

## 综述

## 军事训练中运动性疲劳评价方法的研究进展

裴莹<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 李惠子<sup>2</sup><sup>1</sup>锦州医科大学火箭军特色医学中心研究生培养基地 神经内科, 北京 100088; <sup>2</sup>火箭军特色医学中心 门诊部, 北京 100088

**摘要:** 疲劳状态会影响人体功能及思维判断, 极易导致军事训练伤的发生, 降低部队的作战能力。目前用于评价军事运动性疲劳的体系并不完善, 亟需开展相关研究制定出适于军事训练的疲劳评价系统。本文对军事运动性疲劳的产生机制及国内外常用的疲劳评价方法进行综述, 为评价和监测军事训练疲劳提供参考。

**关键词:** 军事训练伤; 衰竭学说; 运动性疲劳; 劳损; 心率变异率

中图分类号: R318 文献标志码: A 文章编号: 2095-5227(2022)08-0887-04 DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2022.08.013

网络出版时间: 2022-07-15 15:32 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1117.R.20220715.0901.002.html>

引用本文: 裴莹, 王磊, 李惠子. 军事训练中运动性疲劳评价方法的研究进展 [J]. 解放军医学院学报, 2022, 43 ( 8 ) : 887-890.

## Research advances in evaluation methods for exercise-induced fatigue in military training

PEI Ying<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, LI Huizi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Internal Medicine-Neurology, Postgraduate Training Base of Jinzhou Medical University, the PLA Rocket Force Characteristic Medical Center, Beijing 100088, China; <sup>2</sup> Outpatient Department the PLA Rocket Force Characteristic Medical Center, Beijing 100088, China

Corresponding author: LI Huizi. Email: lihuiziyy@126.com

**Abstract:** Fatigue state will affect human body function and thinking judgment, which will easily lead to military training injuries and thus reducing the combat ability of troops. At present, there still lacks a perfect evaluation system for military exercise-induced fatigue, and it is urgent to develop a fatigue evaluation system that is suitable for military training. This article reviews the mechanism of military exercise-induced fatigue and the commonly used methods for fatigue evaluation in China and globally, so as to provide a reference for evaluating and monitoring fatigue during military training.

**Keywords:** military training injury; exhaustion theory; exercise-induced fatigue; strain; heart rate variability

**Cited as:** Pei Y, Wang L, Li HZ. Research advances in evaluation methods for exercise-induced fatigue in military training [J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2022, 43 ( 8 ) : 887-890.

军事训练是和平时部队战士的主要任务, 其目的在于维持并增强战士的身体素质和作战能力, 为实现我国新形势下的强军兴军奠定坚实基础。战士经过高强度、长时间的负荷训练后, 体能消耗殆尽, 从而产生疲劳感, 影响军事作业效率和思维判断能力, 这是导致军事训练伤 (military training injuries, MTI) 发生的首要原因<sup>[1]</sup>。军事训练伤的发生不仅降低训练效率, 还可能造成官兵

的心理和生理问题<sup>[2]</sup>。本文主要对军事训练中运动性疲劳的产生机制和疲劳评价方法研究进展进行阐述, 为减少军事训练伤的发生、维护官兵健康、增强部队战斗力提供理论依据。

### 1 军事训练中运动性疲劳的发生情况

军事训练伤是指军事训练导致参训人员发生组织器官功能障碍或病理改变, 包括骨折、关节脱位、外伤、中暑、脱水、冻伤、腹痛等<sup>[3]</sup>。流行病学调查显示, 目前我军各兵种军事训练伤的发生率为 10% ~ 20%, 以过度疲劳和急性损伤为主, 高于军事训练伤健康保护规定的年发生率 8%<sup>[4]</sup>。军事训练伤的高发不仅威胁着战士的身心健康, 增加医疗费用的支出, 还导致部队非战斗减员, 严重影响军队的战斗力。李春伶等<sup>[5]</sup>通过调查 2 090 名武警官兵军事训练伤的发生情况, 发

收稿日期: 2022-03-11

基金项目: 军委后勤保障部卫生局 2021 年度卫生防疫防护专项任务 (21FYFH05)

Supported by the Project of General Logistics Department of PLA (21FYFH05)

作者简介: 裴莹, 女, 在读硕士。研究方向: 神经病学。Email: 2240407671@qq.com

通信作者: 李惠子, 博士, 主治医师。Email: lihuiziyy@126.com

现过劳损伤的发生率最高,达到 70.3%。张亮等<sup>[6]</sup>选取 16 959 名陆军新兵进行研究,同样发现过劳损伤在军事训练伤中最为多见,且多以肌腱炎、腰肌劳损和疲劳性骨折为主。美军调查显示,由过度疲劳导致的军事事故死亡人数占美军每年死亡人数的 1/3<sup>[7]</sup>。尤其是负荷较大的军事训练,如飞行、核潜艇、航母等任务,超负荷作业、睡眠剥夺和长期精神压力等因素都会加快疲劳的产生、加重疲劳的程度,使战士无法保持正常的工作效率,严重影响军事任务的完成<sup>[8]</sup>。因此科学评价并监测军事训练中运动性疲劳的发生,及时调整训练内容和方法,减少军事训练伤的发生,对于保障部队作战能力具有重要意义。

## 2 军事训练中疲劳的产生机制

现代战场复杂多变,面对高负荷、易突发和高风险的作战特点,战士不仅需要具备专业的作战技能,更应时刻保持饱满的精神状态,包括注意力、理解力、判断力和执行力<sup>[9]</sup>。但随着训练时间的延长,疲劳程度的累积会影响战士的身心状态,给作战行动带来巨大威胁。运动性疲劳是指机体在长时间或高强度运动后不能在一定水平上维持其功能和(或)不能维持运动强度的状态<sup>[10]</sup>。在一定程度上,运动性疲劳被认为是人体的一种保护性机制,经过适当的休息和调整,可以从疲劳状态恢复到正常状态,并不会对人体造成损害。但如果长期持续处于疲劳状态,不能得到及时有效的缓解,那么疲劳程度就会继续积累,久而久之就会发生过度疲劳,影响战士的身心健康和作战能力。

目前,关于运动性疲劳生成机制众说纷纭,其中被广泛认可的是衰竭学说和堵塞学说。衰竭学说认为疲劳的产生是由体内能量物质耗竭造成的,人在活动时大量消耗体内的能量物质,如三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)、磷酸肌酸、糖、脂肪等,导致各器官的能量供应减少,使大脑和肌肉的工作效率下降,无法完成额定的任务,产生疲劳<sup>[11]</sup>。不同强度的军事训练,会消耗不同的能量物质。具体表现为短时间内高强度体能训练,会消耗战士体内含有高能磷酸键的能量物质,如 ATP 和磷酸肌酸。随着训练时间的推移和任务强度的加大,战士体内葡萄糖和糖原会消耗殆尽,进一步降低训练任务的效率和效果。其中,糖是机体活动的主要供能物质,与疲劳进程的发生发展密切相关。故战士在出现疲劳时,可通过及时补充葡萄糖在一定程度上消除疲

劳、恢复精力<sup>[12]</sup>。

堵塞学说,又被称为代谢产物堆积学说,即人在运动时,体内各种代谢活动增强,由此生成的代谢产物若不能得到及时清理就会在体内堆积,如乳酸、酮类、氨等,使肌肉的工作能力下降,产生疲劳感<sup>[13]</sup>。正常情况下,除了少数组织以糖酵解的形式供能外,体内大多数组织都通过有氧代谢途径产能。糖酵解生成的乳酸经血液循环入肝后,可在肝内进行糖异生而再次被机体利用。故在正常情况下,血液中的乳酸含量会维持在一定范围内,并不会出现大幅度波动<sup>[14]</sup>。在战士进行剧烈运动时,氧气需求增大致使供应不足,机体依靠糖酵解产能,此时生成大量乳酸容易发生堆积,导致内环境呈酸性改变,负反馈抑制糖酵解过程、阻碍 ATP 生成,并影响大脑的正常生理活动;同时解离出的氢离子会与钙离子竞争肌钙蛋白上的结合位点,使肌肉兴奋-收缩脱耦联,工作效率下降<sup>[15]</sup>。现已证实,战士体内的乳酸含量与其体能精力呈显著负相关,且较高的乳酸水平会延长训练后疲劳的恢复时间<sup>[16]</sup>。

## 3 军事运动性疲劳的常见评价方法

在军事任务中,高强度体能训练、睡眠缺乏、长期精神压力、创伤后应激、生物钟紊乱等因素都可引起疲劳的产生<sup>[17]</sup>。由于疲劳成因的复杂性及军事训练的特殊性,疲劳很难由简单的方法来测定,往往需要各指标联合进行评价。

**3.1 主观评价** 主观感受与运动负荷、心肺功能、代谢产物堆积等因素密切相关,是判断疲劳程度的重要标志。Borg 于 1970 年结合运动时人的各项生理指标和心理状态的变化,制定主观疲劳评定量表(ratings of perceived exertion, RPE),以问卷的形式对疲劳程度进行半定量分析<sup>[18]</sup>。该量表具有良好的评估效能,其等级数值与运动负荷强度、心率、耗氧量、乳酸、激素等关系密切,因此常作为国内外军事运动性疲劳评价的主要方法。疲劳量表-14(fatigue scale, FS-14)是由 Trndie Chalder 和 Berelowitz 于 1992 年编制,用于估计疲劳程度、评价治疗效果、鉴别疲劳相关疾病等<sup>[19]</sup>。该量表由 14 个条目组成,分别对躯体疲劳和心理疲劳进行评估,其总和反映机体疲劳状态。疲劳评定量表(fatigue assessing instrument, FAI)共 29 个条目,每个条目 1~7 分,以总分反映受试者的疲劳程度<sup>[20]</sup>。疲劳自评量表(fatigue self-assessment scale, FSAS)共 23 个条目,包括 6 个评分因子,即躯体疲劳、心理疲劳、疲劳结果、疲劳对睡眠

的影响、疲劳的情境性和疲劳的时间模式。每个条目采用 Likert 5 级评分法 (0~4 分), 效度较好<sup>[21]</sup>。

英国陆军航空医疗协会为了客观评价不同兵种间战士的疲劳程度, 制定出一份涉及多个疲劳影响因素的调查量表<sup>[22]</sup>。该量表由战士主观进行作答, 题目中不仅包括严苛环境等疲劳加分项, 还包括有睡眠时长等疲劳减分项, 通过计算得出最终分数, 分数越高表明战士越疲劳。在下达任务前, 指挥人员常根据测评结果挑选出适宜参加此次任务的战士。该方法虽然简单易行, 但容易受战士的理解影响, 存在偏差。

**3.2 生化指标评价** 运动性疲劳的产生与能量物质和氧气供应的减少、代谢产物的堆积密切相关, 对此进行测定可以在一定程度上评估个体的疲劳程度。目前临床上广泛应用的指标包括糖代谢产物、蛋白质代谢产物、抗氧化自由基、氧转运相关物质等, 如乳酸、尿素、氨、尿蛋白、丙二醛、超氧化物歧化酶等。其他常见指标还有神经递质, 如  $\gamma$ -氨基丁酸、谷氨酸、5-羟色胺和与疲劳相关的骨骼肌损伤物质, 如血清肌酸激酶, 以及内分泌激素如睾酮、皮质醇等<sup>[23-24]</sup>。

有研究报道, 陆军特战岗位军事训练伤发生率较高, 与运动员和非特战岗位的军人相比, 反映疲劳状况的相关血液指标如血红蛋白、血尿素氮、尿酸、肌酐、磷酸肌酸激酶、乳酸脱氢酶, 以及尿液指标如微白蛋白有不同程度的增高, 提示特战岗位人员的疲劳程度较高<sup>[25]</sup>。军事科学院通过对远航任务后官兵的唾液生化指标 (硫酸脱氢表雄酮、皮质醇、免疫球蛋白 A、 $\beta$ -内啡肽和嗜铬粒蛋白) 进行对比, 发现检测结果显著下降, 表明疲劳导致官兵的下丘脑-垂体-肾上腺轴失调, 激素分泌减少<sup>[26]</sup>。

**3.3 生理学指标评价** 由于血液检测无法实现无创性可穿戴的实时监测目的, 研究者把目标转向了其他方向, 如汗液、脑电信号、心电信号、肌电信号等生理学指标。近几年, 各国军事医学都在大力研制监测军事人员疲劳程度的设备, 用于战士的精确选拔、疲劳预警、训练干预和能力评估, 从而保证未来高科技战争的胜利<sup>[27]</sup>。这其中包括欧洲的 BIOTEX 项目、美国的 WPSM (Warfighter Physiologic Status Monitoring) 系统、英国的 FIST 计划、法国的未来战士项目、澳大利亚的 Land125 计划和德国的 IdZ 未来战士计划。

汗液是由汗腺分泌到皮肤表面的液体, 能够无创获取, 可作为实时精准检测人体深层次生理

参数的样本。汗液的成分与血液相似, 其中的营养物质、电解质、代谢物等成分同样能够从分子层面精确地反映战士的身体状况。因此通过对汗液成分信息的实时监测, 结合任务负荷模型, 可以实现训练过程中战士疲劳状态的预警。欧洲的 BIOTEX 项目就是通过内部集成的织物传感器实现汗液的乳酸和钠含量、pH 值、电导率的实时检测, 反映军事训练中战士的身体疲劳状况<sup>[28]</sup>。

美国的 WPSM 系统是为了满足对士兵生理状态检测的需求所提出的单兵生命体征监测系统, 该系统可以收集并监测人体的基础生命体征、承受压力情况、睡眠情况等信息。当战士处于疲劳或受伤状态时, 它能监测到体温、心率、呼吸等指标的变化, 将战士的身体情况及时报告给指挥官和医务兵, 便于及时救治和调整训练方案<sup>[29]</sup>。美国陆军研究实验室联合 Fatigue Science 公司开发出可预测战士疲劳出现时间的 Readiband 腕带, 利用睡眠和清醒状态下的不同表现, 结合 SAFTE 模型, 并考虑基于地理位置和光照等因素引起生物钟节律变化的影响, 较为客观准确地预测出疲劳来临时间, 减少或避免战士在疲劳状态下进行军事任务<sup>[30]</sup>。

国内上海交通大学吕宝粮团队认为可应用基于脑电的情绪识别实行士兵的在线疲劳监测, 通过记录并分析士兵在执行任务过程中的脑电信号评估此时大脑的警觉度和敏感度<sup>[31]</sup>。此外, 深圳大学彭微微团队将经典的恐惧条件反射与脑电图相结合, 证实脑电信号的  $\alpha$  和  $\beta$  波、相对功率、P300 的幅度等可以作为疲劳的评价指标<sup>[32]</sup>。心率变异率 (heart rate variability, HRV) 也可用于判断是否出现过度疲劳, 即通过测量连续 R-R 间期的变化来反映心率的变化程度和规律。有研究以 HRV 为基础并结合生化指标监测运动人员的身体状态, 结果证实 HRV 可以早期提示疲劳的发生, 具有较高的预测价值<sup>[33]</sup>。我国现已将这些技术应用于战士日常体能训练的监测中, 以求通过合理的训练, 进一步增强我军实力。

#### 4 结语

科学的疲劳评价和监测方法, 可以有效避免战士在军事训练过程中出现体力不支、身体不适、注意力不集中、精神应激等问题, 减少军事训练伤的发生, 保证训练的科学性和安全性、提高战斗力。评价和监测军事训练中疲劳发生的方法中, 主观评价法受个人主观因素影响较大, 质量控制较难; 血液指标由于检测方法有创, 不适



合频繁开展；生理指标检测无创，可重复开展，但有观点认为人体生理功能的反应滞后于生化功能，敏感度可能较低。因此评价和监测官兵疲劳状态，可能需要综合多种方法，形成评价体系。对于军事训练疲劳的评价、监测以及相关可穿戴设备的开发，仍需要进行深入的研究。

#### 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.
- Nye NS, Pawlak MT, Webber BJ, et al. Description and rate of musculoskeletal injuries in air force basic military trainees, 2012-2014 [J]. *J Athl Train*, 2016, 51 (11): 858-865.
- Heagerty R, Sharma J, Cayton J, et al. Retrospective analysis of four-year injury data from the Infantry Training Centre, Catterick [J]. *J R Army Med Corps*, 2018, 164 (1): 35-40.
- 张佳, 李春宝, 黄鹏, 等. 外军新兵骨骼肌肉系统军事训练伤研究启示 [J]. *解放军医学院学报*, 2020, 41 (9): 934-938.
- 李春伶, 高永艳, 孙鲲, 等. 武警部队新兵军事训练伤的种类及特征 [J]. *解放军预防医学杂志*, 2015, 33 (1): 45-46.
- 张亮, 黄昌林, 左新成. 某部新兵入伍训练阶段军事训练伤的发生特点 [J]. *实用医药杂志*, 2017, 34 (5): 388-390.
- Wong IS, Popkin S, Folkard S. Working Time Society consensus statements: a multi-level approach to managing occupational sleep-related fatigue [J]. *Ind Health*, 2019, 57 (2): 228-244.
- Maneechaeye W, Deepreecha K, Jiamjarasrangsi W. Incidence and risk factors associated with injuries during static line parachute training in Royal Thai Army [J]. *Mil Med Res*, 2020, 7 (1): 27.
- 方冰, 张翠侠. 基于时空维度分析的战场态势预测方法 [J]. *指挥信息系统与技术*, 2017, 8 (1): 59-64.
- Proske U. Exercise, fatigue and proprioception: a retrospective [J]. *Exp Brain Res*, 2019, 237 (10): 2447-2459.
- Anasori E, Bayighomog SW, Tanova C. Workplace bullying, psychological distress, resilience, mindfulness, and emotional exhaustion [J]. *Serv Ind J*, 2020, 40 (1/2): 65-89.
- 邹仙, 李沁原, 左都霜, 等. 力竭后补充富氢水和葡萄糖对疲劳恢复趋势的影响 [J]. *广东医学*, 2017, 38 (18): 2750-2754.
- Heil J, Loffing F, Büsch D. The influence of exercise-induced fatigue on inter-limb asymmetries: a systematic review [J]. *Sports Med Open*, 2020, 6 (1): 39.
- Proschinger S, Freese J. Neuroimmunological and neuroenergetic aspects in exercise-induced fatigue [J]. *Exerc Immunol Rev*, 2019, 25: 8-19.
- Ma SH, Suzuki K. Keto-adaptation and endurance exercise capacity, fatigue recovery, and exercise-induced muscle and organ damage prevention: a narrative review [J]. *Sports (Basel)*, 2019, 7 (2): E40.
- Wang PX, Wang DH, Hu JM, et al. Natural bioactive peptides to beat exercise-induced fatigue: a review [J]. *Food Biosci*, 2021, 43: 101298.
- Kelley AM, Feltman KA, Curry IP. A survey of fatigue in army aviators [J]. *Aerosp Med Hum Perform*, 2018, 89 (5): 464-468.
- Ma J, Chen HM, Liu XL, et al. Exercise-induced fatigue impairs bidirectional corticostriatal synaptic plasticity [J]. *Front Cell Neurosci*, 2018, 12: 14.
- Hornsby BWY, Camarata S, Cho SJ, et al. Development and validation of the Vanderbilt fatigue scale for adults (VFS-A) [J]. *Psychol Assess*, 2021, 33 (8): 777-788.
- Penson A, van Deuren S, Worm-Smeitink M, et al. Short fatigue questionnaire: screening for severe fatigue [J]. *J Psychosom Res*, 2020, 137: 110229.
- 刘晓玲, 马素慧. 精神疲劳自评量表的汉化及信度和效度检验 [J]. *中国康复医学杂志*, 2018, 33 (8): 953-958.
- Weitz JS, Park SW, Eksin C, et al. Awareness-driven behavior changes can shift the shape of epidemics away from peaks and toward plateaus, shoulders, and oscillations [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117 (51): 32764-32771.
- Bourdillon N, Yazdani S, Nilchian M, et al. Overload blunts baroreflex only in overreached Athletes [J]. *J Sci Med Sport*, 2018, 21 (9): 941-949.
- Kim JY, Kang DH, Lee JH, et al. The effects of pre-exercise vibration stimulation on the exercise-induced muscle damage [J]. *J Phys Ther Sci*, 2017, 29 (1): 119-122.
- 陈卿, 孙磊, 邹鹏, 等. 陆军特种作战军人疲劳相关生物标志物及其与岗位特征关联分析 [J]. *第三军医大学学报*, 2019, 41 (11): 1024-1030.
- 宿旭, 张华, 王剑, 等. 航海疲劳对远航官兵静态平衡功能的影响 [J]. *解放军预防医学杂志*, 2018, 36 (12): 1511-1513.
- 赵静, 王钊, 张健, 等. 可穿戴随行监护系统在军事作业医学中的应用 [J]. *解放军医学院学报*, 2020, 41 (11): 1160-1166.
- Prylutskyy YI, Vereshchaka IV, Maznychenko AV, et al. C60 fullerene as promising therapeutic agent for correcting and preventing skeletal muscle fatigue [J]. *J Nanobiotechnology*, 2017, 15 (1): 8.
- Imani S, Bandodkar AJ, Mohan AM, et al. A wearable chemical-electrophysiological hybrid biosensing system for real-time health and fitness monitoring [J]. *Nat Commun*, 2016, 7: 11650.
- Bustos D, Guedes JC, Vaz MP, et al. Non-invasive physiological monitoring for physical exertion and fatigue assessment in military personnel: a systematic review [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18 (16): 8815.
- 马世伟, 王泽敏, 吕宝粮. 基于脑电信号的动车组司机疲劳状态评估技术研究 [J]. *铁路节能环保与安全卫生*, 2021, 11 (4): 43-49.
- 唐丹丹, 彭微微, 杨青松, 等. 刺激冲突和反应冲突的事件相关电位特征: 中顶部P3 [J]. *心理与行为研究*, 2018, 16 (1): 31-36.
- 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.