

文章编号:1004-7220(2020)01-0127-06

运动性疲劳的生物力学评价及其与损伤关系研究进展

夏锐^a, 张希妮^{b*}, 张燊^b, 孙晓乐^b, 傅维杰^b

(上海体育学院 a.体育教育训练学院;b.运动健身科技省部共建教育部重点实验室,上海 200438)

摘要:综述国内外有关运动性疲劳的研究文献,对运动性疲劳诱导方案、下肢生物力学特征及其与损伤关系进行总结。现阶段,实验室条件下诱导运动性疲劳主要可分为传统型疲劳方案和功能型疲劳方案两种,传统型疲劳方案的模型主要有功率自行车、跑台及台阶实验模型等;功能型疲劳方案更贴近运动实际或比赛中所发生的情况,通常表现为多运动平面相结合的运动形式。此外,对运动性疲劳的生物力学评价主要从运动学、地面反作用力、关节力矩、肌电图指标等方面展开,不同疲劳方案会对研究结果产生影响。未来的研究中需要考虑将疲劳诱导方案和评价指标进行标准化,以便将不同疲劳方案的诱导效果进行比较,为疲劳方案选择提供参考;同时,针对具体动作结构特征,更多地关注不同疲劳方案诱导后大脑-神经活化反馈及肌肉-骨骼激活效应的内在联系,理解不同疲劳方案间的生物力学机制差异,更深层次地探讨疲劳对运动损伤的影响。

关键词:运动性疲劳;疲劳诱导方案;生物力学评价;运动损伤

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.01.024

Research Progress of Biomechanical Evaluation on Exercise-Induced Fatigue and its Relationship with Sport Injuries

XIA Rui^a, ZHANG Xini^{b*}, ZHANG Shen^b, SUN Xiaole^b, FU Weijie^b

(a. School of Physical Education and Sport Training; b. Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: The research progress in fatigue protocols and biomechanics of lower extremity and its relationship with injury induced by exercise-induced fatigue was reviewed in this paper. At present, fatigue protocols can be divided into the traditional fatigue-induced protocol and the functional fatigue-induced protocol under laboratory condition. The former mainly includes power-cycling model, treadmill run model and step-ups model, while the latter is closer to what is experienced during competition, which is usually shown as multidirectional movements. In addition, the biomechanical measures of exercise-induced fatigue mainly include kinematics, ground reaction force, joint mechanics and electromyography. Different fatigue protocols do not uniformly produce alterations in lower limb biomechanical factors. The refinement of fatigue protocols and specific indicators should be considered in future studies, in order to compare the induced effects of fatigue protocols and provide references for the selection of fatigue protocols in laboratory tests. Meanwhile, the relationship between the response of brain-nerve system and the activation of musculoskeletal system for specific athletic task should be focused, so as to understand the difference of biomechanical mechanisms between fatigue protocols and further explore the effect of exercise-induced fatigue on sports injuries.

Key words: exercise-induced fatigue; fatigue protocol; biomechanical evaluation; sports injury

收稿日期:2018-09-10; 修回日期:2018-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(11772201, 11572202, 11302131), 国家重点研发计划项目(2019YFF0302100), 上海市人才发展基金资助计划(2018107), 上海市教委“曙光学者”计划(19SG47)

通信作者:傅维杰,副教授,博士生导师,E-mail: fuweijie@sus.edu.cn

* 为共同第一作者

运动性疲劳的产生是一个相当复杂的问题,它是各方面因素综合叠加的结果。早在 1880 年,从 Mosso 研究疲劳开始,随着研究的深入,运动性疲劳的概念也进行着不断的更迭。1982 年,第 5 届国际运动生物化学会议将运动性疲劳定义为“机体生理过程不能持续其机能特定水平上和(或)不能维持预定的强度”^[1]。然而在运动医学及生物力学领域,目前仍没有明确的关于疲劳界定的标准,且针对运动性疲劳的评价方法也不尽相同,导致上述疲劳定义在实际操作过程中仍较为模糊。总体而言,发生运动性疲劳时,肌肉对外在载负荷的承受能力降低,运动表现也随之下降;同时伴随出现技术动作变形,导致骨骼、关节、肌肉和软组织损伤风险增加^[2]。本文旨在总结实验室条件下诱导人体运动性疲劳的方案及运动性疲劳的生物力学评价方法,综合国内外关于运动性疲劳对人体生物力学特征的影响,分析疲劳状态下发生下肢损伤可能的生物力学原理,从而为研究疲劳提供新思路,并对运动时如何避免因疲劳造成的下肢损伤提供新的理论基础。

1 运动性疲劳的一般分类

根据疲劳速度、疲劳范围和疲劳程度可分为以下几种^[3](见表 1)。根据主观感觉疲劳量表(rating of perceived exertion, RPE)评定,可将疲劳水平归类为 7 个级别;此外,在 Mclean 等^[4]的研究中,疲劳程度被进一步量化,分为无疲劳、25% 疲劳、50% 疲劳、75% 疲劳、100% 疲劳 5 个等级。在 Tsai 等^[5]的

表 1 运动性疲劳的分类方法

Tab.1 Classification of exercise-induced fatigue

分类原则	类别	定义/生理表现
疲劳程度	轻度疲劳	稍事休息即可恢复,属正常现象
	中度疲劳	疲乏、肌肉酸痛、心悸
	重度疲劳	头痛、胸痛、恶心甚至呕吐,持续较长时间
疲劳范围	整体疲劳	全身运动引起全身各器官机能下降而产生的疲劳
	局部疲劳	由运动导致的局部器官机能下降而引起的疲劳
疲劳速度	快速疲劳	短时间、剧烈运动引起的身体机能下降现象
	耐力疲劳	小强度、长时间运动引起的身体机能下降现象

研究中,疲劳时期被分成无疲劳、疲劳后即刻、疲劳后 20 min 和疲劳后 40 min 4 个时期。但在疲劳的定量研究上,仍没有形成统一的标准。

2 运动疲劳诱导方案

实验室条件下诱导运动性疲劳主要可分为传统型疲劳方案和功能型疲劳方案。前者主要为关节在矢状面上的运动,如关节的屈伸;后者则表现为关节在多个平面上的运动,如关节的屈伸、内收外展(内/外翻)及内/外旋。与传统型疲劳方案相比,功能型疲劳方案更贴近实际运动模式。

2.1 传统型疲劳方案

传统型疲劳方案(traditional fatigue-induced protocol)模型主要有功率自行车模型^[6]、跑台模型^[7]及台阶模型^[8]等。邹晓峰等^[6]为了观察运动性疲劳对跳深动作结构的影响,采用功率自行车模型诱导疲劳方案。具体为:自行车开始负荷为 50 W,每级负荷递增 50 W 且要求始终保持 55 r/min 骑行节奏。当受试者难以维持节奏时,停止蹬踏功率自行车,完成疲劳状态下的跳深测试。而跑台和台阶实验主要通过逐级递增负荷强度^[9]、利用不同跑速进行交替的速度跑^[10],观察运动性疲劳对跑步和落地表现的生物力学影响,或要求受试者完成连续数次的上下台阶练习以诱导疲劳^[8]。

由于其设备流通面广、操作简便,因此功率自行车、跑台和台阶都是实验室诱导运动性疲劳的常用设备。受试者运动时逐级增加负荷,通过检测 RPE、心率、血乳酸等指标来判定受试者是否达到运动性疲劳。但目前国际上并没有衡量运动性疲劳诱导的最佳方法^[10],研究人员通过自身经验判断来改变方案以达到运动疲劳的目的缺乏严谨性。

2.2 功能性疲劳方案

与传统型疲劳方案诱导不同,功能型疲劳方案(functional fatigue-induced protocol)诱导更贴近实际运动或比赛中的模式。相应地,功能型疲劳方案诱导通常表现为多运动平面相结合的运动形式^[10]。

Tsai 等^[5]的疲劳方案要求受试者连续进行 5 次垂直纵跳,每次纵跳的高度均要求高于受试者本人纵跳最高高度的 50%,随后进行 30 m 冲刺跑一组。受试者需要反复上述过程,直到连续 5 次垂直纵跳的高度都无法超过其纵跳最高高度的 50% 为止。

Quammen 等^[10]采用以灵敏素质为主导的功能性疲劳方案。实验要求受试者按照 220 次/min 节奏完成跳箱练习,然后按指定路线绕桩(见图 1),再完成连续垂直纵跳 5 次且需维持在最高高度 80%,最后完成一组敏捷梯练习。共 4 组,组间无间歇。

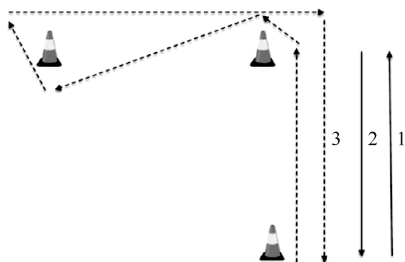


图1 绕桩练习路线示意图^[10]

Fig.1 Schematic of the "L" drill fatigue protocol

本课题组采用折返跑+垂直纵跳疲劳方案诱导运动员疲劳^[11](见图 2)。该方案首先让受试者完成 10 m×6 全力折返跑一组,接着连续垂直纵跳 5 次。受试者需重复上述过程,直到 5 次纵跳平均高度低于最高高度 70% 为止。

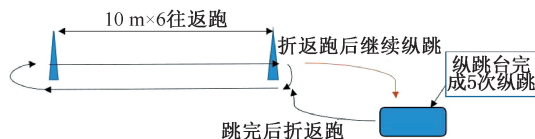


图2 折返跑+垂直纵跳疲劳诱导方案示意图

Fig.2 Schematic of shuttle run + maximal vertical jump fatigue protocol

与传统型疲劳方案相似,功能性疲劳方案中也没有发现运动性疲劳诱导的最佳方法。鲜有研究者将两种不同类型的疲劳方案之间的干预效果进行比较。建议今后在不同类型疲劳方案诱导效果的比较上进一步研究。

2.3 动物运动疲劳诱导方案

由于动物疲劳实验的变量可控性较高,疲劳制备较易实现,故早期的疲劳主要以大鼠和小鼠为研究对象,采用跑台和游泳训练以模拟人体运动疲劳。田野等^[12]选取雄性 SD 大鼠,在跑台上以 18 m/min 跑步 100 min,过程中采用声音和毛刷刺激以维持其运动。郑澜等^[13]选取雄性小鼠,在水缸中负重游泳。当小鼠沉入水中至少 10 s,且无法完成翻身反射时认为达到力竭状态。但是动物疲劳模型存在以下缺点:① 运动行为较难控制,特别是

在游泳中;② 运动过程难以进行动态监控;③ 造模成功评价依赖于人体疲劳标准。且动物疲劳实验的原则是尽量模拟运动员训练,最终还是需要在人体实验中得以实现,故本文更多地从生物力学角度出发,探究人体疲劳建模。

3 运动性疲劳的评价方法

现阶段,运动性疲劳的生物力学评价主要从运动学、地面反作用力、关节力矩、肌电等方面进行说明。

3.1 矢状面运动学

现有的研究在探讨疲劳对落地过程中下肢矢状面运动学参数的影响时,如落地时膝关节屈曲角度峰值的变化,得出了不同甚至完全相悖的结论。Kernozek 等^[14]研究表明,疲劳后膝关节屈曲角度峰值增加;Chappell 等^[15]研究发现,疲劳后膝关节屈曲角度峰值减小;Patrek 等^[16]研究发现,疲劳后膝关节屈曲角度峰值没有变化。

张强等^[17]研究结果发现:中度疲劳状态下,髌、膝、踝三关节屈曲角度峰值在落地过程中均增加。伴随神经肌肉疲劳程度加深,重度疲劳状态下,膝、踝关节屈曲角度峰值减小。下肢关节屈曲角度峰值随疲劳程度进展呈现出从“硬着陆(stiff landing)”到“软着陆(soft landing)”再到“硬着陆”的“非线性”变化。

在探讨疲劳对跑步的影响时,结果较为一致,即发现疲劳后跑者踝关节背屈角度减小^[18]。Bazueloruz 等^[19]在研究中进一步发现,疲劳后女性的踝关节背屈角度小于男性。

3.2 额状面/水平面运动学

观察运动性疲劳对女性足球运动员落地过程中下肢额状面/水平面运动学参数的影响发现:髌关节外展角度(膝关节屈曲峰值时刻)较疲劳前增加;膝关节内旋角度(触地瞬间)较疲劳前增加^[10]。

此外,落地高度也会对疲劳状态下的落地策略产生影响。Dickin 等^[20]比较疲劳对 30、40 和 50 cm 处落地动作运动学影响时发现:疲劳状态下,髌关节外展、膝关节外翻角度增加且冲击时刻的髌关节外展角度出现了疲劳与落地高度的交互效应。此外,就不同落地高度而言,在 0.3、0.5 m 处落地,髌关节内收角度减小;而在 0.4 m 处落地,髌关节内收角度增加。

3.3 地面反作用力

在生物力学研究中,冲击力、负载率等地面反作用力(vertical ground reaction force, vGRF)特征是反映肌骨系统承受外界载荷能力的常用敏感指标^[11]。

关于疲劳状态下落地动作 vGRF 的研究结果并不统一。本课题组研究结果表明,两种疲劳方案均不能改变疲劳后的 vGRF 峰值及最大负载率^[11]。James 等^[21]研究发现,落地动作 vGRF 峰值在疲劳后增加,但未对负载率产生影响。

关于运动性疲劳对落地过程冲击力和负载率的影响,主要有两种机制。第 1 种机制即随着疲劳的产生,机体调节撞击能力降低。为了与疲劳前的落地模式保持一致,冲击力和负载率会随着疲劳的产生而增加。第 2 种机制即人体在疲劳状态下会采取一定的保护策略,表现为通过降低触地瞬间的冲击力和负载率在在一定程度上保护机体免受伤害^[13]。

3.4 关节力矩

运动性疲劳后关节力矩的变化也有争议。Kernozek 等^[14]研究发现,疲劳后伸髋/伸膝力矩分别减少约 25% 和 22%,且不同性别之间没有差异;Chappell 等^[15]在类似的研究中却发现:疲劳不会对伸膝力矩产生影响;Murdock 等^[22]研究结果表明,在力竭或接近力竭状态时膝关节外翻力矩增加,这可能是由于疲劳状态下肌骨系统维持关节稳定性能力下降造成的。

本课题组使用折返跑+垂直纵跳的方式诱导运动员疲劳,发现疲劳状态下人体被动伸膝力矩增加,提示人体需要募集更多伸膝肌群以对抗着地时突然产生的冲击力,维持下肢稳定^[23]。

3.5 肌电信号

肌电信号(surface electromyography, sEMG)可以反映神经肌肉系统生物电活动的总和,故可作为研究人体疲劳的一个有效手段。现有研究中,主要应用肌电信号的线性时、频特征评价神经肌肉疲劳。时域分析主要包括积分肌电值(integrate electromyograph, iEMG)、均方根值(root mean square, RMS)和平均振幅(mean amplitude, MA)值等;频域分析则包括平均功率频率(mean power frequency, MPF)、中位频率(median frequency, MF)

等。研究表明,疲劳后 RMS、iEMG 值增加;肌电功率谱向低频转移,表现为 MPF、MF 减少^[9,22,24]。陆阿明等^[9]研究发现,中等强度恒速跑至疲劳过程中,股直肌、股二头肌、胫骨前肌积分肌电逐渐增加;股二头肌与胫骨前肌平均功率频率逐渐降低,股直肌平均功率频率总体呈下降趋势。Kellis 等^[24]通过观察疲劳对于单腿落地过程中大腿肌群活动的影响发现,在落地前期,股二头肌激活程度降低,股四头肌激活程度维持疲劳前水平;该结果提示伸膝肌群疲劳后,神经系统可能会选用以大腿前群肌肉为主导的落地策略。Murdock 等^[22]研究结果验证了前人的研究,在力竭或接近力竭状态时膝关节周围肌群的激活程度会显著下降,共收缩现象不明显,膝关节松弛增加,影响肌肉维持关节稳定性的能力。

3.6 其他指标

其他较常用判定运动性疲劳的指标包括:心率变异性、主观感觉疲劳量表和肌肉形态结构参数。

3.6.1 心率变异性 心率变异性(heart rate variability, HRV)可在一定程度反映心肌疲劳,主要包含:① 时域指标。窦性心搏间期标准差(standard deviation of normal to normal intervals, SDNN);相邻窦性心搏间期之差的均方根值(root mean square of successive differences, RMSSD);相邻心搏 R-R 间期之差值大于 50 ms 的心搏数占心搏总数的百分比(the percentage of all adjacent normal to normal distances that differ beyond 50 ms from each other, PNN50);② 频域指标。低频功率值(power low frequency, pLF);高频功率值(power high frequency, pHF);低频高频功率比(power low frequency/power high frequency, pLF/pHF)。研究结果表明,运动性疲劳后,受试者 SDNN、RMSSD、PNN50 均下降;LFn、LF/HF 增加,即心交感神经活动加强,副交感神经活动减弱。此外,HRV 与血液指标相结合,对于提示早期疲劳具有一定的应用价值^[25]。

3.6.2 主观感觉疲劳量表 主观感觉疲劳量表(rating of perceived exertion, RPE)可反映自身整体主观疲劳度。杨书林等^[26]研究结果表明,RPE 与心率($r=0.89$)、血乳酸值($r=0.78$)呈高度相关,可以反映疲劳程度。

3.6.3 肌肉形态结构参数 肌肉形态结构变化同样可作为运动性疲劳的评判指标。温慧莹等^[27]运用超声图像观察疲劳后肌肉厚度、羽状角的变化情况:股内、外侧肌厚度及羽状角变化率较疲劳前增加,提示,运动性疲劳会使肌肉的形态结构产生改变。迟淑勋等^[28]采用脑电(中枢神经)、肌电(骨骼肌)、皮电(皮肤)及 HRV 指数(心肌)4种评价指标评判运动性疲劳,研究结果表明,脑电、肌电和 HRV 指数对运动性疲劳评判具有一致性且疲劳时的先后次序为心肌→骨骼肌→皮肤电→脑电,提示运动性疲劳次序是心肌疲劳→外周疲劳→中枢疲劳。

综上所述,运动性疲劳是个复杂的过程,是大脑-神经活化反馈、肌肉-骨骼激活效应等多方面因素叠加的效果。现有的生物力学研究表明,髌/膝关节屈曲角度减小;髌关节内旋/内收角度增加;外力矩(屈曲/外展)增加;股四头肌激活程度增加、腓绳肌激活程度降低等均被视为对运动性疲劳较为敏感。同时,研究还发现,疲劳后 HRV 时域指数下降,RPE、脑电图功率提高,肌肉厚度增加。由此可见,多指标相结合可以更全面的评价机体运动性疲劳,深入对肌肉疲劳机制的认识。然而,现阶段由于各研究中运动疲劳诱导方案、运动任务、分析方法的不一致,也给各运动疲劳诱导方案寻找适用评价指标造成一定困难,需要在今后的研究中进一步探索。

4 运动性疲劳与损伤

长时间、高强度的运动会诱发神经肌肉疲劳,由于该运动性疲劳而导致的下肢肌-骨系统控制能力的下降则是引发运动损伤的重要诱因^[2]。Barber-Westin 等^[29]研究表明,在包含落地动作的运动任务(如跳跃、侧切)中,疲劳后髌/膝关节屈曲角度的减小;股四头肌激活增加、股后肌群激活减小均是可能导致非接触性前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤的危险因素。在落地过程中,较小的屈膝角度是胫骨近端剪切力增加的主要原因,后者会导致胫骨前移进而造成前交叉韧带载荷增加。以上结果提示,随着疲劳程度增加(如力竭),下肢肌骨系统控制能力下降,神经肌肉系统可能无法再有效维持疲劳前水平,导致 ACL 损伤风险增加^[2]。建议运动员在进行包含冲击性落地动

作的训练和比赛过程中,应有意识增加下肢屈曲角度,降低 ACL 损伤的可能性。Kellis 等^[24]研究发现,女性中长跑跑者触地后膝关节、踝关节主动肌激活水平增加以及拮抗肌激活水平降低,这种主动肌与拮抗肌的失衡状态改变了关节稳定性,可能对跑者的膝关节损伤产生影响。

此外,运动过程中的被动冲击可能会对人体肌-骨系统产生破坏,但并不是导致运动损伤的根本原因。Nigg 等^[30]在前期研究的基础上提出:把人体作为一个振动系统,将作用于此系统的冲击力视为引起人体软组织振动的输入信号,当冲击信号的输入频率与软组织固有频率接近时会引起系统共振;人体肌-骨系统可以通过改变相应软组织的时、频域特性,避开可能产生的共振,达到预防运动损伤的目的。总之,肌肉调谐作用、软组织振动特征及肌-骨系统激活效应确实存在改变,需要进一步探究三者之间的关系,为预防和减小疲劳状态下的运动损伤提供理论基础。

5 总结与展望

人体疲劳的发展是一个集神经、生理、力学、心理等特征交织变化的复杂过程。无论是竞技体育还是大众健康,疲劳始终是阻碍运动成绩提高、诱发潜在运动损伤的重要因素,时至今日它仍是人体科学的研究热点。诚然,运动疲劳的产生与运动负荷的形式、大小等息息相关,但人体自身的身体素质、机能水平对其的影响亦不容忽视,这其中,较大的个体差异性增加了运动疲劳模型标准化建立的难度。此外,现阶段不同疲劳方案之间生物力学表现的敏感性以及所存在差异的机制仍不明朗。未来针对运动性疲劳的研究应更多地关注不同疲劳方案诱导后大脑-神经活化反馈及肌肉-骨骼激活效应的内在联系,理解不同疲劳方案间的生物力学机制差异,更深层次地探讨疲劳对运动损伤的影响。

参考文献:

- [1] 岳文雨. 运动性疲劳特征的研究综述[J]. 中国体育科技, 2003, 39(10): 50-53.
- [2] ENOKA RM. Muscle fatigue-from motor units to clinical symptoms[J]. J Biomech, 2012, 45(3): 427-433.
- [3] 王瑞元, 苏全生. 运动生理学. 北京: 人民体育出版社, 2012.
- [4] MCLEAN SG, SAMOREZOV JE. Fatigue-induced ACL

- injury risk stems from a degradation in central control [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2009, 41(8): 1661.
- [5] TSAI LC, SIGWARD SM, POLLARD CD, *et al.* Effects of fatigue and recovery on knee mechanics during side-step cutting [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2009, 41(10): 1952-1957.
- [6] 邹晓峰, 陈民盛. 运动性疲劳对跳深动作结构影响的生物力学分析[J]. *体育学刊*, 2009, 16(7): 89-92.
- [7] FRIESENBICHLER B, STIRLING LM, FEDEROLF P. Tissue vibration in prolonged running [J]. *J Biomech*, 2011, 44(1): 116-120.
- [8] MCLEAN SG, FELLIN RE, SUEDEKUM N, *et al.* Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies [J]. *Med Sci Sport Exer*, 2007, 39(3): 502-514.
- [9] 陆阿明, 王国栋, 王芳. 运动性疲劳对跑运动学与下肢肌肉的影响[J]. *体育科学*, 2012, 32(6): 44-49.
- [10] QUAMMEN D, CORTES N, LUNEN BLV, *et al.* Two different fatigue protocols and lower extremity motion patterns during a stop-jump task [J]. *J Athl Training*, 2012, 47(1): 32-41.
- [11] 夏锐, 张希妮, 傅维杰. 两种疲劳方案对落地时下肢运动学和冲击力时频特征的影响 [J]. *医用生物力学*, 2017, 32(5): 427-435.
- XIA R, ZHANG X, FU W. Effects of two fatigue protocols on lower extremity kinematics and time/frequency-domain characteristics of impact forces during drop landings [J]. *J Med Biomech*, 2017, 32(5): 427-435.
- [12] 田野, 高铁群. 大鼠运动性疲劳模型的建立[J]. *北京体育大学学报*, 1995, 18(4): 49-53.
- [13] 郑澜, 陆爱云. 运动性疲劳动物模型的研究[J]. *中国体育科技*, 2003, 39(2): 20-23.
- [14] KERNOZEK TW, TORRY MR, IWASAKI M. Gender differences in lower extremity landing mechanics caused by neuromuscular fatigue [J]. *Am J Sport Med*, 2008, 36(3): 554-565.
- [15] CHAPPELL JD, HERMAN DC, KNIGHT BS, *et al.* Effect of fatigue on knee kinetics and kinematics in stop-jump tasks [J]. *Am J Sport Med*, 2005, 33(7): 1022-1029.
- [16] PATREK MF, KERNOZEK TW, WILLSON JD, *et al.* Hip-abductor fatigue and single-leg landing mechanics in women athletes [J]. *J Athl Training*, 2011, 46(1): 31-42.
- [17] 张强, 胡婧, 伍颢. 不同分级神经肌肉疲劳对冲击性落地动作下肢生物力学的非线性影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2014, 33(12): 1153-1160.
- [18] DUTTO JD, LEVY M, Lee KK. Effect of fatigue and gender on running mechanics [J]. *Med Sci Spor Exer*, 1997, 29(5): 82.
- [19] BAZUELORUIZ B, DUR GIL JV, PALOMARES N, *et al.* Effect of fatigue and gender on kinematics and ground reaction forces variables in recreational runners [J]. *Peer J*, 2018, 6(3): e4489.
- [20] DICKIN DC, JOHANN E, WANG H, *et al.* Combined effects of drop height and fatigue on landing mechanics in active females [J]. *J Appl Biomech*, 2015, 31(4): 237-243.
- [21] JAMES CR, DUFEEK JS, BATES BT. Effects of stretch shortening cycle exercise fatigue on stress fracture injury risk during landing [J]. *Res Q Exercise Sport*, 2006, 77(1): 1-13.
- [22] MURDOCK GH, HUBLEY-KOZEY CL. Effect of a high intensity quadriceps fatigue protocol on knee joint mechanics and muscle activation during gait in young adults [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2012, 112(2): 439-449.
- [23] 张希妮, 傅维杰, 夏锐. 不同疲劳诱导方案对落地时下肢关节力学、刚度 and 能量吸收的影响[J]. *体育科学*, 2017, 37(11): 48-55.
- [24] KELLIS E, KOUVELIOD V. Agonist versus antagonist muscle fatigue effects on thigh muscle activity and vertical ground reaction during drop landing [J]. *J Electromyogr Kines*, 2009, 19(1): 55-64.
- [25] MORALES J, ALAMO JM, GARC A-MASS X, *et al.* Use of heart rate variability in monitoring stress and recovery in judo athletes [J]. *J Strength Cond Res*, 2014, 28(7): 1896-1905.
- [26] 杨书林, 曾凡星. RPE 在运动处方中的应用 [J]. *荆州师专学报*, 1993, 16(5): 84-86.
- [27] 温慧莹, 陈昕, 王君. 基于超声图像的运动肌肉疲劳研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015, (5): 545-550.
- [28] 迟淑勋, 李宏伟, 赖敏. 运动性中枢疲劳与外周疲劳的生物反馈研究[J]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(2): 164-168.
- [29] BARBER-WESTIN SD, NOYES FR. Effect of fatigue protocols on lower limb neuromuscular function and implications for anterior cruciate ligament injury prevention training: A systematic review [J]. *Am J Sport Med*, 2017, 45(14): 3388-3396.
- [30] NIGG BM, BOYER KA, COLE G, *et al.* Impact forces, soft tissue vibrations and muscle tuning [J]. *J Biomech*, 2006, 39(8): S194-S194.