低负荷强度,以减少雌激素波动对疲劳累积的负面影响^[2]。这一多维调控策略不仅契合竞技健美操的项目特性,也为长期运动表现提升提供了可持续路径。

4 结语

本文系统分析 PAP 干预策略的生理机制与规则响应

特性,揭示其通过增强快肌纤维募集及动态时间窗口调控,显著提升竞技健美操难度动作完成度(+8.3%)与艺术表现稳定性(+4.1%)。构建“时序-表现-规则”协同模型,提出分段介入策略(高/低负荷模式)及性别差异化方案(男性 85%1RM/4~6min,女性 75%1RM/8~10min),并强调动态监控对规避疲劳的重要性。本文局限性包括个体基因差异验证不足及部分数据预测性特征。未来需结合人工智能优化个性化干预,深化慢肌响应机制与动作阈值研究,以完善训练体系,助力 FIG 规则下的运动表现突破。

[参考文献]

- [1]赵蕊.后激活增强效应对跳马运动员助跑与踏跳影响的实验研究[D].太原:中北大学,2022.
 - [2]何卫,汤仁圣,张霞,等.预激活增强效应对优秀女子体操运动员跳马助跑的影响[J].体育科学,2017,37(12):7-13.
 - [3]张霞,何卫,宋湘勤,等.预激活增强效应对优秀女体操运动员跳马体能与心理的影响[J].湖北体育科技,2016,35(12):1088-1092.
 - [4]刘圣圣,张亚玲,许寿生,等.后激活增强效应(PAP)干预竞技健美操躯体分腿跳最佳时间阈探究[A].第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编[C].北京:中国体育科学学会,2019.
 - [5]Ma D,Silva R M,Xu Q,et al. Jump Interval Training: An Effective Training Method for Enhancing Anaerobic, Aerobic, and Jump Performances in Aerobic Gymnastics[J]. Journal of Sports Science & Medicine,2024,23(2):410.
 - [6]Taylor-Burt K R,Konow N,Biewener A A.Post-activation muscle potentiation and its relevance to cyclical behaviours[J].Biology Letters,2020,16(6):20200255.
- 作者简介:易均(2002—),女,汉族,江西宜春,硕士在读,长春师范大学体育学院,研究方向:社会体育指导;
*通讯作者:李南(1981—),男,汉族,吉林长春,博士,副教授,长春师范大学体育学院,研究方向:学校体育与全民健身。