

· 综述 ·

开放获取

女性三联征与军事训练应力性骨损伤

于健¹, 于康康², 李春宝², 董晨辉^{1*}

(1. 中国人民解放军联勤保障部队第九四〇医院运动医学科, 甘肃兰州 730050;

2. 中国人民解放军总医院第四医学中心骨科医学部, 北京 100853)

摘要: 现代军事和体育训练对士兵和运动员提出更高要求, 但也增加了应力性骨损伤 (bone stress injuries, BSI) 和女性运动员三联征 (female athlete triad, FAT) 的风险。BSI 是体育运动和军事训练中常见的损伤, 能量摄入不足 (low energy availability) 相关的危险因素, 而女性运动员三联征是一种以低能量摄入为主要诱因, 且涉及营养、生殖和骨骼系统的综合症候群。本综述旨在深入探讨 BSI 与 FAT 之间的关系, 以运动中的能量摄入问题贯穿全文, 通过详细阐述 FAT 与 BSI 的发病机制与能量摄入的相关性, 以期提高对这两种疾病的认识, 促进更好的预防和康复策略, 以确保女性运动员和士兵的骨骼健康。

关键词: 女性运动员三联征, 应力性骨损伤, 低能量摄入

中图分类号: R683 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 12-1106-06

Female athlete triad and bone stress injury among military soldiers and athletes // YU Jian¹, YU Kang-kang², LI Chun-bao², DONG Chen-hui¹. 1. Department of Sports Medicine Rehabilitation, The 940th Hospital, Joint Logistics Support Force of PLA, Lanzhou 730050, China; 2. Department of Orthopaedics, The Fourth Medical Center, PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Abstract: Modern military and sports training generally puts higher demands on soldiers and athletes, but it also increases the risk of bone stress injuries (BSI) and female athlete triad (FAT). BSI is a common injury in sports and military training, with a risk factor related to low energy availability. The female athlete triad is a comprehensive syndrome with low energy availability as the core and involving nutrition, reproductive and skeletal systems. This review aims to explore the relationship between BSI and FAT in depth, with the issue of energy availability during exercise throughout this study. By elaborating on the correlation between the pathogenesis and energy availability of FAT and BSI, this review aims to enhance the understanding of these two diseases and promote better prevention and rehabilitation strategies to ensure the bone health of female athletes and soldiers.

Key words: female athlete triad, bone stress injuries, low energy availability

由于现代军事训练特点趋向高强度、多样性, 应力性骨损伤 (bone stress injuries, BSI) 问题也日益严重^[1]。士兵经常面临高负荷的训练, 如装备负重、长途行军、跳跃等, 这些活动对骨骼造成负担^[2], 军人长期处于可用能量降低可引起骨量减少, 从而增加了应力性骨折的风险^[3], 而且女性作为一种特殊群体, 若同样接受高强度体能训练和任务, 此风险更大。能量摄入不足 (low energy availability, LEA) 作为女运动员三联征 (female athlete triad, FAT) 发病的主要诱因, 它会破坏人体正常内稳态, 而运动和锻炼会加剧能量摄入缺乏导致严重的生理功能紊乱, 可增加骨骼疏松和应力性骨折的风险^[4]。

本文详细比较 BSI 和 FAT 的疾病特点与能量摄入 (energy availability, EA) 的相关性, 在军事和体育训练中寻找共性, 深入疾病早期预防和治疗的机制研究, 为医务人员和教练员提供指导, 全面推动女性健康运动的方案和政策制定。

1 女运动员三联征

FAT 指女运动员出现以月经紊乱、低能量摄入及骨密度降低为表征的相互影响的症候群, 2014年, 国际奥委会将 FAT 描述为运动中的相对能量缺乏 (deficiency in sport, RED-S)^[5], 常涉及下列 3 个

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.11026A

△基金项目: 联勤保障部队第九四〇医院军队科研项目 (编号: 2021yxky020); 全军后勤科研项目 (编号: CLB21J035); 中央高校科研基金重大需求培育资助项目 (编号: 31920220108)

作者简介: 于健, 医师, 硕士研究生, 研究方向: 运动医学与军事训练伤防控的研究, (电子信箱) yujian9511@163.com

* 通信作者: 董晨辉, (电子信箱) dong.chenhui@outlook.com

征象：伴有或不伴有饮食失调 (disordered eating, DE) 的低能量利用 (low energy availability, LEA)、月经失调 (menstrual dysfunction, MD) 和骨密度 (bone mineral density, BMD) 降低^[6]。

美国高中和大学的 FAT 发病率为 0.1%~1.2%，其中约 5% 的女性运动员出现月经功能障碍，18.2% 表现出饮食紊乱，以及 4.1% 发现骨密度降低^[7]。Gibbs 等^[8] 学者分析三联征的患病率，结果显示 2.7%~27% 运动员表现出一种体征，16%~60% 表现出任意两种以上体征，0.3%~15.9% 的运动员表现出 FAT 的三种体征，尤其是专业女性芭蕾舞、体操运动员表现出更明显的月经紊乱和更低的骨密度。运动员月经紊乱的患病率取决于运动的性质、训练强度和运动员的营养状况。最近的一项研究显示^[9]，与花样滑冰运动员和跑步者相比，芭蕾舞舞者患 FAT 的风险更高，且月经不调与饮食及体型明确相关^[18]。

2 应力性骨损伤

BSI 指由长时间重复负荷引起的一系列骨组织微观结构紊乱，继而引发骨膜炎，最终可导致部分或完全应力性骨折 (stress fracture, SF)^[10, 11]。研究显示 SF 的发生率为 0.8%^[12]，此外，女性 (63.3%) 在运动中比男性 (33.7%) 的 SF 发生率更高，SF 发病率也因运动类型而异。研究显示 SF 多发生于经常进行体育运动或军事训练人群，是骨慢性损伤积累的结果^[13, 14]。

由于军事任务是具有多样化、高强度、高负荷特点的体能训练，SF 的发病率在军事训练中更高，并且随着高强度训练时间的延长而增加^[15]。在以色列，研究显示在 8 周内，男性士兵军队训练期间的 SF 发生率为 0.9%~5.2%，女性为 3.4%~21.0%；国防军中对 62 371 名士兵 (10.1% 为女性) 进行的 4 年随访中，SF 发生率为 5.9%^[16]。

3 能量摄入

EA 是指在减去运动能量消耗后，维持人体生理功能所需的膳食能量，见于女性运动员三联征、男性运动员三联征和运动相关能量缺乏疾病 (relative energy deficiency in sports, REDs)。

在能量平衡概念中，如图 1 所示，能量消耗通常分为以下几个部分：静息代谢率 (basal metabolic rate, BMR)、体力活动消耗 2 个部分，后者可分为运动能量消耗 (extra energy expenditure, EEE) 和非运动

活动耗能 (non-exercise activity thermogenesis, NEAT)，NEAT 又包括饮食诱导产热 (diet-induced thermogenesis, DIT) 和冷诱导产热 (cold-induced thermogenesis, CIT)。当摄入能量和总能量消耗之间的差值为正时，体重就会增加，而体重下降发生在能量平衡为负值时，说明运动能量消耗 (EEE) 明显，进一步导致广泛的激素、生理和代谢失衡。

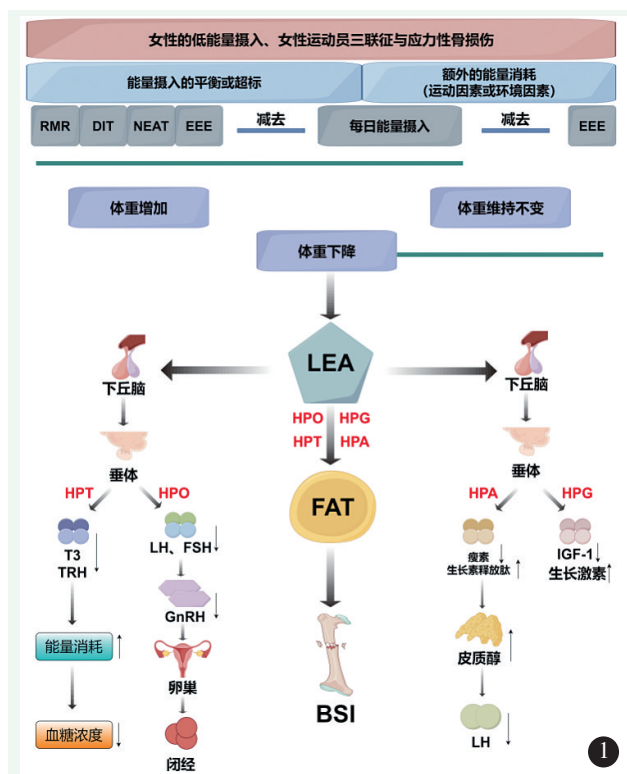


图 1. 女性运动员 LEA 与 FAT 和 BSI 发生机制的示意图。LEA 激活 HPA 轴导致机体内分泌变化；激活 HPO 轴导致月经紊乱；激活 HPT 轴导致机体分泌 T3 和促甲状腺激素释放激素减少，进而能量消耗减少；激活 HPG 轴导致机体脂肪减少、葡萄糖浓度下降。

Figure 1. Schematic diagram of LEA and FAT and BSI in female athletes. LEA activates the HPA axis and causes endocrine changes. Activation of the HPO axis leads to menstrual disorders; Activation of HPT axis leads to decreased secretion of T3 and thyrotropin releasing hormone, and thus decreased energy consumption. Activation of the HPG axis leads to a decrease in body fat and glucose concentration.

当运动员缺乏饮食知识或运动水平增加未能增加相应的能量摄入时可引起低能量摄入 (LEA)。此外，LEA 也可能由运动消耗增加与主观性降低热量摄入的联合诱发^[17]。

4 能量摄入和女性运动员三联征与应力性骨损伤的发病机制相关性探讨

由于增加运动量、减少能量摄入，或者两者结合将导致 EA 不足，对于内分泌微环境具有极大干扰和影响，由于长期的 LEA 会导致机体功能降低，从而增加对应激和疾病的易感性，心血管功能受损，神经肌肉功能降低，以及训练的适应能力下降等^[5]，但具体机制尚未完全清晰。

4.1 FAT 发病机制与低能量摄入的相关性

由于机体能量可用性降低影响了正常脂肪组织的活动，继而激活下丘脑-垂体-肾上腺 (hypothalamic-pituitary-adrenal, HPA) 轴和自主神经系统导致机体内分泌变化，从而有利于能量再分配^[18]。机体内主要表现为生长激素、生长素释放肽、皮质醇激素、肽 YY 释放增多以及瘦素、胰岛素、胰岛素样生长因子 1 (insulin-like growth factor 1, IGF-1)、催产素分泌的减少。

运动本身对月经周期无明显影响，但运动中的能量可用性降低可导致月经周期紊乱。初期可表现为黄体期缩短、无排卵性月经和月经稀发等月经失调，随着 LEA 的时间延长，可出现下丘脑性闭经 (functional hypothalamic amenorrhea, FHA)，继而导致继发性闭经，最终可影响女性生殖及妊娠功能。目前认为，LEA 引起的机体月经紊乱是由于下丘脑-垂体-卵巢 (HPO) 轴的异常活动所致。

下丘脑-垂体-卵巢轴 (hypothalamic-pituitary-ovarian axis, HPOA)：长期的 LEA 可引起女性功能性下丘脑闭经，表现为月经周期不规律。这是由于促黄体生成素 (luteinizing hormone, LH) 和促卵泡激素 (follicle stimulating hormone, FSH) 的水平降低从而抑制了促性腺激素释放激素 (gonadotropin releasing hormone, GnRH) 的功能^[19]。随着 GnRH 的水平降低可引起女性卵泡生成和排卵功能发生变化，进而引起雌二醇和孕酮水平降低^[20]。

下丘脑-垂体-生长激素轴：生长激素可通过 IGF-1 介导的通路机制发挥作用，其激素水平受生长素释放肽等激素的调节^[21]；Rickenlund 等^[22]报道了女性生长激素 (growth hormone, GH) 水平与全身脂肪和葡萄糖浓度成反比，且闭经运动员 GH 水平更高。

下丘脑-垂体-肾上腺轴：Schorr 等^[23]研究表明机体皮质醇水平与 BMI 和肥胖呈 U 形关系，极度的体重不足和超重状态都可能激活 HPA 轴，导致皮质醇水平增高；Ackerman 等^[24]研究表明低脂肪量与高皮质醇水平有关，机体内瘦素的减少和生长素释放肽的增多导致皮质醇浓度增高，从而抑制 LH 的分

泌。

下丘脑-垂体-甲状腺轴的相关研究发现：LEA 可导致机体分泌 T3 和促甲状腺激素释放激素 (thyrotropin-releasing hormone, TRH) 减少，而导致能量消耗减少，甲状腺素和促甲状腺激素 (TSH) 在正常范围^[25]。

FAT 的发病机制以能量摄入不足为主要病因，涉及多种激素调控失衡。低能量摄入将导致身体脂肪量减少，并在被识别为一种内部应激状态后激活不同的途径。高水平的皮质醇及生长素释放肽、低水平的瘦素、胰岛素、肽 YY 在高应激状态下会抑制下丘脑-垂体-卵巢轴的正常功能，直接或间接抑制 LH 的分泌，进而导致月经不规则或下丘脑闭经后影响骨骼肌肉系统，出现相应的临床症状。

4.2 LEA 与 BMD 的相关性分析

LEA 引起的机体一系列内分泌变化进一步影响骨密度 (bone mineral density, BMD)，破坏骨结构和微结构，最终导致 BMD 下降。一般情况下骨骼健康受到影响后往往没有明显的症状，长期发展将会导致 BMD 明显下降，进而增加 SF 的风险，如雌激素、IGF-1、瘦素、T3、皮质醇、胰岛素^[26]，这一系列变化导致了以抑制骨形成为主的骨代谢变化，引起正常的骨折修复机制受损，进而增加了骨折的风险。另外，长期的低能量摄入导致低碳水化合物利用率下降，对骨形成和吸收的标志物均有负面影响^[27]。

4.3 BSI 发病机制和 LEA 的相关性

近年来，研究表促进骨密度增加主要通过 Wnt 信号通路、增加骨吸收的 RANKL/RANK/OPG 系统和调节骨代谢的 mTOR 信号通路^[28]，微损伤可诱导骨基质中的局部骨细胞凋亡^[29]。骨细胞及成骨细胞是核因子- κ B 配体受体激活因子 (receptor activator of nuclear factor- κ B ligand, RANKL) 和骨保护素 (osteoclastogenesis inhibitory factor, OPG) 的重要来源^[30]。RANKL 可与破骨细胞前体细胞上的受体 RANK 结合可诱导其分化，对维持破骨细胞活性具有重要作用^[31]。OPG 可拮抗性竞争破骨细胞上前体的 RANKL 结合位点来抑制破骨细胞的作用^[32]。微损伤引起的骨细胞凋亡可改变 RANKL/OPG 比值，有利于 RANKL 表达，进而刺激破骨细胞的生成和吸收，启动骨重塑^[33]。疾病过程中，参与胶原蛋白的基因 COL1A1 和 COL1A2、促进成骨细胞分化的 RUNX2，以维持骨骼发育的 WNT 家族基因均与该病有关联^[34]。在过度使用和休息不足的情况下，骨折的累积超过了身体的修复能力，导致骨骼受损。

月经初潮可促进女孩骨骼发育，而初潮较晚可能对中轴骨和骨小梁形成产生负面影响。闭经和初潮较晚是提示慢性月经功能障碍的危险因素，对骨骼健康具有重要意义^[35]，且在高负荷的训练中可获得足够的能量摄入来维持月经周期。Gibbs 等^[35]发现月经初潮较晚是低 BMD 的主要预测因素；与月经功能正常的女性相比，月经功能障碍表现低 BMD 的风险更高。De Souza 等^[36]报道了在 LEA 的情况下，雌激素缺乏与女性低 BMD 有关。月经初潮延迟可能导致运动员在较晚的实际年龄达到峰值骨量，从而使他们在随后几年内发生 BSI 的风险增大^[8]。

Gibbs 等^[35]证实低 BMI 运动员中出现低 BMD、月经不调和饮食失调的风险更大。然而，低能量摄入可导致催产素释放减少，催产素 (oxytocin, OXT) 在骨髓间充质干细胞、成骨细胞、破骨细胞、骨细胞、软骨细胞等多种细胞中均可表达，在维持骨形成与骨吸收平衡方面发挥着重要作用。研究表明催产素与受体结合后，可放大雌激素作用，正反馈调节 OXT 分泌^[26]；另外，成骨细胞需在雌激素介导下合成催产素，进而调节骨细胞活性；OXT 对破骨细胞有双向调节作用，即调节破骨细胞生成的同时，抑制破骨细胞介导的骨吸收^[37]。去卵巢大鼠骨髓中的骨细胞显著减少，而予以催产素干预后，大鼠血清中骨标志物水平显著下降，骨细胞数量和骨密度的增加，LEA 会导致催产素及雌激素水平下降，打破骨稳态后出现骨密度异常^[38]。长期 LEA 导致慢性炎症，而这种炎症可能干扰雌激素的分泌和信号传递，进而加速骨质丢失^[39]；此类患者的血液中炎症因子明显增高，如 C-反应蛋白、IL-6 和 TNF- α ^[40]；进一步，炎症引发的连锁反应不仅增加骨折风险，也可能引起心血管疾病、少肌症及严重骨质疏松等其他健康问题^[5]。当然，运动员本身存在的情绪问题，如焦虑和抑郁等情节，也会加重三联征的症状。相对能量缺乏导致了月经紊乱，体内低能量摄入抑制 HPO 轴，雌激素水平下降，进而影响正常的月经周期。女性运动员三联征中的这 3 个要素相互作用，形成了恶性循环：LEA 引起月经及其他系统的内分泌紊乱，导致了雌激素等多种激素水平下降，进一步影响了骨密度，从而增加了应力性骨折的风险，而应力性骨折也会加重运动员的能量消耗，加剧相对能量缺乏^[41]。

因此，FAT 的治疗具体措施为饮食营养上确保运动员补充足够的钙、维生素 D 和其他重要营养素，以维护骨骼健康。某些女运动员可能会接受雌激素替代疗法，以帮助提高骨密度^[42]。治疗应力性骨

损伤需要综合考虑患者的状况和损伤的程度，然后进行适当的康复训练、物理疗法以及骨密度管理，从而有助于维护骨骼健康。

5 总结与展望

现代女性军事训练和运动员所面临的健康挑战，BSI 和 FAT 均涉及到骨骼系统，且与能量摄入不足有关联，严重影响女性训练成绩的提升。通过本研究发现低能量摄入作为主要诱因，能将 FAT 和 BSI 串联起来，相对低能量摄入对这 2 种疾病的发生和演变具有重要意义，予以有针对性的个性化的预防和治疗非常关键。未来，应更多地关注女性骨骼健康与低能量摄入的相关性，探索更多治疗方法以改善女性女性官兵的长期的“隐痛”，减少 SF 和 FAT 的发生。

参考文献

- [1] Lennox GM, Wood PM, Schram B, et al. Non-modifiable risk factors for stress fractures in military personnel undergoing training: a systematic review [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 19 (1): 422. DOI: 10.3390/ijerph19010422.
- [2] Jordaan G, Schwellnus MP. The incidence of overuse injuries in military recruits during basic military training [J]. *Mil Med*, 1994, 159 (6): 421-426.
- [3] O'leary TJ, Wardle SL, Greeves JP. Energy deficiency in soldiers: the risk of the athlete triad and relative energy deficiency in sport syndromes in the military [J]. *Front Nutr*, 2020, 7: 142. DOI: 10.3389/fnut.2020.00142.
- [4] Williams NI, Statuta SM, Austin A. Female athlete triad: future directions for energy availability and eating disorder research and practice [J]. *Clin Sports Med*, 2017, 36 (4): 671-686. DOI: 10.1016/j.csm.2017.05.003.
- [5] Mountjoy M, Sundgot-Borgen J, Burke L, et al. The IOC consensus statement: beyond the female athlete triad--relative energy deficiency in sport (RED-S) [J]. *Br J Sports Med*, 2014, 48 (7): 491-497. DOI: 10.1136/bjsports-2014-093502.
- [6] De Souza MJ, Williams NI, Nattiv A, et al. Misunderstanding the female athlete triad: refuting the IOC consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S) [J]. *Br J Sports Med*, 2014, 48 (20): 1461-1465. DOI: 10.1136/bjsports-2014-093958.
- [7] Nichols JF, Rauh MJ, Lawson MJ, et al. Prevalence of the female athlete triad syndrome among high school athletes [J]. *Arch Pediatr Adolesc Med*, 2006, 160 (2): 137-142. DOI: 10.1001/archpedi.160.2.137.
- [8] Gibbs JC, Williams NI, De Souza MJ. Prevalence of individual and combined components of the female athlete triad [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2013, 45 (5): 985-996.
- [9] Tosi M, Maslyanskaya S, Dodson NA, et al. The female athlete tri-

- ad: a comparison of knowledge and risk in adolescent and young adult figure skaters, dancers, and runners [J]. *J Pediatr Adolesc Gynecol*, 2019, 32 (2): 165–169.
- [10] Beck B, Drysdale L. Risk factors, diagnosis and management of bone stress injuries in adolescent athletes: a narrative review [J]. *Sports (Basel)*, 2021, 9 (4): 52. DOI: 10.3390/sports9040052.
- [11] 张巩, 孔令超, 刘平举, 等. 全膝置换治疗终末膝病并胫骨应力骨折 1 例报道 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (18): 1724–1726. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.18.24.
- Zhang G, Kong LC, Liu PG, et al. A case report of total knee replacement for the treatment of terminal knee disease with tibial stress fracture [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (18): 1724–1726. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.18.24.
- [12] Changstrom BG, Brou L, Khodae M, et al. Epidemiology of stress fracture injuries among US high school athletes, 2005–2006 through 2012–2013 [J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43 (1): 26–33.
- [13] 孙宝平, 李强, 孙嘉阳, 等. 膝关节骨性关节炎合并胫骨应力性骨折 1 例报道 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2017, 25 (8): 766–768. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2017.08.20.
- Sun BP, Li Q, Sun JY, et al. A case report of knee osteoarthritis combined with tibial stress fracture [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2017, 25 (8): 766–768. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2017.08.20.
- [14] 王星亮, 华国军, 杨家骥, 等. 新兵集训致股骨颈应力性骨折 3 例并文献复习 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2016, 24 (2): 141–146. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016.02.10.
- Wang XL, Hua GJ, Yang JJ, et al. Stress fractures of femoral neck in recruits: a report of three cases and literature review [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2016, 24 (2): 141–146. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2016-02.10.
- [15] Da Rocha Lemos Costa TM, Borba VZC, Correa RGP, et al. Stress fractures [J]. *Arch Endocrinol Metab*, 2022, 66 (5): 765–773. DOI: 10.20945/2359-3997000000562.
- [16] Shapiro M, Zubkov K, Landau R. Diagnosis of stress fractures in military trainees: a large-scale cohort [J]. *BMJ Mil Health*, 2022, 168 (5): 382–385. DOI: 10.1136/bmjilitary-2020-001406.
- [17] Temme KE, Hoch AZ. Recognition and rehabilitation of the female athlete triad/tetrad: a multidisciplinary approach [J]. *Curr Sports Med Rep*, 2013, 12 (3): 190–199. DOI: 10.1249/JSR.0b013e318296190b.
- [18] Coelho AR, Cardoso G, Brito ME, et al. The female athlete triad/relative energy deficiency in sports (RED-S) [J]. *Rev Bras Ginecol Obstet*, 2021, 43 (5): 395–402. DOI: 10.1055/s-0041-1730289.
- [19] Gordon CM, Ackerman KE, Berga SL, et al. Functional hypothalamic amenorrhea: an endocrine society clinical practice guideline [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2017, 102 (5): 1413–1439. DOI: 10.1210/jc.2017-00131.
- [20] Weiss Kelly AK, Hecht S. The female athlete triad [J]. *Pediatrics*, 2016, 138 (2): e20160922. DOI: 10.1055/s-0041-1730289.
- [21] Elliott-Sale KJ, Tenforde AS, Parziale AL, et al. Endocrine effects of relative energy deficiency in sport [J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2018, 28 (4): 335–349. DOI: 10.1123/ijnsnem.2018-0127.
- [22] Rickenlund A, Thorén M, Carlström K, et al. Diurnal profiles of testosterone and pituitary hormones suggest different mechanisms for menstrual disturbances in endurance athletes [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2004, 89 (2): 702–707. DOI: 10.1210/jc.2003-030306.
- [23] Schorr M, Lawson EA, Dichtel LE, et al. Cortisol measures across the weight spectrum [J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 2015, 100 (9): 3313–3321. DOI: 10.1210/JC.2015-2078.
- [24] Ackerman KE, Patel KT, Guereca G, et al. Cortisol secretory parameters in young exercisers in relation to LH secretion and bone parameters [J]. *Clin Endocrinol (Oxf)*, 2013, 78 (1): 114–119. DOI: 10.1111/j.1365-2265.2012.04458.x.
- [25] Michopoulos V, Mancini F, Loucks TL, et al. Neuroendocrine recovery initiated by cognitive behavioral therapy in women with functional hypothalamic amenorrhea: a randomized, controlled trial [J]. *Fertil Steril*, 2013, 99 (7): 2084–2091.e1. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2013.02.036.
- [26] Fallahnezhad S, Jajarmi V, Shahnavaz S, et al. Improvement in viability and mineralization of osteoporotic bone marrow mesenchymal stem cell through combined application of photobiomodulation therapy and oxytocin [J]. *Lasers Med Sci*, 2020, 35 (3): 557–566. DOI: 10.1007/s10103-019-02848-8.
- [27] Heikura IA, Burke LM, Hawley JA, et al. A short-term ketogenic diet impairs markers of bone health in response to exercise [J]. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 2019, 10: 880. DOI: 10.3389/fendo.2019.00880.
- [28] Sun K, Luo J, Guo J, et al. The PI3K/AKT/mTOR signaling pathway in osteoarthritis: a narrative review [J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2020, 28 (4): 400–409. DOI: 10.1016/j.joca.2020.02.027.
- [29] Verborgt O, Gibson GJ, Schaffler MB. Loss of osteocyte integrity in association with microdamage and bone remodeling after fatigue in vivo [J]. *J Bone Miner Res*, 2000, 15 (1): 60–67. DOI: 10.1359/jbmr.2000.15.1.60.
- [30] Nakashima T, Hayashi M, Fukunaga T, et al. Evidence for osteocyte regulation of bone homeostasis through RANKL expression [J]. *Nat Med*, 2011, 17 (10): 1231–1234. DOI: 10.1038/nm.2452.
- [31] Lacey DL, Timms E, Tan HL, et al. Osteoprotegerin ligand is a cytokine that regulates osteoclast differentiation and activation [J]. *Cell*, 1998, 93 (2): 165–176. DOI: 10.1016/s0092-8674(00)81569-x.
- [32] Hoening T, Ackerman KE, Beck BR, et al. Bone stress injuries [J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2022, 8 (1): 26. DOI: 10.1080/0284185041004724.
- [33] Mccutcheon S, Majeska RJ, Spray DC, et al. Apoptotic osteocytes induce RANKL production in bystanders via purinergic signaling and activation of pannexin channels [J]. *J Bone Miner Res*, 2020, 35 (5): 966–977. DOI: 10.1002/jbmr.3954.
- [34] Komori T. Runx2, an inducer of osteoblast and chondrocyte differentiation [J]. *Histochem Cell Biol*, 2018, 149 (4): 313–323. DOI: 10.1007/s00418-018-1640-6.
- [35] Gibbs JC, Nattiv A, Barrack MT, et al. Low bone density risk is

- higher in exercising women with multiple triad risk factors [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2014, 46 (1) : 167-176. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3182a03b8b.
- [36] De Souza MJ, West SL, Jamal SA, et al. The presence of both an energy deficiency and estrogen deficiency exacerbate alterations of bone metabolism in exercising women [J]. *Bone*, 2008, 43 (1) : 140-148. DOI: 10.1016/j.bone.2008.03.013.
- [37] Qin W, Sun L, Cao J, et al. The central nervous system (CNS)-independent anti-bone-resorptive activity of muscle contraction and the underlying molecular and cellular signatures [J]. *J Biol Chem*, 2013, 288 (19) : 13511-13521. DOI: 10.1074/jbc.M113.454892.
- [38] Qian M, Liu M, Duan M, et al. Synthesis of composites SBA-15 mesoporous particles carrying oxytocin and evaluation of their properties, functions, and in vitro biological activities [J]. *Cell Biochem Biophys*, 2015, 71 (1) : 127-134. DOI: 10.1007/s12013-014-0172-5.
- [39] Maya J, Misra M. The female athlete triad: review of current literature [J]. *Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes*, 2022, 29 (1) : 44-51. DOI: 10.1097/MED.0000000000000690.
- [40] Luti S, Modesti A, Modesti PA. Inflammation, peripheral signals and redox homeostasis in athletes who practice different sports [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2020, 9 (11) : 1065. DOI: 10.3390/antiox9111065.
- [41] Johnston K. Sports medicine: relative energy deficiency in sport [J]. *FP Essent*, 2022, 518: 18-22.
- [42] Thein-Nissenbaum J, Hammer E. Treatment strategies for the female athlete triad in the adolescent athlete: current perspectives [J]. *Open Access J Sports Med*, 2017, 8: 85-95. DOI: 10.2147/OAJSM.S100026.
- (收稿: 2024-01-06 修回: 2024-04-01)
(同行评议专家: 江辉, 丛琳, 胡海波)
(本文编辑: 宁桦)

(上接 1105 页)

- [24] 王志刚, 安辉, 邵明华, 等. 美军军事训练伤预防研究及启示 [J]. *人民军医*, 2019, 62 (7) : 617-621.
Wang ZG, An H, Shao MH, et al. Research and enlightenment on the prevention of military training injuries in the U.S. military [J]. *People's Military Surgeons*, 2019, 62 (7) : 617-621.
- [25] 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. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2020.09.020.
Zhang J, Li CB, Huang P, et al. Enlightenment of research on military training injuries of musculoskeletal system of foreign military recruits [J]. *Academic Journal of Chinese PLA Medical School*, 2020, 41 (9) : 934-938. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2020.09.020.
- [26] 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, 1246. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2020.12.015.
Wu J, Li CB, Huang P, et al. A review of the epidemiological research of military training injuries in our army [J]. *Academic Journal of Chinese PLA Medical School*, 2020, 41 (12) : 1236-1239, 1246. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2020.12.015.
- [27] 常祺, 李春宝, 贺杰, 等. 军事训练伤诊断与防治原则专家共识 (2022 版) [J]. *军事医学*, 2022, 46 (9) : 641-646. DOI: 10.7644/j.issn.1674-9960.2022.09.001.
Chang Q, Li CB, He J, et al. Expert consensus on the principles of diagnosis and prevention of military training injuries (2022 edition) [J]. *Military Medicine Science*, 2022, 46 (9) : 641-646. DOI: 10.7644/j.issn.1674-9960.2022.09.001.
- (收稿: 2024-01-02 修回: 2024-04-06)
(同行评议专家: 王晓宇, 金玉鸣)
(本文编辑: 宁桦)