



赛艇运动员肋骨应力损伤机制、风险因素及防治研究

Research on the Mechanism, Risk Factors and Prevention of Rib Stress Injury in Rowers

梁艺炜, 杨海晨*

LIANG Yiwei, YANG Haichen*

摘要: 肋骨应力损伤(rib stress injury, RSI)是赛艇运动员报道最多、训练时间损失较长的伤病类型。围绕病因机制、风险因素及防治措施3个方面进行回顾与梳理,发现RSI与运动员躯干、四肢和肌肉骨骼的划桨生物力学存在关联,并提出涉及前锯肌、腹外斜肌和肩关节牵开器作用的可能损伤机制。致伤病因的关键风险因素包括:内在因素(低骨密度、性别)、外在因素(训练负荷和运动水平、划桨技术、设备类型等)和其他可能性成因。基于此,提出针对性的风险预防及管理策略,并对已有损伤症状进行诊断决策和治疗康复。

关键词: 赛艇;肋骨应力损伤;防治措施

Abstract: Rib stress injury (RSI) is the most reported type of injury in rowers with long training time loss. This study reviews and combs the three aspects of etiological mechanism, risk factors and prevention and treatment measures. The study found that RSI is related to the rowing biomechanics of athletes' trunk, limbs and musculoskeletal, and proposed possible damage mechanism involving the role of serratus anterior, external oblique and shoulder joint retractor. The key risk factors for the cause of injury include: internal factors (low bone density, gender), external factors (training load and exercise level, rowing technique, type of equipment, etc.) and other possible causes. Based on this, targeted risk prevention and management strategies are proposed, and diagnosis, treatment and rehabilitation of existing injury symptoms are carried out.

Keywords: rowing; rib stress injury; prevention measures

中图分类号:G861.4 **文献标识码:**A

赛艇长周期、多频次、高负荷的运动特点容易使运动员身体部分部位受到较强负荷压力或超负荷反应,出现各种急性(创伤)或慢性(过度使用)运动损伤。针对赛艇运动员伤病类型和损伤区域的研究发现,肩部、胸腰椎、下背部、膝盖和脚踝疼痛、肋骨应激等过度使用性损伤($n=224$, 83%)在赛艇运动中更为常见(Grima et al., 2023; Madison et al., 2021),占女性赛艇运动员运动损伤的72.1%、占男性69.5%(Smoljanovic et al., 2009),严重影响运动员的竞技水平和身体健康。其中,肋骨应力损伤(rib stress injury, RSI)是赛艇运动员训练时间损失较长和报道最多的受伤类型。研究发现,RSI多发生在精英赛艇运动员(8%~22%)和重大赛季中,平均损失3~6周的训练时间,严重可能出现持续疼痛和损伤不愈合等并发症,从而导致职业生涯终止(Vinther et al., 2016)。

赛艇是我国在2024年巴黎奥运会中夺牌主力项目。为精准备赛,避免较多训练时间损失,针对赛艇运动员赛前训练和比赛期间可能出现的RSI风险及症状进行预防、识别和治疗管理非常重要。目前,国内学界主要是对小型队列的运动创伤种类和现状的研究(任素春等,1998;张鑫等,2012),鲜少深入探讨常见损伤类型和具体部位损伤问题及其影响。现有研究聚焦于赛艇运动员训练理念及方法(陈小平等,2011)、动作技术优化(闫家祥等,2023;张英平等,2021)、训练效果及生理生化影响(高炳宏等,

第一作者简介:

梁艺炜(1997-),女,硕士,主要研究方向为运动损伤、体育人类学, E-mail:lw322214xp@aliyun.com。

*通信作者简介:

杨海晨(1977-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为体育人类学及组织行为, E-mail: yhaichen2011@126.com。

作者单位:

福建师范大学,福建福州 350117
Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China.

2019;黎涌明等,2018;马涛等,2019)等方面。鉴于国外在赛艇运动员运动损伤方面已经取得了系列研究成果,由此,本研究旨在综述探讨国外赛艇运动员RSI成因、风险因素及有效防治策略的相关研究。

1 赛艇运动员RSI成因机制

赛艇是一项周期性循环的力量耐力型运动,划桨过程中重复连续地屈曲/伸展活动主要涉及运动员约70%肌肉群的生物力学作用(Richter et al.,2010)。针对赛艇运动员肌肉、四肢和躯干的运动学研究发现,在划桨初始(抓水和驱动过程)阶段,桨叶片推水的作用力是运动员腿部(46.4%±4.5%)、躯干(30.9%±5.2%)和手臂(22.7%±5.2%)肌肉阶段性活动的结果(Kleshnev et al.,2002)。其中,躯干是腿部力量传输到手臂划桨用力的关键。研究发现,运动员划桨过程中手臂肌肉与腿部驱动力($R^2=0.424$)及大腿前部肌肉配合躯干摆动力($R^2=0.335$)均具有显著相关性(Tachibana et al.,2007)。因此,运动员施加到桨柄的力取决于腿部可以产生和传递的肌肉骨骼力及躯干摆动力的力矩(Arumugam et al.,2020)。当腿部驱动力过度或躯干摆动幅度过大时,容易导致部分肌肉骨骼的过度负载,产生运动损伤风险(Gomez et al.,2020)。Kim等(2021)研究发现,赛艇运动员划桨过程中多次重复和最大屈曲/伸展运动容易造成肋骨轴对过度重复负荷的不适应,导致骨中累积微损伤的连续发生,骨重塑过程中正常骨吸收(破骨细胞分解旧骨)和修复(骨化)的比例失衡,从而引发肋骨应力反应到肋骨应力性骨折的RSI病症。

关注和析赛艇运动员划桨生物力学过程有助于明晰损伤成因、预防损伤发生。由此,部分学者运用Powerline赛艇实船生物力学测试系统等,对运动员划桨过程中关键技术动作与姿势进行了肋骨关联肌群的生物力学探究,提出以下主要RSI机理。

1.1 肌肉收缩反复应力的胸腔压缩

依据赛艇运动员重复肢体活动导致肌肉连续收缩以提供桨柄推进力的运动学模式,部分研究提出了涉及前锯肌、腹外斜肌和肩关节牵开器作用力学的RSI机制。Karlson(1998)研究认为,驱动结束时,前锯肌和腹外斜肌共同收缩产生的反向应力会在肋骨骨连接处产生剪切力(肋骨受到插入肌肉附件的对抗性牵引力),造成肋骨骨骼微损伤。当收缩幅度的增大和剪切力的反复施加超过肋骨的弹性极限时,会导致肋骨外侧段受向下的弯曲力变形产生RSI,严重则会导致肋骨应力性骨折(Carr II et al.,2017)。Vinther等(2006)的研究结论支持了这一可能,与对照组(30.8%±6.5%)相比,RSI组(47.5%±3.4%)运动员的前锯肌和斜方肌纤维共同收缩,EMG肌电信号重叠或 EMG_{max} 明显增大。此外,Warden等(2002)提出,

在驱动过程中,赛艇运动员胸肌等长收缩产生的脚力传递到桨柄的肩关节正向前伸力,与肩关节牵开器抵抗前伸产生的收缩力合成了力矩合力,并在划桨驱动中间阶段达到力的最大峰值,而过度的力矩合力会导致肋骨过度应力和胸腔压缩,从而造成RSI(图1)。

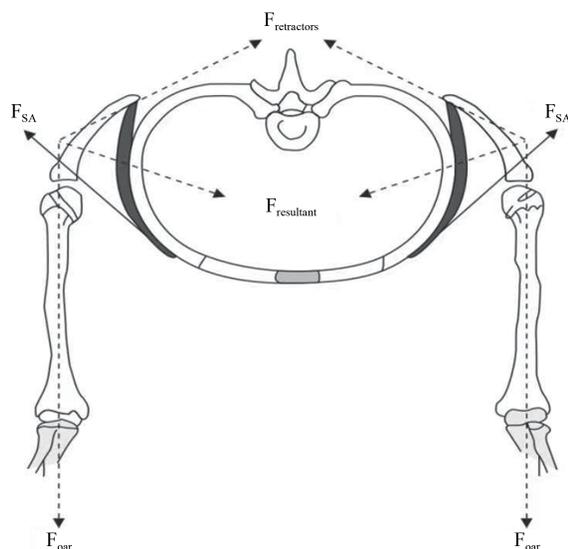


图1 胸腔压缩原理示意图(Warden et al.,2002)

Figure 1. Schematic Diagram of Thoracic Compression Principle (Warden et al.,2002)

注: F_{SA} ·前锯肌在肋骨起点处的力,能够提升肋骨以保护其免受外斜肌的剪切作用; F_{orar} ·上肢划桨的力; $F_{retractors}$ ·牵开器在肩胛骨上的力; $F_{resultant}$ ·牵开器和桨的合力,在胸腔两侧产生压缩力矩。

1.2 运动疲劳导致的肋骨负荷压迫

McGuire等(2020)研究认为,在划桨抓水阶段,桨叶片上的力通过桨传递到肌肉骨骼系统,并在驱动阶段迅速增加。但高负荷强度的力和高胸腰椎屈曲、复合姿势(侧屈、旋转)的重复性动作姿势容易诱发运动控制系统受损,导致运动员协调模式障碍和肌力降低,出现运动疲劳现象。而运动疲劳会引起运动模式和应力分布改变,即运动员肌肉系统会将过度的力重新分配给底层骨骼,并沿骨骼传递到损伤部位,增加应力性骨折风险(McGuire et al.,2020)。Bouffard等(2018)研究发现,当赛艇运动员在驱动阶段出现中斜方肌疲劳时,常使用躯干补偿重复性运动方法来调节肌肉的疲劳表现,但躯干的过度运动会使躯干屈肌、伸肌激活增加和屈曲活动范围即最大活动范围(range of movement, ROM)占比增大,促使肩胛骨开始向前滑动,肩部弯曲幅度加大,改变传递的脚力作用在肋骨上的角度,导致肩胛骨前外侧对肋骨中外侧的压力增大,产生RSI风险(Li et al.,2023)。此外,有研究发现,驱动阶段结束后,前锯肌因疲劳无法抵抗腹外斜肌用力呼气协助划水前进和抵抗后坐中产生的肋骨负荷累积压迫,也可能是导致RSI的原因之一(Wajswelner et al.,2000)。

2 赛艇运动员RSI的风险因素

了解和识别影响肋骨损伤病因的风险因素对于预防损伤和制定风险管理策略具有重要的指导意义。通过总结归纳现有研究及案例,将RSI机制可能存在的风险因素划分为3类:1)低骨密度(low bone mineral density, LBMD)、性别等影响运动员自身对外加负荷反应能力的内在风险因素;2)训练负荷和运动水平、划桨技术、设备类型等影响运动员受伤的外在风险因素;3)其他可能性成因。

2.1 内在风险因素

2.1.1 LBMD

骨矿物质密度(bone mineral density, BMD)是指由钙含量表示的骨强度的量度,对维持骨骼系统健康具有重要作用。骨骼缺乏矿物或弹性阻力处于LBMD状态时,会增加运动员患骨质疏松症和应力性骨损伤的风险(Moreira et al., 2017)。有研究表明,赛艇运动员RSI多发生于LBMD状态下的肋骨骨骼周期性较大机械载荷期间,而运动相对能量不足(relative energy deficiency in sport, RED-S)、钙和维生素D不足等是导致赛艇运动员LBMD的主要原因(Ackerman et al., 2019; Logue et al., 2020; Mountjoy et al., 2018)。

Keay等(2019)研究发现,为达到比赛要求和保持竞争力,轻量级赛艇运动员积极的减肥策略和体重限制容易出现饮食失调和能量摄入不足,产生较高的RED-S风险。目前,已有部分证据支持RED-S与赛艇运动员LBMD和肋骨损伤风险有关。研究发现,RED-S损害运动员的内分泌系统(代谢、激素和其他生理功能)、肌肉骨骼健康、免疫系统等(Logue et al., 2020),引发黄体生成激素下降和下丘脑促性腺激素释放,导致女性赛艇运动员低雌激素水平和功能性下丘脑性闭经(functional hypothalamic amenorrhea, FHA)(Huhmann, 2020),以及男性赛艇运动员的低睾酮激素和促性腺功能减退(Kraus et al., 2019),从而使其骨骼损伤修复和重塑,出现不可逆的骨密度降低,损害骨骼健康,增加肋骨损伤风险(Brook et al., 2019; Scheffer et al., 2023)。

此外,在2 000 m赛艇比赛中,运动员有氧供能比例>80%,良好的运动表现主要依靠运动员自身机能的能量供应和营养支持(De Campos Mello et al., 2009)。该研究发现,在体力活动期间,赛艇运动员主要依赖钙、维生素D等营养物质充足的有效能量供应保持骨骼健康。Lundy等(2023)研究认为,随着训练时间和负荷量的逐步增加,赛艇运动员体内游离钙浓度逐渐降低,导致BMD减少和骨损伤风险增加。Baker等(2022)研究发现,与健康的赛艇运动员相比,肋骨损伤赛艇运动员少消耗了近500 mg/d的钙含量($P=0.015$; $ES=1.11$)。而维生素D作为钙稳态的调节剂,通常通过测量其生物不活跃形式25-羟维生素D[25(OH)D]的血清水平来确定。研究发现,25(OH)D对

人体骨代谢和整体骨骼健康起到调节和支持作用(Wiciński et al., 2019)。缺乏25(OH)D已被证明与LBMD和应力性骨折发生率增加相关(Richards et al., 2020)。Knechtle等(2021)研究发现,当运动员25(OH)D值长期<75.8 nmol/L时,RSI风险增加。

2.1.2 性别

研究发现,女性赛艇运动员肋骨疼痛发生率是男性赛艇运动员的2.7~3.0倍(Dimitriou et al., 2014)。这主要与不同性别身体成分、运动机能和生理结构等方面的差异有关。1)身体成分和运动机能差异。Sebastia-Amat等(2020)研究认为,身体成分(体重、身高、肌肉质量、体脂等)、力量强度和心血管耐力等是赛艇运动员良好表现的关键因素。男性上身肌肉质量较高、体脂率低及代谢能力和最大摄氧量水平较高等体征因素使其运动表现优于女性(Keenan et al., 2018)。研究表明,同等条件下,与身高、体重相似的男性赛艇运动员相比,女性赛艇运动员比赛成绩较慢。为了延缓运动疲劳和获取较长划程中所需的较高肌肉力量和耐力需求,女性运动员容易出现低能量利用率和营养不足状况,引发RED-S症状,损害骨骼健康,导致骨应力损伤风险(De Souza et al., 2019; Sandbakk et al., 2018)。2)生理构造差异。研究发现,男、女运动员在躯干、肌肉骨骼等方面(脊柱柔韧性、脊柱排列等)的生理构造不同(Ng et al., 2013)。与男性相比,女性横截面肋骨刚度较低(Kimpara et al., 2003),且女性躯干肌肉相对较弱,较难在完成阶段将躯干稳定在中立位置(坐起)(Holt et al., 2003)。因此,女性赛艇运动员完成阶段的腰椎、肩关节部位通常表现出更大的屈/伸活动范围和更多的伸展位置姿势,这可能会增加胸部压缩损伤和肋骨损伤风险(Li et al., 2023)。

2.2 外在风险因素

2.2.1 训练负荷和运动水平

在赛艇运动中,运动员RSI或骨折多与训练负荷量、强度的突然变化相关,且多发生在比赛高峰期间。一项历时5年针对2016年里约奥运会澳大利亚赛艇运动员的队列研究发现,32%的运动员RSI发生在明显的负荷变化后,如高负荷训练或休息1周后恢复训练时(Harris et al., 2020)。Bishop等(2021)研究认为,由于比赛期间训练强度(通常在60%~100%)和训练量(重复循环次数等)的急剧增加,容易让赛艇运动员产生肋骨轴对过度和重复负荷的不适应,使得肋骨承受负荷增加,从而导致RSI风险。

此外,Smoljanovic等(2007)研究发现,RSI在19~33岁的赛艇运动员中更为普遍,其中86%的受伤运动员保持精英状态水平。McDonnell等(2011)研究认为,赛艇运动员的肋骨损伤与年龄关系不大,更多是受到运动水平和训练负荷的影响。Dimitriou等(2014)提出,精英赛艇运动员的高训练频次和较多比赛暴露是其RSI发生率较大

的原因。随后, Verrall 等(2014)对南澳大利亚体育学院赛艇计划参与者进行的回顾性分析证实了这一观点, 发现与国家赛艇运动员($\chi^2=3.84, P=0.05$)相比, 国际赛艇运动员发生 RSI 的概率更大($\chi^2=3.96, P=0.04$)。因此, 训练负荷和强度较大、运动水平较高的赛艇运动员更易患 RSI。

2.2.2 划桨技术

竞技赛艇注重运动员划桨过程中腿部、躯干和手臂运动的正确发力顺序和良好衔接能力, 强调科学的划桨技术和高效的运动模式。其中, 顺序运动策略模式(开始驱动阶段先伸展腿部, 再延迟伸展躯干和手臂)是赛艇运动员训练和比赛常用技术之一。研究发现, 顺序运动策略模式中较快的滑座和手柄速度、较大的躯干活动强度和范围等不良划桨技术可能是增加赛艇运动员 RSI 风险的潜在影响因素(McDonnell et al., 2011)。

一项针对丹麦国家赛艇队的横断面研究发现, 在初始驱动阶段(第一个 1/4 驱动阶段), 相比健康的精英赛艇运动员, 患有 RSI 的精英赛艇运动员滑座-手柄移动速度差异比更高(-0.01 m/s vs 0.18 m/s, $P=0.075$) (Vinther et al., 2006)。较高的滑座-手柄速度比会引起运动员胸肌向心收缩力的增加, 根据胸腔压缩理论, 收缩力增加会加大胸腔压缩力矩, 使运动员胸椎部位负荷过重(d'Ailly et al., 2016)。同时, 顺序运动策略模式有着较高的划桨功率输出, 但划桨效率较低。当对桨不断施加载荷后, 随着分段速度的增加和峰值段力的减少, 运动员腿、躯干和手臂的顺序用力也被适当加载, 表现出较低的腿部/手臂力量比(Kleshnev et al., 1998)。为了应对较高的桨柄推进力需求, 避免早期疲劳, 运动员腿部和肩膀的弯曲程度逐渐增大, 导致更大的骨盆后倾斜、腰部屈曲/伸展、胸部屈曲/伸展、肩胛骨前伸/后缩、腰骶部屈曲/伸展范围, 诱发 RSI 风险(Li et al., 2023)。

2.2.3 设备类型

Thornton 等(2018)研究认为, 桨叶片形状变化和桨长度差异(图 2)是导致 RSI 风险的可能因素之一。与梅肯桨叶片相比, 短柄斧桨叶片短、宽、不对称的形状结构可以保持在水中滑移较少, 减少功的损失, 将更多的力传递到手臂和胸壁肌肉, 提高划桨效率。但过多的力和较重的桨负荷容易导致运动员运动疲劳表现, 为了缓解疲劳和匹配划桨效率, 运动员往往通过加大前锯肌做功和肩胛骨屈/伸范围以提供额外手柄力量和上半身肌肉力量来支撑和平衡腿部驱动力不足, 从而导致胸肌等长收缩和胸腔压缩力矩增加, 产生肋骨损伤风险(Wilson et al., 2014)。

此外, 训练方式及设备的选择对于运动员骨损伤风险管理至关重要。既往研究发现, 陆地测力计和水上训练的划船力学模式具有一定的相似性, 但与水上训练相比, 赛艇运动员在测力计训练时的脊柱负荷度更高, 表现

出更多的腰椎、肘关节屈曲角度和更大的脚踏板反作用力(Millar et al., 2020)。同时, 不同赛艇测力计类型(主要分为固定测力计和动态测力计)也可能导致运动员生物力学负荷差异。一项对固定测力计和动态测力计在手柄处产生的力/功率的比较研究发现, 在相同运动强度(2 000 m 比赛配速的 70%~100%)的赛艇训练中, 固定测力计在手柄处产生的峰值力/功率不断增加, 对运动员划桨施加的负荷和作用在肋骨上的力更多, 导致 RSI 风险增大(Vinther et al., 2013)。

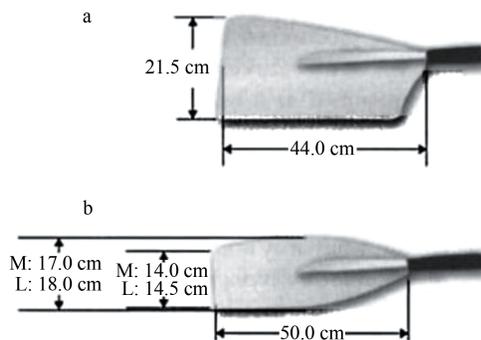


图 2 不同桨叶片的形状(Thornton et al., 2018)

Figure 2. The Shape of Different Propeller Blades (Thornton et al., 2018)

注: a. 短柄斧桨叶形状; b. 梅肯桨叶形状。L. 大号; M. 中号。

2.3 其他可能性成因

除了上述主要风险因素外, 赛艇运动员心理问题也可能对 RSI 的发生造成潜在影响。一项系统综述发现, 部分轻量级赛艇运动员采取的极端致病性体重控制行为(如节食、呕吐和服用减肥药等)导致出现焦虑、情绪低落、社交互动减少、注意力低下和负面形象感知等心理障碍(Gillbanks et al., 2022; Werner et al., 2013), 尤其在女性赛艇运动员中更为常见。精神焦虑会激活下丘脑-垂体-肾上腺(hypothalamic-pituitary-adrenal, HPA)系统, 抑制促性腺激素释放激素(gonadotropin-releasing hormone, GnRH)的分泌, 从而抑制排卵和雌激素缺乏, 引发 RED-S 风险(Miyamoto et al., 2021; Schliep et al., 2015)。

3 赛艇运动员 RSI 的防治措施

RSI 是与赛艇相关的特定性损伤, 也是运动员训练和比赛时间损失较长的原因(Harris et al., 2020)。多项队列研究发现, 运动员肋骨应力反应(骨水肿和炎症)的最快恢复训练时间约为 24 d, 肋骨应力性骨折则在 51~60 d 后才能够恢复全面训练(Evans et al., 2016; Harris et al., 2020)。因此, 有效干预或管理 RSI 风险因素、诊断和检查运动员 RSI 状况及严重程度、及时治疗和积极恢复等对于避免损伤发生或最大限度减少训练损失、帮助运动员恢复竞技水平具有积极作用。

3.1 RSI的风险预防及伤害管理

1) 积极营养恢复和充足能量支持,保持骨骼健康状态。需考虑到能量摄入不足、营养缺乏对LBMD和肋骨损伤的关联影响。Mountjoy等(2018)研究发现,通过周期性营养支持可以有效预防运动员的能量缺乏和RED-S症状。研究发现,从事备战或竞赛的赛艇运动员能量摄入应达到无脂肪物质 $45 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,在长时间划船训练期间摄入碳水化合物,并在每天2次划船期间进行系统补充以恢复机体糖原储存至关重要(Cornford et al., 2019; Winkert et al., 2022)。

此外,Lundy等(2023)研究发现,在运动前重复摄入富含钙的膳食对运动期间血液 Ca^{2+} 的稳定性具有累积和持续(长期)的影响。而维生素D的生物活性形式1,25-二羟基维生素D $[1,25(\text{OH})_2\text{D}]$ 具有增加膳食钙的吸收和调节血液中的 Ca^{2+} 水平功能,在骨骼对机械应力的反应和适应中发挥着积极作用(Hamilton et al., 2010)。研究发现,当运动员每天补充800 IU 25(OH)D和2 000 mg钙时,肋骨应力性骨折的发生率由7.51%显著降低至1.65% ($P=0.009$)(Williams et al., 2020),因此建议运动员口服维生素D补充剂,每日25(OH)D摄入量达到2 000 IU,以保持适当的25(OH)D水平和骨骼健康状态,降低肋骨受伤风险(Knechtle et al., 2021)。

2) 使用RED-S评估工具等监测和提示早期风险。由于轻量级赛艇运动员的心理健康问题和女性赛艇运动员的闭经风险多与低能量可用性、饮食障碍等RED-S病症有关,有研究提出,通过教练员、医生和营养师的合作,采用RED-S筛查工具、女性低能量可用性问卷(low energy availability of female questionnaire, LEAF-Q)和三联症累积风险评估(cumulative risk assessment, CRA)等工具,评估和监测低身体质量指数(body mass index, BMI)、热量摄入量、LBMD和闭经指标,关注心理健康,提示和管理损伤风险(Gillbanks, 2020; Melin et al., 2014)。

3) 精准把控训练负荷,制定个性化训练方案。Seiler等(2006, 2009)基于训练负荷量和强度两个维度归纳出了更适于赛艇项目的“两极化”训练模式,即80%的时间进行低于乳酸阈值强度的运动训练(如更长时间的水上划船等),帮助运动员逐渐适应机体最佳负荷效应,减轻运动压力;20%的时间进行高强度间歇训练,改善和优化运动员的划桨运动表现。

另外,依据男、女运动员损伤率差异和不同的生理结构特征,针对女性在体型、力量耐力和肌肉骨骼方面的特征,制定个性化、适宜的训练方案,可以优化运动表现,降低受伤风险。有研究发现,8周一般准备(专注高负荷阻力训练)和16周竞争准备(同时耐力和阻力训练)的特定训练方案可以诱导精英女性赛艇运动员股外侧肌的高度适应性,但训练诱导的肌肉适应具有较大个体差异。因此,应密切监测运动员个人(肌肉)适应情况,评估训练计划的有效性(van der Zwaard et al., 2021)。Thiele等(2020)提出,相较于力量耐力训练(strength endurance training, SET),重阻力力量训练(heavy resistance strength training, HRST)在改善和提高女性精英赛艇运动员最大力量、肌肉力量、厌氧耐力等方面的运动表现可能更有效。

4) 改善划桨技术和优化运动模式。部分学者基于肋骨损伤病因机制提出了改善划桨技术的策略和方法。Karlson(2000)研究认为,针对前锯肌的特定伸展和斜方肌强化练习可以中和肋骨的肌肉支撑,平衡反向牵引肌肉力量,减少肩关节牵开器疲劳的可能性,避免肋骨应力性骨折。Warden等(2003)提出了划水过程开始时,减少伸展运动幅度和划水结束时及时随访(跟进)的技术策略,以减少前锯肌负荷对肋骨造成的压力(图3)。Hosea等(2012)研究发现,使用较低的划桨用力和较高的划桨速率可以减少肌肉施加在肋骨处的剪切力,锻炼肌群作用在肋骨上的适应力,降低RSI风险。

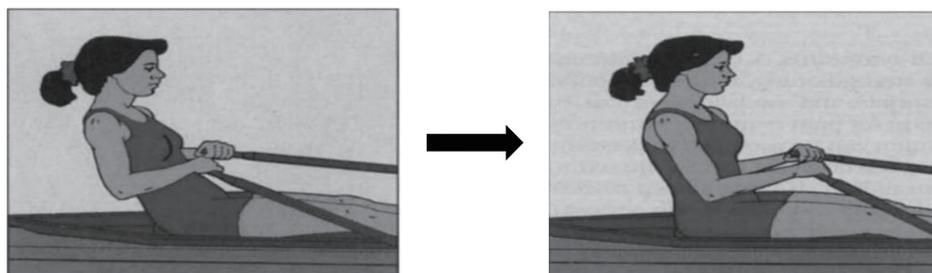


图3 划桨完成阶段的姿势变化(Warden et al., 2003)

Figure 3. Posture Changes during the Rowing Completion Phase (Warden et al., 2003)

注:划桨完成阶段的姿势变化表现为躯干向后伸展运动幅度的减少。

此外,在划桨周期中,受水中流体力学作用影响,赛艇运动员的良好运动表现依赖于“人-桨-艇”运动系统的高度拟合。正确有效的划桨技术有助于运动员划桨序列

的有效力量转移。已有研究表明,采用下肢和躯干同时用力(腿和躯干同步运动)策略,可以防止驱动阶段的滑座-手柄速度比过大的负荷风险,以确保赛艇运动员有足

够的腿部伸展力量和腰-骨盆协调性,能够将腿部和躯干产生的力量传输到桨柄上,减少上半身的压力,避免早期疲劳和损害肋骨健康(Arumugam et al., 2020)。

5)采用动态测力计设备进行辅助模拟训练。目前,测力计已经成为赛艇运动员重要的辅助训练设备,以克服水上训练的限制,如天气变化等,已被广泛应用于运动员身体评估和室内训练等。Mäestu 等(2005)提出,水上训练与陆地测力计间可能存在生物力学特性差异。Šarabon 等(2019)研究认为,教练员和运动员需要通过测试和比较不同规格的测力计与水上训练在划桨技术、生物力学和性能方面的数据,考虑陆地训练与水上比赛的适应性。研究发现,在相似功率输出下,与固定测力计相比,动态测力计可移动滑座机制缓解了抓水、驱动阶段的用力疲劳和时间,划桨速率更高(29.3 桨/min vs 34.8 桨/min, $P=0.018$, $d=1.213$)(de Campos Mello et al., 2014; Trease et al., 2020),且较高划桨速率下,动态测力计表现出理想的躯干、肢体关节角度和活动范围,可以有效减少运动疲劳和肋骨负荷风险。同时,动态测力计具有重心位移小、无手柄复位张力的特点,能够更精确地模拟和预测运动员在水中的生物力学性能和反应,更适合应用于赛艇训练(Lu et al., 2023)。

3.2 RSI 循证诊断和影像学检查

对已有的 RSI 症状进行精确诊断(排除恶性骨肿瘤、其他类似胸腔疼痛等)和严重程度评估是后期制定最佳治疗康复方案的关键(Beck et al., 2021)。

Evans 等(2016)研究认为,RSI 起初多表现为模糊、隐匿性的胸壁疼痛(胸壁肋间肌肉的张力),通常出现在肩胛骨脊柱边缘的脊柱后部,放射至受累肋骨的肋间神经分布区。损伤区域主要为胸壁前外侧(26%)、腋窝中部(31%)和后外侧(26%)(Harris et al., 2020)。随着时间推移,疼痛感可能在深呼吸、咳嗽、体位改变、胸腔正侧受压和继续运动时加剧,并逐渐聚焦在一根肋骨上(多发生在第 4~8 根肋骨)。临床症状表现为点压痛、肿胀、躯干屈曲/伸展抑制、骨头上的局部触痛或可触及的胼胝等(Marcussen et al., 2020)。对上述疑似症状进行临床检查,以诊断成像需要。如出现适当休息后仍未好转或诊断结果不明确(疑似发展为肋骨应力性骨折)时,则鼓励进一步影像学检查(Harris et al., 2020)。

目前,相关研究对采用何种诊断成像方法未达成共识,主要遵循多种成像、分层检查的方法,并将锎-99 骨扫描显像和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)作为核心检查方法,以确定和分级 RSI 的严重程度。其中,锎-99 骨扫描对于检测早期骨应力损伤非常敏感(灵敏度为 100%),是诊断骨应力损伤的首选成像方式,但具有缺乏特异性、假阳性和辐射暴露风险等缺点(Floyd et al., 1987)。现有研究更多采用 MRI 作为最佳诊断方

法。MRI 是评估骨应力损伤最敏感(灵敏度为 100%)和特异性强(特异度 > 85%)的成像方式,可以检测没有皮质骨折的骨水肿和低级损伤,提示早期应力损伤的肋骨骨膜或邻近软组织水肿和带状骨髓水肿具有扫描时间短、无电离辐射、空间分辨率特异性高等优点(Foley et al., 2019)。研究发现,T2 加权核磁共振成像或放射性同位素摄取增加时(闪烁扫描)成像无骨皮质破损,但显示骨水肿,即为肋骨应力反应;显示骨皮质破损,且穿过 1 个或 2 个皮质骨折线时,即为肋骨应力性骨折(Harris et al., 2020; Schowalter et al., 2022)。

3.3 RSI 的治疗手段与康复措施

根据损伤严重程度分级,当出现骨折延迟愈合或扩大骨折线、疼痛持续超过预期恢复时间等较高风险时,需要及时外科手术治疗(Miller et al., 2013)。而对于低风险 RSI 症状,主要通过疼痛干预和辅助恢复训练 2 个阶段进行保守治疗与康复(Schowalter et al., 2022)。

第一阶段主要采用休息、负荷调整、运动限制和物理局部治疗等手段进行疼痛干预。当运动员出现肋骨损伤症状后,首先要进行 1~2 周的完全休息,若无继续疼痛,则逐渐恢复运动,并注意负荷调整,避免增加肋骨负荷风险的运动;若疼痛继续且症状加重,则可以通过物理局部疗法,如镇痛、低脉冲超声波电疗、冰敷、胸椎松动术和 8 字形支架、绑带、软组织疗法等,有效限制和减少疼痛、加速骨痂愈合(Evans et al., 2016; Santana-Rodríguez et al., 2019)。在此过程中,需要注意适当使用镇痛剂和固醇类药物,避免长期使用非甾体抗炎药对骨愈合产生负面影响(Wheatley et al., 2019)。

第二阶段侧重于分阶段损伤恢复和重新恢复运动,即无症状后缓慢、逐渐恢复运动(约 3~8 周)。1)恢复前期,继续使用镇痛方式和加强肋骨支撑结构,避免任何侧向弯曲或旋转的强化练习,先进行 1~2 周的低冲击强度有氧训练,如固定自行车、爬楼梯和慢跑等保持心血管耐力(May et al., 2021)。2)恢复中后期(触诊胸壁无疼痛或在旋转动作中无疼痛),允许将前锯肌强化训练、卧位拉和卧推伸展练习等特定运动重新纳入训练计划(Evans et al., 2016; Miller et al., 2018),并依据负荷大小进行水上划船训练-动态测力计顺序训练-固定测力计训练。强调适宜练习方式和负荷,循序渐进地谨慎增加训练量和训练强度,让专项技术影响肌群得到训练,同时避免过度用力拉伸造成二次损伤。3)通常在第 8~10 周运动员可以恢复全面训练或比赛(Carr II et al., 2017)。

4 结论

赛艇运动员因训练或比赛过程中肋骨对较大载荷和反复应力的不适应导致肋骨骨骼修复-重塑比例失衡,出现肋骨应力反应或应力性骨折损伤。已有研究通过对运

运动员划桨过程中肋骨关联肌群的生物力学进行探究,提出了肌肉收缩反复应力的胸腔压缩及运动疲劳导致肋骨负荷压迫的可能损伤机制。研究发现,RSI病因机制存在LBMD、性别、训练负荷及运动水平、划桨技术、设备类型等风险因素。为有效管理上述风险因素,预防损伤发生和发展,提出RSI防治措施的建议:充足能量和营养保持骨骼健康;使用RED-S评估工具等提示早期损伤和心理风险;依据性别不同生理结构特征实施个性化训练计划,采用“两极化”训练模式优化运动表现;纠正和改善躯干运动幅度较大的不良划桨技术,进行前锯肌特定伸展和斜方肌强化练习,缓解肋骨负荷压迫;采用躯干和腿部同步用力策略优化“人-桨-艇”协调运动模式;选择动态测力计训练精确模拟和加强水上比赛适应性等,以保证和支持运动员良好赛场表现。同时,针对已有的RSI症状及时诊断成像,并依据症状严重程度分级选择手术或疼痛干预和辅助恢复训练等适宜治疗手段和康复措施,加快运动员重返赛场。

参考文献:

陈小平, 资薇, 2011. 中国赛艇训练关键问题研究[J]. 体育科学, 31(1):56-62.

高炳宏, 孟志军, 王玉新, 等, 2019. 2组优秀赛艇运动员8周高原训练不同负荷结构对训练效果的影响[J]. 北京体育大学学报, 42(11):107-116.

黎涌明, 李博, 王欣欣, 2018. 男子赛艇240次卧拉练习的能量代谢特征[J]. 上海体育学院学报, 42(6):104-108.

马涛, 高炳宏, 李涛, 2019. 8周有氧水上划艇训练对赛艇运动员某些血液生化指标的影响[J]. 中国应用生理学杂志, 35(1):38-41.

任素春, 任玉衡, 史和福, 等, 1998. 赛艇运动员的创伤流行病学研究[J]. 中国体育科技, 34(9):48-50.

闫家祥, 梁志强, 但林飞, 等, 2023. 我国男子赛艇双人双桨奥运会奖牌获得者拉桨动作的生物力学分析[J]. 中国体育科技, 59(4):11-18.

张鑫, 宁方堂, 李强, 等, 2012. 备战2012年伦敦奥运会赛艇运动员运动创伤调查分析[J]. 中国运动医学杂志, 31(12):1107-1108.

张英平, 郑晓鸿, 毕学翠, 等, 2021. 不同水平赛艇运动员男子单人艇关键技术指标比较及其优化研究[J]. 体育科学, 41(9):46-56.

ACKERMAN E K, HOLTZMAN B, COOPER K M, et al., 2019. Low energy availability surrogates correlate with health and performance consequences of relative energy deficiency insport[J]. Br J Sports Med, 53(10):628-633.

ARUMUGAM S, AYYADURAI P, PERUMAL S, et al., 2020. Rowing injuries in elite athletes: A review of incidence with risk factors and the role of biomechanics in its management[J]. Indian J Orthop, 54(3):246-255.

BAKER B S, BUCHANAN S R, BEMBEN D A, 2022. Skeletal health and associated injury risk in collegiate female rowers[J]. J Strength Cond Res, 36(4):1125-1133.

BECK B, DRYSDALE L, 2021. Risk factors, diagnosis and management of bone stress injuries in adolescent athletes: A narrative review[J/OL]. Sports, 9(4):52[2023-12-03]. <https://doi.org/10.3390/sports9040052>.

BISHOP M E, AHLMEN A, ROSENDORF J, et al., 2021. Bone stress injuries in female athletes[J]. Ann Joint, 6(3):349-353.

BOUFFARD J, YANG C, BEGON M, et al., 2018. Sex differences in kinematic adaptations to muscle fatigue induced by repetitive upper limb movements[J/OL]. Biol Sex Differ, 9(1):17[2023-12-03]. <https://doi.org/10.1186/s13293-018-0175-9>.

BROOK E M, TENFORDE A S, BROAD E M, et al., 2019. Low energy availability, menstrual dysfunction, and impaired bone health: A survey of elite para athletes[J]. Scand J Med Sci Sports, 29(5):678-685.

CARR II J B, JOHN Q E, RAJADHYAKSHA E, et al., 2017. Traumatic avulsion of the serratus anterior muscle in a collegiate rower: A case report[J]. Sports Health, 9(1):80-83.

CORNFORD E, METCALFE R, 2019. Omission of carbohydrate-rich breakfast impairs evening 2 000 m rowing time trial performance[J]. Eur J Sport Sci, 19(1):133-140.

D'AILLY P N, SLUITER J K, KUIJER P P, 2016. Rib stress fractures among rowers: A systematic review on return to sports, risk factors and prevention[J]. J Sports Med Phys Fitness, 56(6):744-753.

DE CAMPOS MELLO F, DE MORAES BERTUZZI R C, GRANGEIRO P M, et al., 2009. Energy systems contributions in 2 000 m race simulation: A comparison among rowing ergometers and water[J]. Eur J Appl Physiol, 107(5):615-619.

DE CAMPOS MELLO F, BERTUZZI R, FRANCHINI E, et al., 2014. Rowing ergometer with the slide is more specific to rowers' physiological evaluation[J]. Res Sports Med, 22(2):136-146.

DE SOUZA M J, KOLTUN K J, WILLIAMS N I, 2019. The role of energy availability in reproductive function in the female athlete triad and extension of its effects to men: An initial working model of a similar syndrome in male athletes[J]. Sports Med, 49(2):125-137.

DIMITRIOU L, WEILER R, LLOYD-SMITH R, et al., 2014. Bone mineral density, rib pain and other features of the female athlete triad in elite lightweight rowers[J/OL]. BMJ Open, 4(2):e004369[2023-12-03]. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2013-004369>.

EVANS G, REDGRAVE A, 2016. Great Britain Rowing Team Guideline for diagnosis and management of rib stress injury: Part 1[J]. Br J Sports Med, 50(5):266-269.

FLOYD JR W N, BUTLER J E, CLANTON T, et al., 1987. Roentgenologic diagnosis of stress fractures and stress reactions[J]. South Med J, 80(4):433-439.

FOLEY C M, SUGIMOTO D, MOONEY D P, et al., 2019. Diagnosis and treatment of slipping rib syndrome[J]. Clin J Sport Med, 29(1):18-23.

GILLBANKS L J, 2020. Relative Energy Deficiency in sport (RED-S) in lightweight rowing: Investigating athlete and physiotherapists' perspectives[D]. Oxford, UK: University of Oxford.

GILLBANKS L, MOUNTJOY M, FILBAY S R, 2022. Lightweight rowers' perspectives of living with Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S)[J/OL]. PLoS One, 17(3):e0265268[2023-12-08]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265268>.

GOMEZ A T, RAO A L, 2020. Rowing[M]//KHODAEI M, WATERBROOK A L, GAMMONS M. Sports-related fractures, dislocations and trauma. Cham, Switzerland: Springer: 921-928.

GRIMA J N, AGIUS T P, CAMILLERI K, et al., 2023. Musculoskeletal injuries in fixed-seat rowing[J]. Sci Sports, 38(1):89-95.

- HAMILTON B, GRANTHAM J, RACINAIS S, et al., 2010. Vitamin D deficiency is endemic in Middle Eastern sportsman [J]. *Public Health Nutr*, 13(10):1528-1534.
- HARRIS R, TREASE L, WILKIE K, et al., 2020. Rib stress injuries in the 2012-2016 (Rio)Olympiad: A cohort study of 151 Australian rowing team athletes for 88 773 athlete days[J]. *Br J Sports Med*, 54(16):991-996.
- HOLT P J E, BULL A M J, CASHMAN P M M, et al., 2003. Kinematics of spinal motion during prolonged rowing [J]. *Int J Sports Med*, 24(8):597-602.
- HOSEA T M, HANNAFIN J A, 2012. Rowing injuries [J]. *Sports Health*, 4(3):236-245.
- HUHMANN K, 2020. Menses requires energy: A review of how disordered eating, excessive exercise, and high stress lead to menstrual irregularities[J]. *Clin Ther*, 42(3):401-407.
- KARLSON K A, 1998. Rib stress fractures in elite rowers: A case series and proposed mechanism[J]. *Am J Sports Med*, 26(4):516-519.
- KARLSON K A, 2000. Rowing injuries: Identifying and treating musculoskeletal and nonmusculoskeletal conditions[J]. *Phys Sportsmed*, 28(4):40-50.
- KEAY N, FRANCIS G, ENTWISTLE I, et al., 2019. Clinical evaluation of education relating to nutrition and skeletal loading in competitive male road cyclists at risk of relative energy deficiency in sports (RED-S): 6-month randomised controlled trial[J/OL]. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 5(1):e000523[2023-12-08]. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2019-000523>.
- KEENAN K G, SENEFFELD J W, HUNTER S K, 2018. Girls in the boat: Sex differences in rowing performance and participation[J/OL]. *PLoS One*, 13(1):e0191504[2023-12-08]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191504>.
- KIM T J, LEE K H, CHO E Y H, et al., 2021. *Emergency Chest Radiology*[M]. Singapore: Springer:35-47.
- KIMPARA H, IWAMOTO M, MIKI K, et al., 2003. Biomechanical properties of the male and female chest subjected to frontal and lateral impacts [C]//Proceeding of the International IRCOBI Conference: 235-247.
- KLESHNEV V, 2002. Segments contribution to the stroke length and rower power[J]. *Row Biomech Newslett*, 2(2):13.
- KLESHNEV V, KLESHNEV I, 1998. Dependence of rowing performance and efficiency on motor coordination of the main body segments[J]. *J Sports Sci*, 16(5):418-419.
- KNECHTLE B, JASTRZEBSKI Z, HILL L, et al., 2021. Vitamin D and stress fractures in sport: Preventive and therapeutic measures: A narrative review[J/OL]. *Medicina*, 57(3):223[2023-12-08]. <https://doi.org/10.3390/medicina57030223>.
- KRAUS E, TENFORDE A S, NATTIV A, et al., 2019. Bone stress injuries in male distance runners: Higher modified Female Athlete Triad Cumulative Risk Assessment scores predict increased rates of injury[J]. *Br J Sports Med*, 53(4):237-242.
- LI Y, KOLDENHOVEN R M, JIWAN N C, et al., 2023. Trunk and shoulder kinematics of rowing displayed by Olympic athletes [J]. *Sports Biomech*, 22(9):1095-1107.
- LOGUE D M, MADIGAN S M, MELIN A, et al., 2020. Low energy availability in athletes 2020: An updated narrative review of prevalence, risk, within-day energy balance, knowledge, and impact on sports performance [J/OL]. *Nutrients*, 12(3):835[2023-12-08]. <https://doi.org/10.3390/nu12030835>.
- LU T, JONESM T, YOM J, et al., 2023. Physiological and biomechanical responses to exercise on two different types of rowing ergometers in NCAA Division I oarswomen[J]. *Eur J Appl Physiol*, 123(7):1529-1541.
- LUNDY B, MCKAY A K A, FENSHAM N C, et al., 2023. The impact of acute calcium intake on bone turnover markers during a training day in elite male rowers[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 55(1):55-65.
- MADISON C A, HARTE R A, PICKERILL M L, et al., 2021. Rib stress injuries among female National Collegiate Athletic Association rowers: A prospective epidemiological study [J]. *Int J Athl Ther Train*, 27(2):78-84.
- MÄESTU J, JÜRIMÄE J, JÜRIMÄE T, 2005. Monitoring of performance and training in rowing[J]. *Sports Med*, 35(7):597-617.
- MARCUSSEN B, NEGAARD M, HOSEY R G, et al., 2020. A case series and literature review: Isolated traumatic first rib fracture in athletes[J]. *Clin J Sport Med*, 30(3):257-266.
- MAY T, MARAPPA-GANESHAN R, 2021. *Stress Fractures* [M]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing [2024-06-03]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554538/>.
- MCDONNELL L K, HUME P A, NOLTE V, 2011. Rib stress fractures among rowers: Definition, epidemiology, mechanisms, risk factors and effectiveness of injury prevention strategies [J]. *Sports Med*, 41(11):853-901.
- MCGUIRE F P, VU L, HODGIN C M, et al., 2020. Lumbar transverse process stress fracture in an elite rower: A case report[J/OL]. *Orthop J Sports Med*, 8(3):2325967120910146[2023-12-08]. <https://doi.org/10.1177/2325967120910146>.
- MELIN A, TORNERBERG A B, SKOUBY S, et al., 2014. The LEAF questionnaire: A screening tool for the identification of female athletes at risk for the female athlete triad[J]. *Br J Sports Med*, 48(2):540-545.
- MILLAR S K, REID D, KEELEY L, 2020. A comparison between foot, handle forces and lower back positions between ergometers and on-water rowing with high performance rowers [J]. *N Z J Sports Med*, 47(1):33-38.
- MILLER T L, HARRIS J D, KAEDING C C, 2013. Stress fractures of the ribs and upper extremities: Causation, evaluation, and management[J]. *Sports Med*, 43(8):665-674.
- MILLER T L, JAMIESON M, EVERSON S, et al., 2018. Expected time to return to athletic participation after stress fracture in Division I Collegiate Athletes[J]. *Sports Health*, 10(4):340-344.
- MIYAMOTO M, HANATANI Y, SHIBUYA K, 2021. Relationship among nutritional intake, anxiety, and menstrual irregularity in elite rowers[J/OL]. *Nutrients*, 13(10):3436[2023-12-08]. <https://doi.org/10.3390/nu13103436>.
- MOREIRA C A, BILEZIKIAN J P, 2017. Stress fractures: Concepts and therapeutics[J]. *J Clin Endocrinol Metab*, 102(2):525-534.
- MOUNTJOY M, SUNDGOT-BORGEN J, BURKE L, et al., 2018. International Olympic Committee (IOC) consensus statement on relative energy deficiency in sport (RED-S): 2018 update[J]. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 28(4):316-331.

- NG L, CAMPBELL A, BURNETT A, et al., 2013. Gender difference-
sin trunk and pelvic kinematics during prolonged ergometer rowing
in adolescents[J]. *J Appl Biomech*, 29(2):180-187.
- RICHARDS T, WRIGHT C, 2020. British Army recruits with low se-
rum vitamin D take longer to recover from stress fractures[J]. *BMJ
Mil Health*, 166(4):240-242.
- RICHTER C, HAMILTON S, ROEMER K, 2010. Influence of body
mass index on rowing kinematics[C]//Marquette, Michigan, USA:
ISBS-Conference Proceedings Archive:231.
- SANDBAKK Ø, SOLLI G S, HOLMBERG H C, 2018. Sex differences
in world-record performance: The influence of sport discipline and
competition duration[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(1):2-8.
- SANTANA-RODRÍGUEZ N, CLAVO B, LLONTOP P, et al., 2019.
Pulsed ultrasounds reduce pain and disability, increasing rib fracture
healing, in a randomized controlled trial[J]. *Pain Med*, 20(10):
1980-1988.
- ŠARABON N, KOZINC Ž, BABIČ J, et al., 2019. Effect of rowing
ergometer compliance on biomechanical and physiological indicators
during simulated 2 000 m race[J]. *J Sports Sci Med*, 18(2):264-270.
- SCHEFFER J H, DUNSHEA-MOOIJ C A E, ARMSTRONG S,
et al., 2023. Prevalence of low energy availability in 25 New Zealand
elite female rowers: A crosssectional study[J]. *J Sci Med Sport*,
26(12):640-645.
- SCHLIEP K C, MUMFORD S L, VLADUTIU C J, et al., 2015. Per-
ceived stress, reproductive hormones, and ovulatory function: A
prospective cohort study[J]. *Epidemiology*, 26(2):177-184.
- SCHOWALTER S, LE B, CREPS J, et al., 2022. Rib fractures inpro-
fessional baseball pitchers: Mechanics, epidemiology, and manage-
ment[J]. *Open Access J Sports Med*, 13(10):89-105.
- SEBASTIA-AMAT S, PENICHER-TOMAS A, JIMENEZ-OLMEDO
J M, et al., 2020. Contributions of anthropometric and strength deter-
minants to estimate 2 000 m ergometer performance in traditional
rowing[J/OL]. *Appl Sci*, 10(18):6562[2023-01-03]. [https://doi.
org/10.3390/app10186562](https://doi.org/10.3390/app10186562).
- SEILER K, KJERLAND G, 2006. Quantifying training intensity
distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an
“optimal” distribution?[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 16(1):49-56.
- SEILER S, TØNNESSEN E, 2009. Intervals, thresholds, and long
slow distance: The role of intensity and duration in endurance train-
ing[J]. *Sportscience*, 13(3):32-53.
- SMOLJANOVIC T, BOJANIC I, 2007. Ewing sarcoma of the rib in a
rower: A case report[J]. *Clin J Sport Med*, 17(6):510-512.
- SMOLJANOVIC T, BOJANIC I, HANNAFIFIN J, et al., 2009.
Traumatic and overuse injuries among international elite junior row-
ers[J]. *Am J Sports Med*, 37(6):1193-1199.
- TACHIBANA K, YASHIRO K, MIYAZAKI J, et al., 2007. Muscle
cross-sectional areas and performance power of limbs and trunk in
the rowing motion[J]. *Sports Biomech*, 6(1):44-58.
- THIELE D, PRIESKE O, LESINSKI M, et al., 2020. Effects of
equal volume heavy-resistance strength training versus strength en-
durance training on physical fitness and sport-specific performance
in young elite female rowers[J]. *Front Physiol*, 21(11):888.
- THORNTON J S, VINTHER A, 2018. Prevention of rib stress injury
in rowers: What dowe know and where do we need to go? [J].
Sports Orthop Traumatol, 34(3):278-286.
- TREASE L, WILKIE K, LOVELL G, et al., 2020. Epidemiology of
injury and illness in 153 Australian international-level rowers over
eight international seasons[J]. *Br J Sports Med*, 54(21):1288-1293.
- VAN DER ZWAARD S, KOPPENS T F P, WEIDE G, et al., 2021.
Training-Induced muscle adaptations during competitive preparation
in elite female rowers[J/OL]. *Front Sports Act Living*, 8(3):781942
[2024-03-08]. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.781942>.
- VERRALL G, DARCEY A, 2014. Lower back injuries in rowing na-
tional level compared to international level rowers[J/OL]. *Asian J
Sports Med*, 5(4):e24293[2024-03-08]. [https://doi.org/10.5812/as-
jsm.24293](https://doi.org/10.5812/as-
jsm.24293).
- VINTHER A, KANSTRUP I L, CHRISTIANSEN E, et al., 2006. Ex-
ercise-induced rib stress fractures: Potential risk factors related to
thoracic muscle co-contractionand movement pattern [J]. *Scand J
Med Sci Sports*, 16(3):188-196.
- VINTHER A, THORNTON J S, 2016. Management of rib pain in
rowers: Emerging issues[J]. *Br J Sports Med*, 50(3):141-142.
- VINTHER A, TMALKJÆR I L, KANSTRUP B, et al., 2013. Aagaard,
slidebased ergometer rowing: Effects on force production and neu-
romuscular activity[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 23(5):635-644.
- WAJSWELNER H, BENNELL K, STORY I, et al., 2000. Muscle ac-
tion and stress forces on the ribs in rowing [J]. *Phys Ther Sport*,
1(3):75-84.
- WARDEN S J, GUTSCHLAG F R, WAJSWELNER H, et al., 2002.
Aetiology of rib stress fractures in rowers[J]. *Sports Med*, 32(13):
819-836.
- WARDEN S J, RATH D A, MORRIS H G, et al., 2003. Rib bone
strain and muscle activity in the etiology of rib stress fractures in
rowers[J/OL]. *Med Sci Sports Exerc*, 35(15):S61 [2024-03-09].
[https://journals.lww.com/acsm-mse/fulltext/2003/05001/rib_bone_
strain_and_muscle_activity_in_the.323.aspx](https://journals.lww.com/acsm-mse/fulltext/2003/05001/rib_bone_
strain_and_muscle_activity_in_the.323.aspx).
- WERNER A, THIEL A, SCHNEIDER S, et al., 2013. Weight-control
behaviour and weight-concerns in young elite athletes: A systematic
review[J/OL]. *J Eat Disord*, [2023-03-08]. [https://doi.org/10.1186/
2050-2974-1-18](https://doi.org/10.1186/
2050-2974-1-18).
- WHEATLEY B M, NAPPO K E, CHRISTENSEN D L, et al., 2019.
Effect of NSAIDs on bone healing rates: A Meta-analysis[J]. *J Am
Acad Orthop Surg*, 27(7):e330-e336.
- WICIŃSKI M, ADAMKIEWICZ D, ADAMKIEWICZ M, et al.,
2019. Impact of vitamin D on physical efficiency and exercise per-
formance: A review[J/OL]. *Nutrients*, 11(11):2826[2023-03-08].
<https://doi.org/10.3390/nu11112826>.
- WILLIAMS K, ASKEW C, MAZOUÉ C, et al., 2020. Vitamin D3
supplementation and stress fractures in high-risk collegiate athletes:
A pilot study[J]. *Orthop Res Rev*, 12:9-17.
- WILSON F, MCGREGOR A, 2014. Mythbusters in rowing medicine
and physiotherapy: Nine experts tackle five clinical conundrums[J].
Br J Sports Med, 48(21):1525-1528.
- WINKERT K, STEINACKER J M, KOEHLER K, et al., 2022. High
energetic demand of elite rowing: Implications for training and
nutrition [J/OL]. *Front Physiol*, 13(2):829757 [2023-03-08].
<https://doi.org/10.3389/fphys.2022.829757>.

(收稿日期:2024-02-06; 修订日期:2024-05-01; 编辑:尹航)