

## 军事训练致肌肉疲劳的评估标准研究进展

畅正阳<sup>1,2</sup>, 刘明丽<sup>1</sup>, 李子键<sup>1,2</sup>, 高建朋<sup>1,2</sup>, 刘建恒<sup>1,2</sup>, 李明<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>解放军总医院第四医学中心骨科医学部, 北京 100048; <sup>2</sup>国家骨科与运动康复临床医学研究中心, 北京 100853

**摘要:**军事训练引发的肌肉疲劳直接影响训练效能与损伤风险, 亟需建立科学的评估体系。本文围绕肌肉疲劳产生机制, 归纳了适用于军事训练的主观评估方法与客观检测方法, 并分析其适用性与局限性; 同时总结了可穿戴生物传感器、超声成像等现代监测技术的应用现状与发展趋势。分析表明, 当前军事训练肌肉疲劳评估尚缺乏统一、多维度的“金标准”; 随着传感技术进步, 构建精准、实时、契合实战化需求的评估体系, 将有助于优化训练实施、降低损伤风险并提升训练效能。

**关键词:**军事人员; 肌肉疲劳; 体能训练; 可穿戴设备; 军事医学

中图分类号: R87

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)12-1206-06

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25050901

引用本文: 畅正阳, 刘明丽, 李子键, 等. 军事训练致肌肉疲劳评估标准的研究进展 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (12): 1206-1211.

### Research advances in assessment standards for muscle fatigue induced by military training

CHANG Zhengyang<sup>1,2</sup>, LIU Mingli<sup>1</sup>, LI Zijian<sup>1,2</sup>, GAO Jianpeng<sup>1,2</sup>, LIU Jianheng<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopedics, the Fourth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100048, China; <sup>2</sup>National Clinical Research Center for Orthopedics, Sports Medicine & Rehabilitation, Beijing 100853, China

Corresponding author: LI Ming. Email: liming891215@163.com

**Abstract:** Muscle fatigue induced by military training directly affects training effectiveness and injury risk, highlighting the urgent need for a scientifically validated assessment system. This review focuses on the mechanisms underlying muscle fatigue and summarizes subjective evaluation methods and objective detection techniques applicable to military training scenarios, along with an analysis of their respective advantages and limitations. The application status and development trends of modern monitoring technologies—such as wearable biosensors and ultrasound imaging—are also discussed. The analysis indicates that current muscle fatigue assessment in military training lacks a unified, multidimensional "gold standard." With advances in sensor technology, establishing a precise, real-time assessment system tailored to actual combat training requirements will facilitate optimized training implementation, reduce injury risks, and enhance overall training efficacy.

**Keywords:** military personnel; muscle fatigue; physical training; wearable devices; military medicine

**Cited as:** Chang ZHY, Liu ML, Li ZJ, et al. Research advances in assessment standards for muscle fatigue induced by military training[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(12): 1206-1211.

军事训练是维持和提升部队作战能力的关键环节, 但其高强度、高复杂性的特点极易导致参训人员出现肌肉疲劳。肌肉疲劳是一种具有保护意义的生理现象, 是机体为避免过度损伤而启动的一种自我保护机制。适度的肌肉疲劳能够促使训练人员在运动后进行合理的调整与恢复。如果战斗员频繁且长时间处于肌肉疲劳状态, 军事训练伤发生的风险也会随之增加<sup>[1]</sup>。据统计, 我军因

肌肉疲劳所致肌骨损伤的发病率为 10.8%~50.5%, 外军为 12.5%~58.5%<sup>[2]</sup>。因此, 有效评估因训练产生的肌肉疲劳, 有助于及早调整训练计划, 降低训练伤害, 从而增强部队的作战能力。国内外对训练疲劳的研究较多, 以美军为代表的国外主要军事强国正致力于将可穿戴技术和数字化监测系统深度融合到训练实践中。我军也在积极推动训练理念的更新, 在量化评分和智能检测方面进行了许多有益探索, 提出包括《军事训练疲劳评估与恢复专家共识计划书》在内的诸多标准<sup>[3]</sup>。目前肌肉疲劳评定方法的相关研究多以体育运动员为研究对象; 而军事训练与专项运动员的训练在

收稿日期: 2025-05-09

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2504300)

第一作者: 畅正阳, 在读硕士。Email: changzhengyang01@163.com

通信作者: 李明, 博士, 副主任医师。Email: liming891215@163.com

com

性质和要求上存在显著差异,导致两者在肌肉疲劳的评估标准上难以完全趋同,仍缺乏契合军事训练、包含主客观多维度指标的“金标准”<sup>[2]</sup>。因此,探究肌肉疲劳产生的机制,总结检测肌肉疲劳的指标和方法,可以有效鉴别并诊断肌肉疲劳,实现针对军事训练导致肌肉疲劳的快速检测评估。

## 1 肌肉疲劳的定义及产生机制

肌肉疲劳指肌肉在持续收缩后产生的暂时性功能下降状态,原因是长时间负荷运动后乳酸堆积,机体暂时无法维持所需力量输出,通常出现在体力活动或锻炼之后,主观上表现为乏力与酸痛感,客观则多表现为最大自主收缩力降低<sup>[4]</sup>。在军事训练中,肌肉疲劳的产生是多重机制共同作用的结果,主要包括中枢神经递质介导、肌细胞内钙稳态失调、血流、氧供和能量不足及代谢产物堆积等原因<sup>[5]</sup>。见图1。长期或反复的肌肉疲劳若得不到有效恢复,可进一步引发肌肉组织的慢性损伤。对肌肉疲劳进行有效的检测与评估有助于预防过度疲劳带来的潜在伤害。

### 1.1 中枢神经递质介导肌肉疲劳

高强度军事训练中,中枢神经系统释放的5-羟色胺、多巴胺、去甲肾上腺素等递质浓度发生变化<sup>[6]</sup>。中枢神经系统通过这些递质调控下行运动

神经元,进而影响运动单位的募集与放电<sup>[7]</sup>。运动单位募集遵循“大小原则”,随着疲劳加深,其放电频率显著下降,最终导致军事训练所需的运动功能减退。

### 1.2 肌细胞内钙稳态失调导致肌肉疲劳

肌质网是维持骨骼肌钙稳态的核心细胞器,通过钙释放与回收参与肌纤维收缩、舒张<sup>[8]</sup>。军事训练的高强度负荷易引发代谢产物堆积,降低钙泵活性、破坏钙稳态,最终引发肌肉疲劳与损伤<sup>[9-10]</sup>。

### 1.3 血供不足与缺氧导致肌肉疲劳

充足血供是维持肌肉力量的关键<sup>[11]</sup>。高强度军事训练中,肌肉持续发力使氧摄取和腺苷三磷酸(adenosine triphosphate, ATP)利用增至最大摄入量,增加的氧气输送无法满足ATP需求,导致代谢失衡,引发疲劳<sup>[12-15]</sup>。

### 1.4 能量不足导致肌肉疲劳

军事训练依靠ATP供能,而ATP主要通过糖原的氧化分解来再生<sup>[16]</sup>。长时间和高强度军事运动会导致糖原耗竭,无法维持ATP生成,最终引发肌肉疲劳<sup>[17-18]</sup>。

### 1.5 代谢因子导致肌肉疲劳

军事训练中肌肉持续高强度收缩,激活ATP酶并促进糖代谢,产生H<sup>+</sup>、磷酸根离子、活性氧

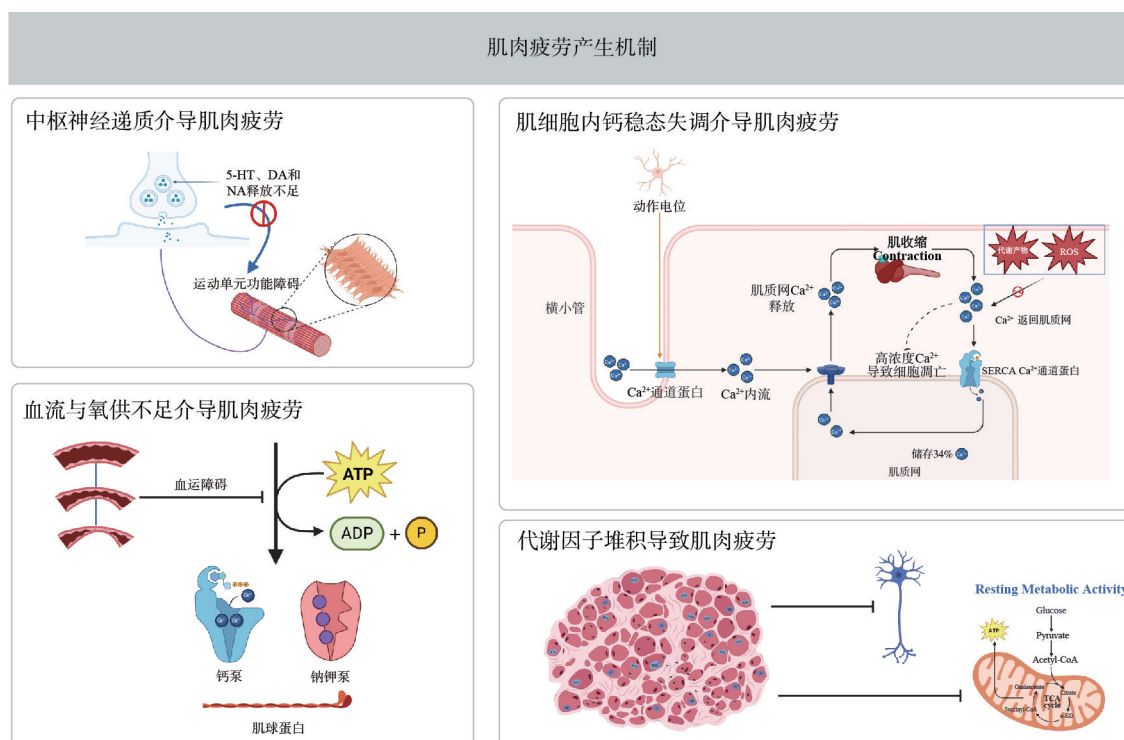


图1 肌肉疲劳产生机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of muscle fatigue generation mechanism

(reactive oxygen species, ROS)等代谢产物。这些产物通过抑制肌质网的钙释放、降低肌纤维的敏感性等机制, 损害肌肉力量并导致肌肉疲劳<sup>[19-21]</sup>。

## 2 军事训练致肌肉疲劳传统评估标准

### 2.1 主观评价

主观评价是通过受训者自我感受来判断军事训练相关的疲劳程度, 具有实施便捷的优点。近年来, 研究多聚焦于经典量表的军事场景适配优化, 如Borg自觉运动强度量表因其与心率、乳酸等指标的相关性, 在军事训练强度与疲劳半定量评估中持续拓展应用<sup>[22]</sup>; 疲劳量表-14、疲劳评定量表通过维度调整, 更贴合军事人员躯体与脑力复合疲劳的评估需求<sup>[23-24]</sup>。研究进展显示, 主观评价的信效度问题仍需与客观指标融合优化, 目前已出现结合训练场景特征的个性化修正方案, 此举可为军事训练实时评估提供更具实际的参考<sup>[25]</sup>。

### 2.2 客观指标

**2.2.1 生化指标评价** 高强度军事训练导致肌细胞乳酸、尿素、ROS等代谢产物堆积, 能量与氧气供给减少, 通过检测相关生化指标可评估肌肉疲劳程度, 达到临界值即符合疲劳标准。目前广泛使用的指标包括糖类、蛋白质代谢物、抗氧化相关物质、神经递质、肌损伤标志物及激素水平等。艾冬生等<sup>[26]</sup>研究发现, 10例特战队员10 km负重行进后血乳酸从 $(2.27 \pm 0.59)$  mmol/L升至 $(5.42 \pm 1.82)$  mmol/L, 4例出现尿蛋白; 罗显荣等<sup>[27]</sup>监测119例新兵发现, 军事训练8周后尿酸、肌酸激酶等显著升高。虽然生化指标能提供有价值的信息, 但单纯通过生化指标诊断肌肉疲劳仍需谨慎。应结合训练时间差、个体差异及训练类型等因素, 从多维度综合分析以确保评估准确性。

**2.2.2 生理指标评价** 军事训练引起的肌肉疲劳会引发运动、心血管、神经系统及睡眠相关生理指标改变。心血管系统中, 心率及心率变异性(heart rate variability, HRV)是关键指标, 低HRV提示疲劳或过度训练<sup>[28]</sup>。Barrero等<sup>[29]</sup>发现环法女选手HRV失衡与交感神经激活、迷走神经抑制相关; 神经系统可通过闪光频率融合度、膝跳反射阈值等评估肌肉疲劳状态。此外, 朱琳琳等<sup>[30]</sup>研究证实睡眠质量与肌肉疲劳直接相关, 为军事训练疲劳监测提供了新方向。

## 3 现代技术在评估军事训练所致肌肉疲劳中的应用

现代军事训练频率越来越高, 及时、随身、准确地进行疲劳诊断可避免因肌肉疲劳造成的军事训练损伤。然而, 传统的测试方式难以满足及时便携的肌肉疲劳诊断需求, 亟须新方法填补该领域空缺。随着生物传感技术和影像学的发展, 可穿戴生物传感器和超声成像技术受到了研究人员的广泛关注。穿戴式生物传感器将生物标志物从汗液、唾液、泪液等非侵入性生物流体中采集, 通过生物传感模块进行连续定量的生物传感。检测信号后可无线通信实时传输, 是评估肌肉疲劳的有效方法, 打破了传统评估依赖固定场地和滞后检测的局限, 推动军事训练肌肉疲劳评估向实时化、便携化转型。超声成像通过对超声信号或超声图像的分析, 根据随时间变化而变化的肌肉特性, 对肌肉的状态进行评估。由于超声可直观、无损地显示肌肉信息量, 比如肌纤维长度、羽状角和肌肉厚度等参数, 也能够实时保存某一刻图像, 被广泛用于肌肉状态评估, 为军事训练现场快速判断疲劳程度、优化评估标准提供了技术支撑。

### 3.1 可穿戴泪液生物传感器

可穿戴式泪液生物传感器由于与泪液/血液中的生物标志物有很强的关联性而得到了广泛的研究和发展。最初的穿戴式泪液生物感应器是一种软式器械。这种柔软且可伸展的条状设备是通过在聚丙烯酸甲酯-二甲基丙烯酸酯共聚物上涂覆聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)而成, 可用于检测泪液中的葡萄糖含量<sup>[31]</sup>。然而, 这种条状设备难以固定在虹膜上, 因此难以适应高强度军事训练。为提高穿戴式泪液生物传感器的便携性, Chu等<sup>[32]</sup>在接触镜中集成条状生物传感器, 通过制备穿戴式PDMS接触镜, 将葡萄糖氧化酶电极固定在柔性条状设备。这款隐形眼镜通过传感器上预装的葡萄糖氧化酶与样品中的葡萄糖发生氧化还原反应, 检测出葡萄糖的变化, 这为较长时间军事训练提供了一种检测方法, 其隐蔽性和连续性适配野外拉练、负重行进等军事训练场景, 使疲劳评估在不中断的情况下进行, 推动评估标准从“事后检测”向“事中监测”延伸。由

于隐形眼镜传感器与眼球直接接触增加了眼部疾病的可能性, Sempionatto 及其团队<sup>[33]</sup>设计了一种类似框架眼镜的泪液传感器。这种眼泪传感器能够收集眼角的眼泪, 并通过生物酶-底物反应在不与眼球直接接触的情况下, 同时检测葡萄糖、维生素和眼外泪液。这种非接触式设计彻底规避了眼部健康风险, 适配低强度野外驻训、长时间战术演练等军事场景, 进一步完善了“事中监测”的评估方法。

### 3.2 可穿戴唾液生物传感器

可穿戴唾液生物传感器的原理是以纸为基础的口腔液测试条, 通过收集被测试者的唾液, 利用视觉比色法或电化学方法对目标进行分析。利用比色反应的测试条相对容易检测口腔液中的葡萄糖和皮质醇含量, 其中葡萄糖能实时反映军事训练中肌肉能量代谢的动态变化, 皮质醇可灵敏提示疲劳相关的应激反应程度, 二者为肌肉疲劳的实时监测提供关键的量化生物标志物, 但该测试条无法实现实时监测。为了实现连续监测, 基于纸张的口腔液测试条被可穿戴的3D打印微流控纸基硅胶托架所取代<sup>[34]</sup>。这种3D打印的 $\mu$ PADs牙套将测试条集成到牙套中, 稳定贴合口腔, 并通过酶与底物比色反应检测目标。然而, 这种牙套需要反复从口腔中取出进行比色分析, 限制了其广泛应用的可能性。为改善这些不足, Kim及其团队<sup>[35]</sup>将丝网印刷的乳酸电极整合到可穿戴口腔液托架中, 分析口腔液中的乳酸含量并连续输出电信号。随着口腔液中乳酸含量的增加, 生物酶-底物反应的副产物 $H_2O_2$ 也会逐渐增加, 从而逐渐改变电信号。基于连续检测功能的穿戴式生物传感器, 研究人员还开发出穿戴式口腔液生物传感器, 用于检测尿酸和葡萄糖。研究和应用结果表明, 这种可穿戴口腔液生物传感器在一定程度上更适应高强度军事训练, 其无需中断训练即可采集样本的特性, 契合了战术训练、对抗演练等不间断训练场景的需求。与可穿戴式泪液生物传感器相比, 可穿戴式唾液生物传感器, 尤其是小型化生物传感器, 更加人性化, 具有更好的安全性和样本采集效率, 有利于检测士兵在训练和操作过程中的肌肉疲劳状态; 同时通过连续量化乳酸、葡萄糖等指标, 使军事训练肌肉疲劳评估标准从“事后定量描述”向“事中定量精准”升级, 提升了标准的实操性和科学性。

### 3.3 可穿戴表皮生物传感器

除了口腔液和眼泪外, 非侵入性生物流体也存在于皮肤表面。例如, 在军事训练过程中, 汗液大量分泌到皮肤表面, 其中含有许多与疲劳相关的生物标志物。此外, 可穿戴汗液生物传感器无需接触口腔和眼, 从而减少异物感, 在普适性和舒适性方面更适用于军事人员<sup>[36]</sup>。皮肤表层分泌的间质液是另一种更具诊断价值的非汗液生物流体。与汗液不同, 间质液环绕在组织细胞周围, 直接获取了从毛细血管内皮扩散出来的生物代谢物而无需过滤<sup>[37]</sup>。因此, 间质液中的生物组成与血液中相似。Tierney及其团队<sup>[38]</sup>提出了从皮肤表面提取间质液的可穿戴手环。在研究中, 葡萄糖通过电离导入从皮肤中提取, 并将整个模块集成到一个手环中, 具有高准确性和重复性。这款可穿戴手环已发展成熟, 在实际使用中不影响战术动作执行, 适配越野、射击等多样化军事训练场景, 解决了传统评估方法在动态训练中难以应用的难题, 可有效推动标准向“多维度、实时化”完善。

### 3.4 影像超声技术

医学超声是一种研究骨骼肌肉组织形态的工具, 能清晰展示肌肉的形态和动态变化。在实际应用中, 超声波图像能够实时展示肌束长度、肌肉厚度、羽状角等多个方面, 可快速适配野外驻训、负重拉练、战术对抗等多样化军事训练场景, 且无创特性不会干扰训练进程<sup>[39]</sup>。诸多学者围绕医学超声在肌肉研究领域开展了一系列有价值的工作。例如, Nygren等<sup>[40]</sup>利用多普勒超声系统测量了人体肌肉僵硬度和横截面积的关系, 得出肌肉强度与横截面积是正相关的结论。Hodges等<sup>[41]</sup>利用超声研究了人体肌肉的厚度与肌肉疲劳的关系, 得到肌肉厚度随着疲劳程度增加而非线性增加的结论。这些研究从肌肉结构、力学特征及骨肌关联等维度, 将肌束长度、羽状角等形态学参数纳入评估体系, 填补了传统军事训练疲劳评估标准中缺乏肌肉结构量化指标的空白, 使评估标准更贴合军事训练导致的肌肉功能变化特点, 为超声技术应用于军事训练肌肉疲劳的无创、实时监测提供了关键理论与实践支撑。

## 4 结语和展望

本文聚焦于军事训练引发肌肉疲劳的相关研究, 对肌肉疲劳产生机制、传统与现代肌肉疲劳

评价方法展开全面综述。在高强度军事训练前对参训人员进行系统评估,以避免不必要的肌肉与骨骼损伤。可采用的评估工具包括: Borg 自觉运动强度量表、疲劳量表-14、运动员疲劳量表及疲劳评定量表等,用于全面了解其主观疲劳状态及身体功能基线。实验室检查应涵盖多项生理生化指标,如糖代谢物(如乳酸)、蛋白质代谢物(如尿素、尿蛋白)、抗氧化自由基指标(如丙二醛)、氧转运相关物质;同时还应包括神经递质水平(如 $\gamma$ -氨基丁酸、谷氨酸、5-羟色胺)、肌肉损伤标志物(如血清肌酸激酶)、与疲劳相关内分泌激素(如睾酮、皮质醇)等,以及运动系统、心血管系统和神经系统的常规生理指标。通过这些系统的前测,可识别潜在风险,为制定个性化训练方案提供依据,从而降低损伤发生概率。在高强度军事训练后,士兵体内发生一系列生理变化,诸如中枢神经递质水平改变、肌细胞内钙稳态失衡、血流与氧供应不足、能量储备匮乏以及代谢因子大量堆积等,这些变化最终导致训练人员出现肌肉疲劳,进而增加军事训练伤的发生风险。科学的疲劳评价与监测方法具有重要意义,能够有效规避士兵在训练过程中出现体力不支、注意力分散等问题,为训练安全提供保障。在传统的军事训练肌肉疲劳评价和监测方法中,主观评价法因高度依赖个人主观因素,质控存在较大难度;生化指标检测虽能反映生理状态,但由于检测方法具有创伤性,不宜常规进行;生理指标的变化往往滞后于生化功能,在敏感度方面存在不足。

为精准评价和检测官兵的肌肉疲劳状态,有必要将传统方法与现代方法有机结合,构建一套完善的疲劳评价体系。随着生物传感技术与先进材料技术的快速发展,可穿戴生物传感器应运而生。这类传感器能够紧密贴合皮肤,在有限的测试条件下实现实时数据传输,提供了一种快速且直接检测生物标志物的有效途径,恰好契合了疲劳诊断对准确性和及时性的要求。然而,尽管可穿戴生物传感器在肌肉疲劳监测领域已取得显著进展,但仍面临诸多挑战。其一,当前以柔性金属、聚合物弹性体和聚合物薄膜为基材的常规策略,因材料本身弹性模量与人体皮肤不匹配,在应对人体运动过程中皮肤复杂且大幅度的形变时,传感器与皮肤的贴合性欠佳,进而导致疲劳检测能力较差。其二,可穿戴生物监测能力存在一定局限。尽管已有能够同时监测多种生物标志物变

化的可穿戴多通道生物传感器的相关报道,但尚未得到实际应用。由于生物识别元素兼容性不佳,生物酶、分子印迹聚合物和抗体的整合以及生理模块的融合难以顺利实现,这严重限制了对多方面生理功能的深入研究。其三,在疲劳诊断过程中,可穿戴生物传感器在应对周围干扰以及确保准确性方面,仍存在诸多尚未明确的问题。尽管面临诸多挑战,但鉴于先进材料技术的持续进步以及军事训练中对肌肉疲劳状态关注度的日益提升,研发具备与人体皮肤弹性模量相匹配、高灵敏、高导电性以及高电子迁移率的柔性生物传感器,无疑将成为未来该领域的重要发展趋势。

**作者贡献** 畅正阳: 论文撰写; 刘明丽、高建朋、李子键: 监督指导, 论文修订; 李明: 论文选题与设计。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突。

#### 参考文献

- Molloy JM, Pendergrass TL, Lee IE, et al. Musculoskeletal injuries and United States army readiness part I: overview of injuries and their strategic impact [J]. *Mil Med*, 2020, 185 (9/10): e1461-e1471.
- 吴进, 李春宝, 黄鹏, 等. 我军军事训练伤流行病学研究综述 [J]. *解放军医学院学报*, 2020, 41 (12): 1236-1239.
- 刘昕怡, 李佳航, 陈丹阳, 等. 军事训练疲劳评估与恢复专家共识计划书 (2024年版) [J]. *解放军医学院学报*, 2024, 45 (7): 714-717.
- Niu SY, Yin XP, Cao QL, et al. miRNAs involved in the regulation of exercise fatigue [J]. *Front Physiol*, 2025, 16: 1614942.
- Karthick PA, Ghosh DM, Ramakrishnan S. Surface electromyography based muscle fatigue detection using high-resolution time-frequency methods and machine learning algorithms [J]. *Comput Meth Programs Biomed*, 2018, 154: 45-56.
- Swart J, Lamberts RP, Lambert MI, et al. Exercising with reserve: exercise regulation by perceived exertion in relation to duration of exercise and knowledge of endpoint [J]. *Br J Sports Med*, 2009, 43 (10): 775-781.
- Enoka RM, Fuglevand AJ. Motor unit physiology: Some unresolved issues [J]. *Muscle Nerve*, 2001, 24 (1): 4-17.
- Fichna J, Poole DP, Veldhuis N, et al. Transient receptor potential vanilloid 4 inhibits mouse colonic motility by activating NO-dependent enteric neurotransmission [J]. *J Mol Med*, 2015, 93 (12): 1297-1309.
- Lamb GD. Excitation - contraction coupling and fatigue mechanisms in skeletal muscle: studies with mechanically skinned fibres [J]. *J Muscle Res Cell Motil*, 2002, 23 (1): 81-91.
- Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Impaired calcium release during fatigue [J]. *J Appl Physiol*, 2008, 104 (1): 296-305.
- Wright JR, McCloskey DI, Fitzpatrick RC. Effects of muscle perfusion pressure on fatigue and systemic arterial pressure in human subjects [J]. *J Appl Physiol*, 1999, 86 (3): 845-851.
- Degens H, Salmons S, Jarvis JC. Intramuscular pressure, force

- and blood flow in rabbit tibialis anterior muscles during single and repetitive contractions [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1998, 78 (1): 13-19.
- 13 Wigmore DM, Propert K, Kent-Braun JA. Blood flow does not limit skeletal muscle force production during incremental isometric contractions [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2006, 96 (4): 370-378.
- 14 Jones AM, Carter H, Pringle JSM, et al. Effect of creatine supplementation on oxygen uptake kinetics during submaximal cycle exercise [J]. *J Appl Physiol*, 2002, 92 (6): 2571-2577.
- 15 Kent JA, Ørtenblad N, Hogan MC, et al. No muscle is an island: integrative perspectives on muscle fatigue [J]. *Med Sci Phys Exerc*, 2016, 48 (11): 2281-2293.
- 16 Homsher E. Muscle enthalpy production and its relationship to actomyosin ATPase [J]. *Annu Rev Physiol*, 1987, 49: 673-690.
- 17 Ashar FN, Moes A, Moore AZ, et al. Association of mitochondrial DNA levels with frailty and all-cause mortality [J]. *J Mol Med*, 2015, 93 (2): 177-186.
- 18 Nielsen J, Schröder HD, Rix CG, et al. Distinct effects of subcellular glycogen localization on tetanic relaxation time and endurance in mechanically skinned rat skeletal muscle fibres [J]. *J Physiol*, 2009, 587 (14): 3679-3690.
- 19 Metzger JM, Moss RL. Effects of tension and stiffness due to reduced pH in mammalian fast- and slow-twitch skinned skeletal muscle fibres [J]. *J Physiol*, 1990, 428 (1): 737-750.
- 20 Westerblad H, Allen DG, Lännergren J. Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? [J]. *Physiology*, 2002, 17 (1): 17-21.
- 21 Debold EP. Potential molecular mechanisms underlying muscle fatigue mediated by reactive oxygen and nitrogen species [J]. *Front Physiol*, 2015, 6: 239.
- 22 Borg GAV. Psychophysical bases of perceived exertion [J]. *Med Sci Phys Exerc*, 1982, 14 (5): 377-381.
- 23 Scherr J, Wolfarth B, Christle JW, et al. Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2013, 113 (1): 147-155.
- 24 Yang JH, Yang HJ, Choi C, et al. Systematic review and meta-analysis on burnout owing to perfectionism in elite athletes based on the multidimensional perfectionism scale (MPS) and athlete burnout questionnaire (ABQ) [J]. *Healthcare*, 2023, 11 (10): 1417.
- 25 Meng XD, Guo HR, Zhang QY, et al. The effectiveness of cupping therapy on chronic fatigue syndrome: A single-blind randomized controlled trial [J]. *Complementary Ther Clin Pract*, 2020, 40: 101210.
- 26 艾冬生, 左勇, 冯欣亮. 特战青年军官队员10km负重跑的生理生化指标分析 [J]. *军事体育学报*, 2014, 33 (2): 48-49.
- 27 罗显荣, 罗春生, 付泳航, 等. 新兵训练后生化指标及胰岛素和C肽的变化研究 [J]. *华南国防医学杂志*, 2012, 26 (5): 474-475.
- 28 李延军, 严洪, 杨向林, 等. 基于心率变异性的精神疲劳的研究 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2010, 29 (1): 1-6.
- 29 Barrero A, Schnell F, Carrault G, et al. Daily fatigue-recovery balance monitoring with heart rate variability in well-trained female cyclists on the Tour de France circuit [J]. *PLoS One*, 2019, 14 (3): e0213472.
- 30 朱琳琳, 李凤林. 网球运动员的疲劳与睡眠质量的关系与研究 [J]. *体育科技文献通报*, 2021, 29 (10): 176-179.
- 31 Kudo H, Sawada T, Kazawa E, et al. A flexible and wearable glucose sensor based on functional polymers with Soft-MEMS techniques [J]. *Biosens Bioelectron*, 2006, 22 (4): 558-562.
- 32 Chu MX, Miyajima K, Takahashi D, et al. Soft contact lens biosensor for in situ monitoring of tear glucose as non-invasive blood sugar assessment [J]. *Talanta*, 2011, 83 (3): 960-965.
- 33 Sempionatto JR, Brazaca LC, García-Carmona L, et al. Eyeglasses-based tear biosensing system: non-invasive detection of alcohol, vitamins and glucose [J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, 137: 161-170.
- 34 de Castro LF, de Freitas SV, Duarte LC, et al. Salivary diagnostics on paper microfluidic devices and their use as wearable sensors for glucose monitoring [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2019, 411 (19): 4919-4928.
- 35 Kim J, Valdés-Ramírez G, Bandodkar AJ, et al. Non-invasive mouthguard biosensor for continuous salivary monitoring of metabolites [J]. *Analyst*, 2014, 139 (7): 1632-1636.
- 36 Sim JK, Yoon S, Cho YH. Wearable sweat rate sensors for human thermal comfort monitoring [J]. *Sci Rep*, 2018, 8: 1181.
- 37 Zhao RJ, Wang CS, Lu F, et al. A flexible interdigital electrode used in skin penetration promotion and evaluation with electroporation and reverse iontophoresis synergistically [J]. *Sensors*, 2018, 18 (5): 1431.
- 38 Tierney MJ, Tamada JA, Potts RO, et al. Clinical evaluation of the GlucoWatch® biographer: a continual, non-invasive glucose monitor for patients with diabetes [J]. *Biosens Bioelectron*, 2001, 16 (9/10/11/12): 621-629.
- 39 刘杨晓雪, 赵天舒, 周明, 等. 大鼠过度使用性肌腱病损伤的多模态特征分析 [J]. *解放军医学院学报*, 2024, 45 (1): 84-89.
- 40 Nygren AT, Greitz D, Kaijser L. Changes in cross-sectional area in human exercising and non-exercising skeletal muscles [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2000, 81 (3): 210-213.
- 41 Hodges PW, Pengel LHM, Herbert RD, et al. Measurement of muscle contraction with ultrasound imaging [J]. *Muscle And Nerve*, 2003, 27 (6): 682-692.

(责任编辑: 孟晓彤)