



腰伸肌疲劳对人体运动的影响及生理机制分析

Effects of Lumbar Extensor Fatigue on Human Body Movements and Physiological Mechanism Analysis

邢 聪^{1,2}, 吴 瑛^{1,2}, 项贤林^{1,2}, 耿家先^{1,2}, 赵小瑜^{1,2}

XING Cong^{1,2}, WU Ying^{1,2}, XIANG Xian-lin^{1,2}, GENG Jia-xian^{1,2}, ZHAO Xiao-yu^{1,2}

摘要:腰伸肌疲劳是影响人体运动的重要因素,以“Lumbar Extensor Fatigue/Lumbar Muscles Fatigue(腰伸肌疲劳/腰部肌肉疲劳)”为主题词在PubMed及Web of Science数据库中进行文献检索并对文献进行筛选。目的是分析腰伸肌疲劳后人体运动动作产生的生物力学特征变化及生理学原因。结果:腰伸肌疲劳对人体运动有4个方面的影响,降低腰椎关节的本体感觉能力,影响人体运动中脊柱的动态稳定性,改变腰椎-骨盆运动节律,使人体平衡策略发生改变;造成人体动作结构改变的生理原因是腰伸肌疲劳引起了神经调节过程的改变,导致多个关节本体感觉能力下降以及关节周围肌肉募集策略改变;这些机能及结构改变使人体完成指定动作的效率下降并使运动损伤的风险提高;目前对抗腰伸肌疲劳手段的研究较为薄弱,难以系统地预防和缓解腰伸肌疲劳的训练提供理论支持。

关键词:腰伸肌疲劳;腰椎关节本体感觉;脊柱稳定性;腰椎-骨盆运动节律

Abstract :Lumbar extensor fatigue is one of the important factor affecting human movement. In this paper, we use the words “Lumbar Extensor Fatigue/Lumbar Muscles Fatigue” as topic retrieve literatures in the PubMed and Web of Science database. The purpose is to analyze what kind of changes would occur about human movement biomechanical characteristics, and the physiological causes after lumbar extensor muscle fatigue. Result: Lumbar extensor fatigue have four aspects of influence on the human body movement, decline proprioception ability of the lumbar spine joints, influence the dynamic stability of the spine in human movement, change the lumbar—pelvis motion rhythm, and change the body strategy of keep human balance; Lumbar extensor fatigue caused the motor nerve function adjustment, led to multiple joints proprioception decrease and the muscles around these joints recruitment strategy was changed; These functions and structures change decline the efficiency of human body complete the target movement and rise the risk of sports injury. Current prevent lumbar extensor fatigue researches are so less that hard to provide beneficial theoretical support to prevent or alleviate lumbar extensor fatigue.

Key words lumbar extensor fatigue; lumbar proprioception; spinal instability; lumbar-pelvis motion rhythm

中图分类号:G804.2 文献标识码:A

神经-肌肉疲劳是影响人体持续运动能力的重要因素,可能造成人体各环节在运动中产生一定程度的功能障碍^[1]。在运动中,人体常出现全身性或局部性的肌肉疲劳,两种肌肉疲劳类型都会损害人体的姿势控制。有研究测量了踝、膝、腰椎、肩带4个关节周围肌肉疲劳对人体姿势控制的急性影响,发现以上4个关节周围肌肉疲劳对人体运动产生影响的程度各不同,而下腰部肌肉(Low Back Muscles)疲劳对人体姿势控制具有最为实质的影响^[31]。说明腰伸肌疲劳相对于其他肌群疲劳,会给人体运动带来更大的影响。此外,腰伸肌疲劳是引起下腰疼症状及下肢运动损伤的重要诱导因素^[56],也会损害腰部甚至人体远端关节的

本体感觉能力^[60],并可以妨碍人体缓冲冲击力负荷及传递力量到远端环节^[47]。因此,腰伸肌疲劳会导致多种人

收稿日期:2017-03-13; 修订日期:2017-05-21

基金项目:上海体育学院研究生创新计划(yjscx2016008)。

作者简介:邢聪,男,博士研究生,主要研究方向为运动与人体健康, E-mail: feiren-cong1234@163.com。

作者单位:1.上海体育学院,体育教育训练学院,上海 200438;
2.国家体育总局运动技战术诊断与分析实验室,上海 200438

1. Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China;
2. Key laboratory of Sport Skill and Tactic Diagnosis and Analysis, General Administration of Sport of China, Shanghai 200438, China.

体运动结构及机能的改变。国外对于腰伸肌疲劳引起的人体运动结构及机能改变的研究较为深入且细致,却也造成了这一领域知识错综复杂不成体系。本研究的目的是在分析该领域文献的基础上,系统总结腰伸肌疲劳对人体运动结构及运动机能产生的影响,理清这些机能、结构变化的生理学机制。

1 研究思路及方法

借助Web of Science及PubMed数据库,以“腰伸肌疲劳/腰部肌肉疲劳(Lumbar Extensor Fatigue/Lumbar Muscles Fatigue)”为主题词进行检索。以“腰伸肌疲劳”为自变量,“人体运动”为因变量对获得的文献进行筛选,进而得到腰伸肌疲劳对人体运动结构产生影响的相关文献,并进行深入分析,总结腰伸肌疲劳对人体运动产生的影响并分析生理原因。

2 腰伸肌疲劳导致腰椎关节本体感觉能力下降

2.1 腰伸肌疲劳使腰椎关节本体感觉能力下降的表现

腰伸肌疲劳对腰椎关节本体感觉能力的影响主要表现在两个方面,降低腰椎关节感知动作幅度的敏感性以及影响腰椎关节产生特定力量的精确性。

腰伸肌疲劳对腰椎本体感觉能力影响的研究中,测定受试者躯干自主伸展或屈曲到目标位置的“重新定位误差”(Repositioning Errors)结果显示,腰伸肌疲劳引起了腰椎“重新定位误差”较疲劳前明显的增加($P < 0.000\ 001$)^[60,66]。而健康人在正常状态下,能够以相当高的精确度来重新呈现上一次脊柱活动的位置,且这一能力在日常生活中不会产生明显的改变^[59]。说明,腰伸肌疲劳造成了躯干感知脊柱位置变化的能力下降。此外, Jean-Alexandre等^[4]在腰伸肌疲劳后测定躯干在伸展运动20°及30°时的“重新定位变量”发现,在完成30°躯干伸展相比于20°时,躯干伸展绝对误差有明显的增加。说明,腰伸肌疲劳后,动作幅度越大,腰椎本体感觉的敏感性越低。

Sparto等^[55]应用等速测功仪(美国产KIN-COM 500H)为受试者提供腰伸肌等长阻力,并要求受试者连续完成多个随时间变化的伸腰力矩,受试者可以通过电脑显示的实时力矩数值来调整自身伸展力矩的产生。测量结果显示,相比于测试开始,持续一段时间后,躯干产生的伸展力矩相对于目标力矩的相对误差均方根明显上升,增加了一倍;此外,相比于开始测量时的肌电增益信号,在测试末段腹内斜肌、背阔肌、竖脊肌的肌电增益信号下降了17%。说明,躯干在腰伸肌疲劳后,产生特定伸展力量的精确性下降,且肌肉产生最大力量的能力被疲劳影响^[50,53,62]。

2.2 腰伸肌疲劳使腰椎关节本体感觉能力下降的生理学原因

本体感觉可用于描述关节中机械感受器控制的传入

和传出通路之间的复杂关系^[37,44]。已有研究发现,在外界压力作用下,如肌肉疲劳或机械负荷情况下,腰椎本体感觉都会受到影响^[4,5,60]。

现有研究认为,疲劳引起的本体感觉下降似乎与肌梭功能适应性改变有关。肌梭是涉及本体感受的主要机械性感受器^[42,43],肌梭功能适应性变化是指由于肌肉疲劳引起了肌梭激活敏感性的降低,导致肌梭内机械感受器感知刺激的阈值增加^[40]。在肌肉持续次最大强度用力时记录肌梭活动,结果显示,在肌肉持续收缩一段时间后,肌梭放电下降,运动单位的激活率下降^[3,33]。综合现有研究,认为肌肉疲劳后肌梭放电能力下降导致了肌梭内机械感受器感知动作刺激的阈值增加,使肌梭应对动态刺激的本体感觉传入神经冲动减少,造成本体感觉能力受损^[4]。Swash及Fox^[58]认为,疲劳引起的这种肌梭功能调整可能是神经退化的结果。但就目前而言,肌肉疲劳后肌梭放电下降导致肌梭机械感受器阈值升高的机制仍不清楚,这一机制值得在日后深入研究。

2.3 腰椎关节本体感觉能力下降对人体运动的负面影响

本体感觉,特别是来自于肌梭的本体感觉信息,在运动协调及关节稳定等运动控制中扮演着十分重要的角色,并有助于对动作进行即时修正,保证动作的精确性^[40]。上述研究已经证实,腰伸肌疲劳会降低腰椎本体感觉能力。而姿势控制涉及到视觉、前庭、本体感觉等信息之间的交互作用,其中,本体感觉输入扮演着重要角色。如果来自于这些感官系统的运动信息不一致,会导致感觉信息不匹配,倘若这种不匹配足够大,则会在运动中产生空间定向障碍和眩晕感^[28],从而严重影响了运动动作的有效完成。本体感觉能力下降除造成姿势控制能力下降,还会影响关节的稳定性。由疲劳引起的腰椎关节本体感觉能力下降,表现为关节产生特定力矩的精确性下降。这就造成在维持腰椎稳定时产生特定力矩的平顺性下降,使腰椎无法时刻有精确的力矩来维持腰椎稳定。

3 腰伸肌疲劳对脊柱稳定性的影响

3.1 腰伸肌疲劳降低脊柱稳定性的表现

脊柱稳定性可被定义为脊柱刚度与脊柱感觉控制之间的协同作用^[46]。脊柱的稳定对于肢体远端环节力量的产生及分配人体冲击力负荷具有十分重要的作用^[47]。而腰伸肌疲劳对躯干运动的主要影响之一,就是使脊柱的稳定性明显下降。脊柱稳定性下降主要有以下表现:椎间关节刚度损失;脊柱椎间关节机动性增加;脊柱运动功能不正常,包括椎间旋转比例的改变及椎间平移距离的改变;脊柱控制能力的损失等^[48]。

Granata等^[15]应用Lyapunov exponent(李雅普诺夫指数,可用来描述一个动力系统的稳定性)测量腰伸肌疲劳是否会影响躯干运动稳定性,结果显示,腰伸肌疲劳会导致

脊柱在矢状面弯曲和伸展运动中动态稳定性的明显降低。这一测试直接证明了腰伸肌疲劳会造成脊柱在运动中稳定性下降。此外, Parnianpour等^[39]通过使受试者在矢状面内抵抗抗最大强度阻力,完成腰部屈、伸运动,直到力竭。测量发现,受试者在完成以屈、伸为主的动作任务的后期,躯干在矢状面上的运动幅度减小,而旋转和侧屈动作的量级增加。说明,腰伸肌疲劳使腰椎关节的机动性增加,影响了腰椎动作的稳定性。

3.2 腰伸肌疲劳导致脊柱不稳定的生理机制

腰伸肌疲劳后使人体产生了以下几点变化造成了脊柱稳定性的下降:1)腰伸肌疲劳降低了肌肉产生力量的能力,引起腰椎关节周围力量分配不均衡,产生不正常的压力分布^[10];2)腰伸肌疲劳改变了腰椎关节周围肌肉激活的策略^[29,57],降低了腰腹肌肉协调共同激活来维持脊柱稳定的生理过程;3)腰伸肌疲劳引起腰椎关节本体感觉能力下降,改变了关节周围本体感受器的传入冲动,进而延长了肌肉激活的反应时间^[64]。

以往的研究将脊柱的稳定系统分为3个子系统:由椎骨、椎间盘、韧带组成的被动子系统;由脊柱周围的肌肉和肌腱构成的主动子系统,可将力量施加于脊柱;由中枢神经系统构成的神经子系统,通过监控各感受器来维持并调整脊柱稳定性^[38]。在日常生活中,中枢神经系统调节躯干伸肌及屈肌协调共同收缩来保持脊柱间稳定性^[63],尤其是腹横肌、竖脊肌、多裂肌^[45]。而在腰伸肌疲劳后,包括竖脊肌在内的肌肉由于疲劳而造成收缩能力降低,使腰腹部肌肉协调共同收缩能力下降。同时,次要肌群被过多激活,这就造成了原有的稳定平衡状态被打破,使脊柱处于非稳定状态。这一观点在后来的研究中得到证实, Sparto等^[55]在研究躯干神经肌肉及脊柱在躯干伸肌疲劳后的表现时发现,随着竖脊肌的疲劳,躯干腹内斜肌、背阔肌等次要肌肉随着时间的延长激活也随之增加,说明伸肌疲劳引起次要肌肉更多的激活来补偿主要伸肌产生力量的能力下降。此外,研究还发现,腰伸肌疲劳后,在人体矢状面施加相当于人体25%体重的外部负荷时,腹部肌肉的肌电活动相比于腰伸肌疲劳前明显下降^[22]。分析认为,这一现象主要是腰伸肌疲劳后造成了腰腹部肌肉募集敏感性下降或神经肌肉系统错误增加导致的。进一步证明了腰伸肌疲劳后,肌肉募集策略在中枢神经的调节下发生变化,腰腹肌协调共收缩能力受到限制,影响了脊柱的稳定性。James等^[26]发现,在腰伸肌疲劳后,躯干肌肉应对外部负荷的反应时间比腰伸肌疲劳前明显增加。这种肌肉反应延迟可以增加躯干对外部冲击负荷的运动学反应,增加了脊柱的运动负荷,降低腰椎的稳定性,使下腰疼风险提高。肌肉反应延迟主要是由于疲劳引起了关节本体感觉能力发生了变化^[34]。

3.3 脊柱稳定性下降对人体运动的负面影响

3.3.1 脊柱椎间应力产生变化增加了椎间盘的损伤风险

腰伸肌疲劳导致脊柱不稳定过程中,腰腹部肌肉募集模式的改变导致脊柱承受的外部负荷也随之发生改变。虽然腰椎力矩输出相对恒定,但腰椎主要稳定肌肉激活的下降导致椎间承受的负荷更高;且腰伸肌疲劳会导致腰椎双边肌肉激活不对称,进而表现出脊柱侧向剪应力增加。此外,在持续的循环载荷下,疲劳会引起椎体终板耐受能力下降。最终导致椎间盘纤维应力增加,造成了椎间纤维破裂的风险^[55]。

3.3.2 腰椎多余动作增加影响躯干完成动作的效率

在腰伸肌疲劳后,躯干主要动作完成精确度下降,次要动作的活动范围增加。这种次要活动的增加主要是因为完成目标动作时,主要肌群功能水平下降,次要肌群被过多地激活,引起了人体无关动作的出现^[54,61]。在次最大强度肌肉收缩过程中发现,运动单位的激活率下降,为保证肌肉力量的正常输出,肌肉会增加额外运动单位的募集保持肌肉力量^[32]。这种肌肉疲劳时表现出的募集补偿策略可以优化肌肉产生力量的能力。但同时造成人体无关动作的动作幅度增大,降低了动作的效率。这也是人体在疲劳时出现多余动作以及动作结构改变的原因。

3.3.3 脊柱不稳定不能为上、下肢的协调发力提供稳定的支点

腰椎周围肌肉是人体核心肌肉群的重要组成部分。核心稳定被定义为控制躯干位置和躯干运动的能力。腰椎周围既包括保持体位和控制人体局部环节运动的稳定性肌肉,又包括分配外部作用力、转移脊柱和骨盆负荷的运动性肌肉^[47]。一旦由于疲劳引起腰部肌肉激活异常,则控制躯干正常位置、转移外部负荷的能力会受到极大影响,最终导致人体动作效率下降。

4 腰伸肌疲劳改变腰椎-骨盆的运动节律

4.1 腰伸肌疲劳造成腰椎-骨盆运动节律改变的表现

腰伸肌疲劳后会改变腰椎关节相对于骨盆的运动节律,使腰椎-骨盆的运动比率明显增加。有研究发现,腰伸肌疲劳后,受试者在提举重物阶段及放下重物阶段都观察到比腰伸肌疲劳前更高的腰椎旋转角度,即腰椎-骨盆运动比率明显增加^[24]。腰椎-骨盆运动比率是指用腰椎旋转的改变量除以骨盆旋转的改变量。上述研究结果说明,在腰伸肌疲劳后,腰椎的活动范围较未疲劳前更大,刚性下降。虽然腰伸肌疲劳后腰椎-骨盆运动比例明显增加,但在同时期的研究中,Hu等^[23]应用腰椎-骨盆连续相对相位测量腰伸肌疲劳后腰椎骨盆的相对运动节律,发现受试者表现出明显更低的平均腰椎-骨盆连续相对相位值^[23,52]。也就是说,腰椎与骨盆的运动更加同步,这一现象的外在表现是腰椎-骨盆运动段更加单向性的旋转。

4.2 腰伸肌疲劳改变腰椎-骨盆运动节律的原因

从上文的分析可以看出,腰伸肌疲劳可以使脊柱及腰椎-骨盆的运动范围扩大,造成脊柱及骨盆稳定性下降。而腰伸肌疲劳引起的腰椎-骨盆协调同步性增加,会减小身体运动的动态复杂性^[15]。这可在一定程度上减小由于腰伸肌疲劳而引发的脊柱及骨盆稳定性下降,被认为是一种潜意识功能补偿性反应。而对于腰伸肌疲劳后腰椎-骨盆运动比率增加的原因,被认为是疲劳使腰椎-骨盆的稳定系统过早从肌肉稳定系统过度到韧带等粘弹性组织构成的被动脊柱稳定系统。在对人体屈、伸运动的肌肉活动进行研究时发现,健康受试者在完整完成躯干屈、伸运动时,可以观察到腰椎段竖脊肌肌电活动随着躯干弯曲而产生静默现象,这种现象被称为躯干弯曲松弛反应(Flexion Relaxation Response)^[7]。这一现象的生理机制是,在躯干弯曲过程中,负荷分配随着躯干弯曲逐渐从以肌肉为主的主动结构向以韧带为主的被动结构转移,使肌电活动下降^[14]。而在腰伸肌疲劳后测得这一现象的竖脊肌肌电静默在躯干弯曲时出现更早,伸展时表现更晚^[10]。说明,在腰伸肌疲劳后,躯干弯曲时过早将负荷转移到躯干被动稳定系统中,在伸展时延迟将负荷从被动稳定系统转移到主动稳定系统中来。在腰伸肌疲劳后的腰椎-骨盆运动比率也受相同规律影响。腰伸肌疲劳后,躯干外部负荷被过早的过度到韧带、肌腱弹性组织为主的被动稳定系统中。为补偿肌肉力量的过早消失,韧带等弹性组织必须进一步延长来施展更大的力量应对外部负荷,这就需要腰椎进一步弯曲,造成了腰椎-骨盆旋转比例增加。

4.3 腰椎-骨盆运动节奏改变对人体及运动的负面影响

腰椎-骨盆运动节奏改变主要导致两个结果,引发下腰部疼痛等症状及改变人体运动技术原有的结构。腰伸肌疲劳引起腰椎-骨盆运动比率增加,并使腰椎-骨盆的稳定性下降。这会造成人体在完成提举任务时,腰椎-骨盆弯曲峰值角度的增加,并使躯干在弯曲过程中,腰部肌肉和韧带之间的负荷分配机制产生改变,使负荷更早转移到脊柱粘弹性组织中。此时,腰椎韧带到腰骶关节中心的力臂要比腰椎肌肉到腰骶关节中心的力臂更短,使被动组织承受的旋转力矩更大。这会潜在导致脊柱承受压缩力及椎间剪应力升高,从而增加下腰疼的风险^[49]。另外,由于腰伸肌疲劳造成的腰椎-骨盆运动同步性增强,降低了躯干运动动作的复杂性,必然限制复杂运动技术的完成,削弱动作效率。

5 腰伸肌疲劳引起人体平衡能力下降,改变了人体保持平衡的策略

5.1 腰伸肌疲劳引起人体平衡能力下降的表现及原因

姿势晃动的增加表明人体平衡能力衰退,且这一现象常伴随着腰伸肌疲劳而出现^[36]。有研究应用人体重心平均移动速度及重心晃动面积作为姿势晃动指标,对比腰伸

肌疲劳前、后,人体静止站立时的身体晃动情况。结果发现,在腰伸肌疲劳后人体重心平均移动速度增加了29% ($P < 0.001$),重心晃动面积增加了28% ($P < 0.001$)^[9]。重心晃动速度及位移的显著增加,说明腰伸肌疲劳后人体原有的平衡稳定被打破,使人体摔倒的风险提高。

造成人体晃动的主要原因可能是维持人体平衡的主要关节受局部肌肉疲劳影响造成本体感觉能力下降。当调节躯干位置的本体感觉反馈由于腰伸肌疲劳而受到损害,腰椎关节会产生比预期更大的腰椎角度,这种运动会在静止站立时导致更大的身体重心位移。踝关节本体感觉能力在保持平衡中也具有十分重要的作用。Pline等^[41]在多关节测力仪上测量受试者在腰伸肌疲劳前、后,重新呈现原始踝关节跖屈和背屈角度的误差。结果发现,腰伸肌疲劳引起了踝关节本体感觉误差得分相比于未疲劳前增加了6% ($P=0.31$)。说明,腰伸肌疲劳可能引发了中枢处理本体感觉信号的能力被削弱,使踝关节本体感觉能力受到影响,引起了人体姿势晃动增加^[13]。由于肌肉疲劳而引起的关节本体感觉信号损害会延迟稳定肌肉的激活,降低肌肉力量的平滑输出,造成姿势晃动。

5.2 腰伸肌疲劳引起人体平衡策略改变的表现

平衡策略是为维持身体平衡,人体各环节所表现出的生物力学特征的集合。也可称之为人体为维持平衡所表现出的姿势策略。姿势策略的改变主要从人体多环节的运动生物力学特征变化来体现。

腰伸肌疲劳后,人体静止站立表现出身体前倾的姿势策略。Wilson等^[65]测量受试者腰伸肌疲劳后人体重心的位置发现:人体重心相对于踝关节的位置,疲劳后比疲劳前向前增加了1.1 cm ($P < 0.012$)。说明腰伸肌疲劳后,人体重心前移,人体略前倾。这种人体姿态的前倾,增加了下肢关节角度和角速度的可变性,从而使人体平衡策略发生变化。在腰伸肌疲劳后,人体静止站立时,发现受试者下肢踝关节跖屈力矩下降3.2 N·m;髋关节伸肌力矩增加10.2 N·m;踝关节峰值跖屈角度增加2.5°,峰值腰椎弯曲增加6.3°^[65]。上述结果显示,腰伸肌疲劳后人体静止站立表现出多关节前屈,使人体重心前移的姿态策略,且这一策略更加倚重于髋关节的力矩主导。

在研究腰伸肌疲劳后的慢跑动作时发现,腰伸肌疲劳后,健康受试者在慢跑动作中表现出腰椎伸展角度降低,这反映腰椎前凸角度损失及躯干弯曲角度增加^[20]。说明人体在腰伸肌疲劳后的慢跑中身体也表现出前倾姿态。且在腰伸肌疲劳后的慢跑姿势中发现,下肢摆动末期及站立初期表现出过度膝关节屈曲,呈现出蹲伏步态^[35]。这种蹲伏步态可以补偿性的使躯干更加直立,是对身体过度前倾的适应性机制^[20,51]。慢跑中膝关节屈曲幅度的增加,主要是由于腰伸肌疲劳引发的股四头肌激活效率下降,使膝关节伸肌力矩下降^[21]。

5.3 平衡策略改变对人体运动的负面影响

腰伸肌疲劳后人体呈现出前倾的身体姿势策略,脊柱表现出更大的弯曲。有研究指出,更强的腰椎肌肉激活伴随着更多的腰椎段脊柱及躯干弯曲^[12]。说明脊柱弯曲增加可以提供更好的人体动态稳定性。然而,在长时间的人体运动中,这些肌肉的疲劳风险也会随之增加。同时,改变人体躯干和腰椎固有位置可能改变椎间关节的压力负荷,增加椎间盘的压缩负荷及髓核压力^[2]。这可以导致椎间盘前后面压力和张力的异常,增加了下腰疼痛症状的可能性。此外,前屈的躯干姿势引起椎间液体流失以及养分向椎间盘的扩散,长期使脊柱处于这一状态会导致结构退化。

腰伸肌疲劳后引起了股四头肌抑制增加以及踝关节本体感觉能力下降,这些因素导致了人体在运动中下肢姿势策略改变,从而影响了下肢站立及步态的关节力学特征。下肢运动动力学的改变会对关节面施加非常规的力量和力矩,导致损伤或关节退化。前交叉韧带重建者表现出膝关节矢状面上力矩的改变,与受抑制和衰弱的股四头肌受试者表现出的特征相同^[30]。这些人群中较高的关节炎发病率就与下肢运动学特征改变有关。此外,下肢肌肉活动能力下降,在缓冲冲击力负荷时,影响了下肢吸收能量的能力,会传递更多的力量到腰部,提高腰部损伤的风险。

6 对抗腰伸肌疲劳提高运动质量的研究

6.1 促进人体本体感觉能力的研究

日常训练中提高本体感觉能力有助于抵抗训练及比赛中出现的肌肉疲劳。神经-肌肉训练可以提高关节的本体感觉能力,但这种提高会在2周后完全消失^[34]。因此,在日常训练中应该保证神经肌肉刺激训练的时长和频率,促进运动员本体感觉能力的发展。

研究发现,动态关节控制训练可以潜在的提高关节肌肉的反应能力^[25]。Ju等^[27]通过测量膝关节重复主动运动及重复被动活动,检验主动活动和被动活动对关节本体感觉能力的影响,发现重复主动运动后,关节的重新定位误差表现出明显的增加,但在重复被动运动中重新定位误差明显降低。关节被动活动是指关节肌肉在外力牵拉作用下运动学特征改变的运动。这一研究说明,关节重复被动活动具有提高关节位置感觉能力的作用。另外,经过研究发现,局部肌肉振动刺激可以增强疲劳后肌肉运动神经元的神经输入,并可以短暂恢复运动单位的放电率,潜在的阻止肌肉疲劳时肌梭放电下降的现象^[16]。但这种振动刺激是否可以缓解健康人群在腰伸肌疲劳时引起的本体感觉下降,还存在争议。Boucher等^[5,6]就发现,振动刺激可以明显降低健康受试者产生特定力量的精确性,认为振动刺激会干扰人体的本体感觉信号,造成躯干产生力量精确性的下降。但目前的研究都基本认同,振动刺激可以提高下腰疼患者躯干感觉运动的灵敏性。

6.2 提高脊柱或腰椎骨盆稳定性的研究

自主腹部肌肉激活(Volitional Abdominal Muscle Recruitment)可以提高腰椎-骨盆的稳定性,预防腰伸肌疲劳引起的腰部及下肢运动损伤。有研究发现,在腰伸肌疲劳后,双边腹内斜肌和竖脊肌在突然外部负荷施加于人体之前,激活活动就开始增加了^[22]。分析认为,腰伸肌疲劳引起了腹部肌肉的基础活动增加,来应对即将发生的外部负荷扰动。有实验发现,自主预先腹部肌肉收缩使脊柱以及腰椎-骨盆的稳定性增加,并且改善了下肢神经肌肉控制能力^[17,19]。例如,腹部预先收缩降低了腰伸肌疲劳对人体下肢落地造成的不良影响,减少落地时下肢损伤的风险^[8,18]。这一机制是由于腹部肌肉预先收缩,提高了腰部肌群协调共收缩的能力,同时提高了腹腔压力,增加了脊柱压缩力量^[11],进一步限制了脊柱的运动,使脊柱“刚性”加强。因此,可通过刻意增加腹部肌肉预先收缩来进一步提高腹部肌肉的激活水平,进而防止腰伸肌疲劳引起的腰椎-骨盆不稳定及下肢生物力学特征异常等现象。

7 小结

通过对腰伸肌疲劳相关文献的分析,发现腰伸肌疲劳主要从4个方面影响人体的运动:1)降低腰椎关节的本体感觉能力;2)影响人体运动中脊柱的动态稳定性;3)改变腰椎-骨盆运动节律;4)使人体平衡策略发生改变。引起人体这些机能及结构改变的原因,主要是腰伸肌疲劳导致了神经调节过程的变化,造成了多个关节本体感觉能力下降以及关节周围肌肉募集策略的变化。这些机能及结构改变对人体运动产生了很多负面的影响,主要体现在完成指定动作的效率大打折扣以及使运动损伤的风险大幅提高。通过文献研究还发现,现有的对抗腰伸肌疲劳,提高运动效率的训练方法和手段较为有限,难以为抗疲劳训练提供有效的理论指导,需要加大研究力度。

参考文献:

- [1] 邢聪,吴瑛,项贤林. 美国运动损伤前沿研究热点与内容分析——基于科学知识图谱的可视化研究[J]. 体育科学, 2016, 36(9): 66-72.
- [2] ADAMS M A, HUTTON W C. The effect of posture on the lumbar spine [J]. J Bone Joint Surg Bri, 1985, 67(4): 625-629.
- [3] BONGIOVANNI L G, HAGBARTH K E, STJERNBERG L. Prolonged muscle vibration reducing motor output in maximal voluntary contractions in man [J]. J Physiol, 1990, 423(1): 15-26.
- [4] BOUCHER J-A, ABBOUD J, DESCARREAU M. The Influence of acute back muscle fatigue and fatigue recovery on trunk sensorimotor control [J]. J Manipulative Physiol Ther. 2012, 35(9): 662-668.
- [5] BOUCHER J A, ABBOUD J, NOUGAROU F, et al. The effects

- of vibration and muscle fatigue on trunk sensorimotor control in low back pain patients [J]. *PloS One*, 2015, 10 (8): e0135838.
- [6] BOUCHER J A, NORMAND M C, DESCARREAU X. Trunk isometric force production parameters during erector spinae muscle vibration at different frequencies [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2013, 10 (1): 1-8.
- [7] COLLOCA C J, HINRICHS R N. The biomechanical and clinical significance of the lumbar erector spinae flexion-relaxation phenomenon: A review of literature [J]. *J Manipulat Phys Ther*, 2005, 28 (8): 623-631.
- [8] CYNH H S, OH J S, KWON O Y, *et al.* Effects of lumbar stabilization using a pressure biofeedback unit on muscle activity and lateral pelvic tilt during hip abduction in sidelying [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87 (11): 1454-1458.
- [9] DAVIDSON B S, MADIGAN M L, NUSSBAUM M A. Effects of lumbar extensor fatigue and fatigue rate on postural sway [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2004, 93 (1): 183-189.
- [10] DESCARREAU X, LAFOND D, JEFFREY-GAUTHIER R, *et al.* Changes in the flexion relaxation response induced by lumbar muscle fatigue [J]. *Bmc Musculoskelet Disord*, 2007, 9 (1): 10.
- [11] ESSENDROP M, SCHIBYE B. Intra-abdominal pressure and activation of abdominal muscles in highly trained participants during sudden heavy trunk loadings [J]. *Spine*, 2004, 29 (21): 2445-2451.
- [12] FARROKHI S, POLLARD C D, SOUZA R B, *et al.* Trunk position influences the kinematics, kinetics, and muscle activity of the lead lower extremity during the forward lunge exercise [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2008, 38 (7): 403-409.
- [13] GANDEVIA S C, ALLEN G M, BUTLER J E, *et al.* Supraspinal factors in human muscle fatigue: evidence for suboptimal output from the motor cortex [J]. *J Physiol*, 1996, 490 (Pt 2) (2): 529-536.
- [14] GEISSER M E, HAIG A J, WALLBOM A S, *et al.* Pain-related fear, lumbar flexion, and dynamic EMG among persons with chronic musculoskeletal low back pain [J]. *Clinical J Pain*, 2004, 20 (20): 61-69.
- [15] GRANATA K P, GOTTIPATI P. Fatigue influences the dynamic stability of the torso [J]. *Ergonomics*, 2008, 51 (8): 1258-1271.
- [16] GRIFFIN L, GARLAND S J, IVANOVA T, *et al.* Muscle vibration sustains motor unit firing rate during submaximal isometric fatigue in humans [J]. *J Phys*, 2001, 535 (Pt3): 929-936.
- [17] HADDAS R, HOOPER T, SIZER P, *et al.* Effects of volitional preemptive abdominal contraction on trunk and lower extremity biomechanics and neuromuscular control during a drop vertical jump [C]//*Proceedings of the American Society of Biomechanics*, F, 2013.
- [18] HADDAS R, LIEBERMAN I H, YANG J. Effects of volitional spine stabilization on asymmetric lifting task in individuals with recurrent low back pain; [C]//*Proceedings of the International Spine Research Symposium*, F, 2015.
- [19] HADDAS R, SAWYER S F, SIZER P S, *et al.* Effects of volitional spine stabilization and lower extremity fatigue on knee and ankle during landing performance in a recurrent low back pain population [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2016, 46 (2): 1.
- [20] HART J M, KERRIGAN D C, FRITZ J M, *et al.* Jogging kinematics after lumbar paraspinal muscle fatigue [J]. *J Athl Train*, 2009, 44 (5): 475-481.
- [21] HART J M, KERRIGAN D C, FRITZ J M, *et al.* Jogging gait kinetics following fatiguing lumbar paraspinal exercise [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2009, 19 (6): e458-e464.
- [22] HOSEINPOOR T S, KAHRIZI S, MOBINI B. Trunk extensor muscle fatigue influences trunk muscle activities [J]. *Work*, 2015, 51 (4): 793.
- [23] HU B, NING X. The influence of lumbar extensor muscle fatigue on lumbar-pelvic coordination during weight lifting [J]. *Ergonomics*, 2015, 58 (8): 1424.
- [24] HU B, NING X. The changes of trunk motion rhythm and spinal loading during trunk flexion and extension motions caused by lumbar muscle fatigue [J]. *Ann Biomed Eng*, 2015, 43 (9): 1-8.
- [25] IHARA H, NAKAYAMA A. Dynamic joint control training for knee ligament injuries [J]. *Am J Sports Med*, 1986, 14 (4): 309-315.
- [26] JAMES C R, DUFEK J S, BATES B T. Effects of stretch shortening cycle exercise fatigue on stress fracture injury risk during landing [J]. *Res Q Exerc Sport*, 2006, 77 (1): 1.
- [27] JU Y Y, WANG C W, CHENG H Y. Effects of active fatiguing movement versus passive repetitive movement on knee proprioception [J]. *Clin Biomech*, 2010, 25 (7): 708-712.
- [28] KARLBERG M, JOHANSSON R, MAGNUSSON M, *et al.* Dizziness of suspected cervical origin distinguished by posturographic assessment of human postural dynamics [J]. *J Vestib Res*, 1996, 6 (6): 37-47.
- [29] KUO A D, SPEERS R A, PETERKA R J, *et al.* Effect of altered sensory conditions on multivariate descriptors of human postural sway [J]. *Exp Brain Res*, 1998, 122 (2): 185-195.
- [30] LEWEK M, RUDOLPH K, AXE M, *et al.* The effect of insufficient quadriceps strength on gait after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Clin Biomech*, 2002, 17 (1): 56-63.
- [31] LIN D, NUSSBAUM M A, SEOL H, *et al.* Acute effects of localized muscle fatigue on postural control and patterns of recovery during upright stance: Influence of fatigue location and age [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2009, 106 (3): 425-434.
- [32] MACEFIELD G, HAGBARTH K E, GORMAN R, *et al.* Decline in spindle support to alpha-motoneurons during sustained voluntary contractions [J]. *J Physiol*, 1991, 440 (1): 497-512.
- [33] MACEFIELD G, HAGBARTH K E, GORMAN R, *et al.* Decline in spindle support of motoneurons during sustained voluntary contractions [J]. *J Physiol*, 1991, 440 (1): 497-512.
- [34] MIURA K, ISHIBASHI Y, TSUDA E, *et al.* The effect of local and general fatigue on knee proprioception [J]. *Arthroscopy*,

- 2004, 20 (4): 414-418.
- [35] MARJOLEIN M V D K, DOORENBOSCH C A, HARLAAR J. Muscle length and lengthening velocity in voluntary crouch gait [J]. *Gait Posture*, 2007, 26 (4): 532-538.
- [36] NARDONE A, TARANTOLA J, GIORDANO A, *et al.* Fatigue effects on body balance [J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Motor Control*, 1997, 105 (4): 309-320.
- [37] NEWCOMER K L, LASKOWSKI E R, YU B, *et al.* Differences in repositioning error among patients with low back pain compared with control subjects [J]. *Spine*, 2000, 25 (19): 2488-2493.
- [38] PANJABI M M. The stabilizing system of the spine. Part II. Neutral zone and instability hypothesis [J]. *J Spinal Disord*, 1992, 5 (4): 390-396.
- [39] PARNIANPOUR M, NORDIN M, KAHANOVITZ N, *et al.* 1988 Volvo award in biomechanics. The triaxial coupling of torque generation of trunk muscles during isometric exertions and the effect of fatiguing isoinertial movements on the motor output and movement patterns [J]. *Spine*, 1988, 13 (9): 982-992.
- [40] PASSATORE M, ROATTA S. Influence of sympathetic nervous system on sensorimotor function: whiplash associated disorders (WAD) as a model [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2006, 98 (5): 423-449.
- [41] PLINE K M, MADIGAN M L, NUSSBAUM M A, *et al.* Lumbar extensor fatigue and circumferential ankle pressure impair ankle joint motion sense [J]. *Neurosci Letters*, 2005, 390 (1): 9-14.
- [42] PROSKE U. What is the role of muscle receptors in proprioception? [J]. *Muscle Nerve*, 2005, 31 (6): 780-787.
- [43] PROSKE U, WISE A K, GREGORY J E. The role of muscle receptors in the detection of movements [J]. *Prog Neurobiol*, 2000, 60 (1): 85-96.
- [44] RIBEIRO F, OLIVEIRA J. Aging effects on joint proprioception: the role of physical activity in proprioception preservation [J]. *Eur Rev Aging Phys Act*, 2007, 4 (2): 71-76.
- [45] RICHARDSON C, TOPPENBERG R, JULL G. An initial evaluation of eight abdominal exercises for their ability to provide stabilisation for the lumbar spine [J]. *Aust J Physiother*, 1990, 36 (1): 6-11.
- [46] RICHARDSON C A, HODGES P W, HIDES J A. Therapeutic exercise for lumbopelvic stabilization: A motor control approach for the treatment and prevention of low back pain [J]. *Churchill Livingstone*, 2004, 05 (9): A452.
- [47] RIVERA C E. Core and lumbopelvic stabilization in Runners [J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2016, 27 (1): 319-337.
- [48] ROBERTSON D G E, CALDWELL G E, HAMILL J, *et al.* *Research Methods in Biomechanics* [M]. Human Kinetics, Champaign, USA, 2004.
- [49] RODRIGO A S, GOONETILLEKE R S, XIONG S. Load distribution to minimise pressure-related pain on foot: A model [J]. *Ergonomics*, 2013, 56 (7): 1180.
- [50] ROY S H, DE LUCA C J, CASAVANT D A. Lumbar muscle fatigue and chronic lower back pain [J]. *Spine*, 1989, 14 (9): 992-1001.
- [51] SAHA D, GARD S, FATONE S. The effect of trunk flexion on able-bodied gait [J]. *Gait Posture*, 2008, 27 (4): 653-660.
- [52] SEAY J F, VAN EMMERIK R E, HAMILL J. Low back pain status affects pelvis-trunk coordination and variability during walking and running [J]. *Clin Biomech*, 2011, 26 (6): 572-578.
- [53] SEIDEL H, BEYER H, BRUER D. Electromyographic evaluation of back muscle fatigue with repeated sustained contractions of different strengths [J]. *Eur J Appl Physiol*, 1987, 56 (5): 592-602.
- [54] SJØGAARD G, KIENS B, JØRGENSEN K, *et al.* Intramuscular pressure, EMG and blood flow during low-level prolonged static contraction in man [J]. *Acta Physiol*, 1986, 128 (3): 475-484.
- [55] SPARTO P J, PARNIANPOUR M, MARRAS W S, *et al.* Neuro-muscular trunk performance and spinal loading during a fatiguing isometric trunk extension with varying torque requirements [J]. *J Spinal Disord*, 1997, 10 (10): 145-156.
- [56] SPARTO P J, PARNIANPOUR M, REINSEL T E, *et al.* The effect of fatigue on multijoint kinematics, coordination, and postural stability during a repetitive lifting test [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 1997, 25 (1): 3.
- [57] SPEERS R A, KUO A D, HORAK F B. Contributions of altered sensation and feedback responses to changes in coordination of postural control due to aging [J]. *Gait Posture*, 2002, 16 (1): 20-30.
- [58] SWASH M, FOX K P. The effect of age on human skeletal muscle. Studies of the morphology and innervation of muscle spindles [J]. *J Neurol Sci*, 1972, 16 (16): 417-432.
- [59] SWINKELS A, DOLAN P. Regional assessment of joint position sense in the spine [J]. *Spine*, 1998, 23 (5): 590-597.
- [60] TAIMELA S, KANKAANP M, LUOTO S. The effect of lumbar fatigue on the ability to sense a change in lumbar position: A controlled study [J]. *Spine*, 1999, 24 (13): 1322.
- [61] VAN DIE N J H, OUDE VRIELINK H H, TOUSSAINT H M. An investigation into the relevance of the pattern of temporal activation with respect to erector spinae muscle endurance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 1993, 66 (1): 70-75.
- [62] VAN DIE N J H, TOUSSAINT H M, THISSEN C, *et al.* Spectral analysis of erector spinae EMG during intermittent isometric fatiguing exercise [J]. *Ergonomics*, 1993, 36 (4): 407-414.
- [63] VERA-GARCIA F J, ELVIRA J L L, BROWN S H M, *et al.* Effects of abdominal stabilization maneuvers on the control of spine motion and stability against sudden trunk perturbations [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2007, 17 (5): 556-567.
- [64] WILDER D G, ALEKSIEV A R, MAGNUSSON M L, *et al.* Muscular response to sudden load. A tool to evaluate fatigue and rehabilitation [J]. *Spine*, 1996, 21 (22): 2628-2639.

(下转第96页)

在“新时期学校体育”专题,季浏教授对即将发布的“我国普通高中体育与健康课程标准(2017版)”进行了解读,同时回应了课程改革以来存在的一些质疑与问题。王健、孙晋海、汪晓赞、曹莉等学者也分别做了有关学校体育督导、大数据建设、健康促进、校园足球风险防控等的专题报告。

在“体力活动与健康”专题,王正珍、黄雅君、任宏等学者分别就当前运动科学的研究热点、静态行为与健康的相关研究进展、儿童骨密度发育水平的影响因素等内容做了专题报告。

在“体育产业”专题,林显鹏、王子朴、陈元欣等学者分别从我国冰雪产业前景、英国青少年足球普及与提高、职业体育俱乐部参与场馆运营等视角做了专题发言。

此外,还有一批优秀的学者围绕上述专题进行了积极发言与认真讨论。本次会议得到了全国百余所高校、科研院所学者们的积极响应与大力支持,产生了一批优秀的学术研究成果,为体育改革与发展的理论研究和实践起到了积极作用。

(上接第89页)

[65] WILSON E L, MADIGAN M L, DAVIDSON B S, *et al.* Postural strategy changes with fatigue of the lumbar extensor muscles [J]. *Gait Posture*, 2006, 23 (3): 348-354.

[66] YILMAZ B, YAŞAR E, TAŞKAYNATAN M A, *et al.* Relation-

ship between lumbar muscle strength and proprioception after fatigue in men with chronic low back pain [J]. *Kronik Bel' Ağrılı Erkeklerde Bitkinlik Sonrası Lomber Kas Gücü ve Propriyosepsiyon Arası ndaki İliş ki*, 2010, 25 (2): 68-71.

本刊声明

《体育科学》为国家社会科学基金资助期刊,不收取任何费用,特此声明。

《体育科学》编辑部
2017年7月10日