



# 不同运动性疲劳方案对足球专项大学生躯干和下肢运动学特征的影响

## Effect of Different Fatigue Protocols on Trunk and Lower Extremity Kinematics for Collegiate Soccer Players

张美珍<sup>1\*</sup>, 郭浩<sup>1</sup>, 刘卉<sup>2</sup>, 武晓刚<sup>1</sup>, 陈维毅<sup>1</sup>

ZHANG Meizhen<sup>1\*</sup>, GUO Hao<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>, WU Xiaogang<sup>1</sup>, CHEN Weiyi<sup>1</sup>

**摘要:**目的:对比分析足球专项体能测试(SAFT<sup>90</sup>)和Yo-Yo间歇耐力水平2测试(Yo-Yo IE2)对运动员着地时刻神经肌肉控制的影响。方法:选取7名大学生足球专项运动员为受试,运用红外光点运动捕捉系统(Nokov Mars2H)获得运动学数据。受试佩戴心率实时监测遥测仪(Polar Team 2),用于保障实验的安全性和疲劳评价的有效性与客观性。运用2×2重复测量设计的双因素方差分析验证2种动作下疲劳诱导和疲劳方案对运动特征的影响。结果:受试完成的2种疲劳方案均达到疲劳评定标准,心率和自感疲劳等级均无显著性差异。单脚落地起跳动作着地时刻,髋关节内外旋角 $[F_{(1,6)}=7.811, P=0.031, r=0.752]$ 和膝关节内外翻角 $[F_{(1,6)}=6.976, P=0.038, r=0.733]$ 对疲劳方案及疲劳诱导具有显著性交互作用。与SAFT<sup>90</sup>疲劳诱导前相比,诱导后髋关节矢状面活动度增加(13.6° vs 18.5°,  $P=0.022, r=0.783$ )、髋关节内旋(-5.9° vs 2.6°,  $P=0.019, r=0.793$ )、膝关节外翻(2.1° vs -1.5°,  $P=0.001, r=0.928$ )、外旋(-12.8° vs -20.3°,  $P<0.001, r=0.968$ )增加。侧切着地时刻膝关节屈曲角 $[F_{(1,6)}=14.164, P=0.009, r=0.838]$ 和膝关节内外翻角 $[F_{(1,6)}=17.679, P=0.006, r=0.864]$ 在疲劳方案及疲劳诱导间存在显著性交互作用。SAFT<sup>90</sup>疲劳诱导后侧切时更趋于足跟着地(-3.8 cm vs -6.9 cm,  $P=0.031, r=0.753$ )。结论:足球运动员疲劳诱导后完成动作的着地策略与疲劳前不同,特别是SAFT<sup>90</sup>运动性疲劳诱导后,其单脚落地跳着地时刻髋关节内旋、膝关节外翻、外旋显著增加;急停侧切着地时刻,膝关节更加直立、外翻,同时趋于足跟着地,可能增加疲劳后前交叉韧带损伤风险。完成Yo-Yo IE2运动性疲劳诱导后,足球运动员急停侧切时膝关节外翻角度增加,且SAFT<sup>90</sup>较Yo-Yo IE2运动性疲劳诱导方案对足球运动员的影响更大。提示,采用SAFT<sup>90</sup>作为足球运动性疲劳诱导方案,对于理解下肢疲劳后的神经肌肉控制可能更有参考价值。

**关键词:**运动性疲劳;跳箱单脚落地起跳;急停侧切;运动学

**Abstract:** Objective: The study was to compare the effects of different fatigue protocols (soccer-specific aerobic fitness test, SAFT<sup>90</sup>) and (Yo-Yo intermittent endurance level 2 test, Yo-Yo IE2) for collegiate soccer players on neuromuscular control at the time of contacting with ground. Methods: The study recruited 7 collegiate soccer players. The kinematics data were collected by infrared motion capture system (Nokov Mars2h, China). Subjects wore real-time heart rate monitoring telemeter (Polar Team 2, Finland) to ensure the safety of the experiment and the effectiveness and objectivity of fatigue evaluation. 2×2 repeated designed two-way ANOVA was used to identify the influence of pre-post fatigue and protocols on kinematics of soccer players. Results: The two exercise-induced fatigue protocols satisfied fatigue criterion, and there were no significant differences on heart rate and session rating of perceived exertion. Hip internal-external rotation angle  $[F_{(1,6)}=7.811, P=0.031, r=0.752]$  and knee varus and valgus angle  $[F_{(1,6)}=6.976, P=0.038, r=0.733]$  had significant interaction effect on fatigue protocols and fatigue induction. Compared with SAFT<sup>90</sup> protocol pre-test, there were significant increase for hip sagittal range of motion (13.6° vs 18.5°,  $P=0.022, r=0.783$ ), hip internal rotation (-5.9° vs 2.6°,  $P=0.019, r=$

### 基金项目:

国家自然科学基金项目(30870600);教育部人文社会科学研究规划基金项目(18YJA890034);山西省回国留学人员科研资助项目(2020-032);山西省高等学校哲学社会科学项目(2019W025);国家级大学生创新创业训练计划(202010112017);太原理工大学学科建设经费

### \*通信作者简介:

张美珍(1983-),女,教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为运动生物力学,E-mail: meizhen1116@163.com。

### 作者单位:

1. 太原理工大学,山西太原030024;  
2. 北京体育大学,北京100084  
1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Beijing Sport University, Beijing 100084, China.

0.793), knee valgus angle ( $2.1^\circ$  vs  $-1.5^\circ$ ,  $P=0.001$ ,  $r=0.928$ ), knee external rotation ( $-12.8^\circ$  vs  $-20.3^\circ$ ,  $P<0.001$ ,  $r=0.968$ ). The knee flexion angle [ $F_{(1,6)}=14.164$ ,  $P=0.009$ ,  $r=0.838$ ] and the valgus angle [ $F_{(1,6)}=17.679$ ,  $P=0.006$ ,  $r=0.864$ ] had significant interaction on fatigue protocols and pre-post tests during side-cutting. The soccer players were more likely to landing by heel at SAFT<sup>90</sup> protocol post-test during side-cutting ( $-3.8$  cm vs  $-6.9$  cm,  $P=0.031$ ,  $r=0.753$ ). Conclusions: The different landing strategies of trunk and lower extremity kinematics in post-fatigue were observed for soccer players compared with pre-test, especially for SAFT<sup>90</sup> protocols, including larger hip internal rotation, knee valgus angle and knee external rotation during single-leg drop jump; while during side-cutting, knee joint more upright, larger knee valgus angle and prone to landing by heel demonstrated, these factors may increase the risk of anterior cruciate ligament injury after fatigue. The larger knee valgus angle were found pre-post Yo-Yo IE2 exercise-induced fatigue. SAFT<sup>90</sup> fatigue protocols impacted greater than Yo-Yo IE2 for soccer players, which suggests that SAFT<sup>90</sup> as soccer-specific fatigue protocol may be more valuable for understanding neuromuscular control of exercise fatigue.

**Keywords:** exercise-induced fatigue; single-leg drop jump; stop side-cutting; kinematics

**中图分类号:**G843 **文献标识码:**A

前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)断裂是足球运动员的高发损伤。每1 000 h的比赛运动时长即可发生0.06~3.70例足球运动员ACL损伤病例(Faunø et al., 2006)。特别是当运动员完成快速着地、转体、起跳或者变向动作时(Agel et al., 2016; Johnston et al., 2018),更易发生该损伤。ACL损伤危险因素繁杂已形成共识,是由多种可改变和不可改变的危险因素共同作用的结果。不可改变因素中,如关节松弛、优势侧、人造运动表面等都会增加ACL损伤风险(Hewett et al., 2010)。生物力学神经肌肉控制作为可改变因素已成为研究重点,有研究认为,着地时刻膝关节趋于直立、地面反作用力大、足跟着地等是ACL损伤的危险因素(De Ste Croix et al., 2015; Yang et al., 2018; Yu et al., 2006)。神经肌肉疲劳作为一个潜在的、可改变的ACL损伤危险因素近年来备受关注(张希妮等, 2017; Benjaminse et al., 2019; Lessi et al., 2017)。

目前,有研究分析了疲劳对ACL损伤高危人群下肢运动学、动力学和肌肉用力等的急性影响(Barber-Westin et al., 2017)。神经肌肉疲劳可以导致膝关节肌肉力量急剧下降、下肢肌肉活动模式改变(Greig, 2008)、下肢各关节活动度增加、伸膝力矩增加、伸髋肌群能量吸收增加等(张希妮等, 2017)。疲劳诱导后髋关节和膝关节屈曲增加,踝关节跖屈减小(Benjaminse et al., 2008; Cortes et al., 2014b),在着地或侧切过程中地面反作用力增加(Kernozek et al., 2008)等。过度的动态膝关节外翻、躯干控制不理想(即侧屈)(Kristianslund et al., 2014)、过度背屈(Donnelly et al., 2012)等可能增加ACL损伤危险性。疲劳引起腘绳肌机械延迟(electromechanical delay, EMD)明显增加,损害了神经肌肉反馈机制,从而降低膝关节稳定性(De Ste Croix et al., 2015)。但也有研究认为,运动员疲劳后可能跑动速度更慢,因此地面反作用力、膝关节力矩更小,这似乎在一定程度上能够避免产生ACL损伤(Brazen et al., 2010)。研究结果间存在差异的可能原因

是不同研究中疲劳方案的诱导和测量存在较大的异质性(Bourne et al., 2019),不同疲劳诱导方案对实验结果具有影响(刘海瑞等, 2014)。

目前,疲劳诱导方案分为短时疲劳诱导方案和长时疲劳诱导方案。短时疲劳诱导方案主要针对特定某肌肉或区域,包括动态的下肢运动(如垂直跳跃加短跑冲刺、连续单腿蹲起或双腿蹲起加快速起跳)(Liederbach et al., 2014; Madigan et al., 2003)、膝关节伸肌和屈肌的独立运动(Thomas et al., 2010)等。此类疲劳模式持续时间通常低于10 min。长时疲劳方案包括多维度运动(如下蹲和灵敏性动作)(Brazen et al., 2010)、功率自行车运动(Ortiz et al., 2010)、间歇性(Ros et al., 2013)或长时间跑步(Cortes et al., 2014b)等。该类疲劳通常长约30 min或更长时间。短时或单一动作重复是疲劳诱导的主要手段,而长时疲劳方案可能忽略了疲劳诱导的运动项目专项性,因此实验结果存在一定的局限性(刘海瑞等, 2014)。如何选择合适且有效的专项性疲劳诱导方案是运动性疲劳研究的重点和难点。

针对足球运动员的短时疲劳方案主要包括Yo-Yo间歇耐力水平2测试(Yo-Yo intermittent endurance level 2 test, Yo-Yo IE2)(Krustrup et al., 2010; Ros et al., 2013)和灵敏素质短时疲劳方案(functional agility short-term fatigue protocol, FAST-FP)(Cortes et al., 2014a)。长时疲劳方案有模拟45~60 min足球比赛(Savage et al., 2018; Yamada et al., 2012)的专项疲劳方案,模拟90 min足球竞赛强度的足球专项体能测试(soccer-specific aerobic fitness test, SAFT<sup>90</sup>)(Lovell et al., 2008),以及拉夫堡间歇性折返跑测试(loughborough intermittent shuttle test, LIST)(Nicholas et al., 2000)等。基于此,本研究分析足球运动员单脚落地起跳和急停侧切时疲劳方案与疲劳诱导对躯干和下肢运动学的影响。

本研究选择了2种疲劳方案:一种是被广泛用于评价足球运动员耐力素质且作为短时诱导方案的Yo-Yo IE2,

另一种是能够准确模拟足球比赛且可操作性强的 SAFT<sup>90</sup> 疲劳方案。这 2 种方案均具有足球项目的专项性,但疲劳完成时间和动作设计又有差异。根据现有研究文献和本研究目的,拟验证 2 个假设:1) 疲劳会改变足球运动员完成动作的运动学特征;2) SAFT<sup>90</sup> 诱导方案对足球运动员躯干和下肢运动学特征的影响比 Yo-Yo IE2 更大。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究受试者为 7 名体育学院足球专项男性大学生(表 1)。所有受试者训练年限均在 2 年以上,且无 ACL 损伤或其他急性下肢损伤史,无心血管或呼吸系统疾患,测试前 24 h 内未从事剧烈运动,在数据采集前签署了知情同意书。由于本实验采用的是重复测量设计,疲劳方案和疲劳诱导 2 个自变量均为重复变量,通过 G\*Power 3.1.9.6 软件,选择检验方法 ANOVA (repeated measure, between factors),并将效应值 (effect size, ES) 设置为  $r=0.6$ ,一类误差概率 ( $\alpha$ ) 为 0.05,统计功效 (statistical power,  $1-\beta$ ) 为 0.8,计算得出样本含量为 7,因此本研究样本含量满足统计分析需求。

表 1 研究对象基本信息

Table 1 Basic Information of Participants <i>M</i> ± <i>SD</i>				
人数	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	训练年限/年
7	20.6±0.8	177.0±1.6	66.3±4.0	2.1±1.0

### 1.2 数据采集

要求受试者穿着自备运动鞋和实验室统一配备的紧身上衣与短裤。受试者准备活动完成后,根据改良的 Helen Hayes 模型为其粘贴 23 个反光标志球,粘贴方案参照 Yu 等 (2006) 的方法。选取足球运动员 ACL 损伤高危动作——跳箱单脚落地起跳 (single-leg drop jump, SLDJ) (Teng et al., 2017) 和急停 45° 侧切 (side-cutting) 进行测试。单脚落地跳要求受试者在 35 cm 高跳箱上双手叉腰,以踢球侧腿为支撑腿,脚尖朝前,听到“开始”口令后,脚尖缓慢由跳箱边缘无垂直初速下落,落地后自然屈膝,迅速尽力垂直起跳并双脚落地 (图 1a)。45° 侧切动作方案参照刘卉等 (2011)、张美珍等 (2016) 的方法 (图 1b)。运用红外光点运动捕捉系统 (Nokov Mars2H) 以 200 Hz 的采集频率获得受试者运动学数据,每名受试者每个动作均采集 3 次有效数据。测试过程中,受试者佩戴心率实时监测遥测仪 (Polar Team<sup>2</sup>) 对心率进行监控,用于保障实验的安全性和疲劳评价的有效性与客观性。

### 1.3 疲劳方案

#### 1.3.1 足球专项体能测试疲劳方案——SAFT<sup>90</sup>

SAFT<sup>90</sup> 方案为间歇性的 20 m 折返跑,包括功能性动作交替和向前运动阶段,运动形式包括不同速度的向前跑、侧向滑步、侧向变向、后退等,由 15 min 音频口令重复

6 次,总时长为 90 min (图 2)。受试者需完成 10.78 km 运动,运动过程中共出现 1 269 次速度变化和 1 350 次方向变化,较真实地模拟了足球比赛中的间歇性和多向性。该方案已被证明可以反映竞争性足球比赛的外部 and 内部负荷 (Lovell et al., 2008)。



图 1 受试者测试动作示意图

Figure 1. Testing Maneuvers of Participants

注:a.单脚落地起跳;b.侧切。

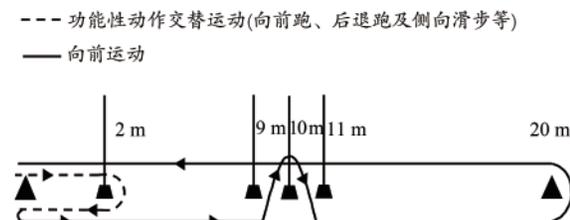


图 2 SAFT<sup>90</sup> 测试示意图 (Lovell et al., 2008)

Figure 2. Schematic Representation of the SAFT<sup>90</sup> Test (Lovell et al., 2008)

#### 1.3.2 足球间歇耐力疲劳测试方案——Yo-Yo IE2

Yo-Yo IE2 方案为运动速度逐渐递增的间歇性 20 m 折返跑,受试者每完成一次折返跑均有 5 s 休息时间 (图 3)。受试者根据音频指令完成折返,每次往返时双脚均需踏线。如第 1 次未完成该强度下的踏线任务,对其进行口头警告。第 2 次未能完成踏线则测试结束,此时完成的总距离为测试成绩。该测试最初用于评价足球、篮球、排球等运动员的耐力水平,是一种便捷、可靠且敏感的测试方案 (Bradley et al., 2011; Papanikolaou et al., 2019),还可作为足球运动员的一般性疲劳诱导方案 (Krustrup et al., 2010; Ros et al., 2013)。



图 3 Yo-Yo 间歇耐力测试水平 2 测试示意图

Figure 3. Schematic Representation of the Yo-Yo IE2 Test

#### 1.4 疲劳判定条件

测试过程中,随机确定2种疲劳方案(SAFT<sup>90</sup>/ Yo-Yo IE2)诱导足球运动员的顺序,保证2次疲劳测试间隔1周及以上,确保疲劳效应已消除且互不影响。在受试者接受疲劳诱导过程中,通过自感疲劳等级(rating of perceived exertion, RPE)量表和心率指标进行疲劳程度的判定。判定疲劳条件为符合以下2条中任意1条即可:1)心率达到预期最大心率(220-年龄)的85%以上(Cortes et al., 2012);2)RPE达到17级(很费力)以上(Borotikar et al., 2008)。

#### 1.5 数据处理

运用Cortex-64 5.5.0解析软件对受试者三维运动学数据进行Butterworth低通滤波(截断频率为13 Hz)平滑处理(Yu et al., 1999),根据粘贴在体表的反光标志点建立人体环节多刚体模型。由于受试者运动方向一致,可将躯干角度定义为躯干坐标系与大地坐标系之间的欧拉角(Lessi et al., 2017),通过骨盆坐标系和大腿坐标系之间的欧拉角确定下肢髋关节三维角度,膝关节的三维角度定义为大腿坐标系和小腿坐标系之间的欧拉角,第1次转动围绕X轴获得屈伸角(正角为屈曲和躯干前倾),第2次转动围绕Y轴获得内收外展角(正角为内收和躯干对侧倾斜,其中对侧为非优势侧方向),第3次转动围绕Z轴获得内旋外旋角(正角为内旋和躯干向对侧前旋)。躯干、髋关节、膝关节矢状面活动度定义为着地阶段各关节最大与最小屈伸角度的差值。着地方式定义为足跟与足尖(第1和第5脚趾关节连线中点确定)垂直轴(Z轴)坐标值的差值,负值表明趋于足跟着地,正值表示足尖着地。有研究表明,ACL损伤多发生在着地时刻(Lessi et al., 2017; McLean et al., 2009),本研究将着地腿足尖或足跟垂直速度为0 m/s时作为着地时刻(Lessi et al., 2017)。

#### 1.6 统计分析

应用SPSS 22.0软件,对不同动作进行2×2重复设计的双因素方差分析,检验疲劳诱导(前vs后)和疲劳方案(SAFT<sup>90</sup> vs Yo-Yo IE2)对运动学指标的影响。若两因素间存在显著性交互作用,通过配对样本 $t$ 检验分别比较疲劳诱导或疲劳方案间运动学参数是否具有显著性差异,主效应差异采用bonferroni校正,统计分析的显著性标准定为一类误差概率不大于0.05。通过计算给出双因素方差分析和配对样本 $t$ 检验的效应量 $r$ ,其中 $0.1 \leq r < 0.3$ 为低效应量, $0.3 \leq r < 0.5$ 为中等效应量, $r \geq 0.5$ 为高效应量。

## 2 研究结果

### 2.1 不同疲劳诱导方案结果比较

足球运动员完成SAFT<sup>90</sup>方案用时90 min,跑动距离为10.78 km; Yo-Yo IE2测试用时(11.5±1.3) min,完成等级为16级第2次口令,运动距离为(1.80±0.23) km。

足球运动员完成SAFT<sup>90</sup>方案时,上半场(0~45 min)平均心率为(181±6)次/min,下半场(60~105 min)平均心率达到(177±4)次/min,最高心率达到(185.0±8.2)次/min。受试者进行Yo-Yo IE2疲劳测试时,运动过程中平均心率为(178.0±9.7)次/min,最高达到(187.0±10.5)次/min。SAFT<sup>90</sup>和Yo-Yo IE2疲劳性运动诱导前,心率分别为(125±11)次/min和(115±7)次/min, RPE量表等级达到11.5±1.0和11.3±1.4,配对样本 $t$ 检验显示均无显著性差异。SAFT<sup>90</sup>和Yo-Yo IE2疲劳性运动诱导后,测试疲劳后的心率分别为(177.3±6.2)次/min和(179.5±7.1)次/min,疲劳方案间心率无显著性差异(图4)。RPE量表等级为17.8±1.2和18.5±1.0,疲劳方案间RPE差异亦未达到显著性水平。2种疲劳方案中,受试者心率均达到疲劳判定原则最大心率的85%(170次/min)以上,RPE均达到疲劳判定标准17级以上,说明本研究中2种运动疲劳诱导方案强度相似。

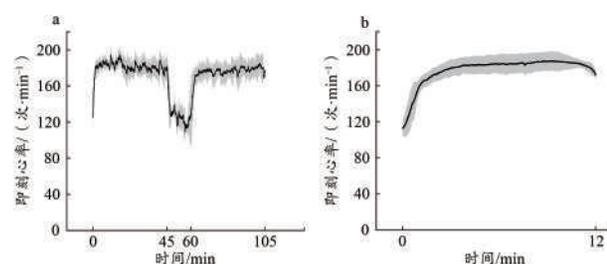


图4 不同运动性疲劳诱导方案实时心率

Figure 4. Real-Time Heart Rate for Different Exercise-Induced Fatigue Protocols

注:a. SAFT90诱导方案;b. Yo-Yo IE2诱导方案

### 2.2 不同运动性疲劳方案对躯干和下肢运动学特征的影响

#### 2.2.1 单脚落地起跳动作下疲劳方案及疲劳诱导运动学特征变化

双因素方差结果表明,与疲劳诱导前相比,诱导后躯干前倾角( $P=0.049$ ,  $r=0.708$ )显著减小,若单独分析2个疲劳诱导方案,这种差异性则不存在(图5)。双因素方差结果显示,疲劳方案和疲劳诱导对跳箱单脚落地起跳动作髋关节内外旋角[ $F_{(1,6)}=7.811$ ,  $P=0.031$ ,  $r=0.752$ ]有显著性交互影响。 $t$ 检验发现,SAFT<sup>90</sup>疲劳前髋关节表现为外旋,疲劳后为内旋姿势( $P=0.019$ ,  $r=0.793$ ); SAFT<sup>90</sup>疲劳诱导后髋关节内旋,而Yo-Yo IE2疲劳诱导后髋关节外旋( $P=0.019$ ,  $r=0.794$ )。此外,诱导后膝关节屈曲角( $P=0.048$ ,  $r=0.711$ )显著减小。与SAFT<sup>90</sup>疲劳诱导前膝关节内翻角度相比,疲劳诱导后调整为外翻( $P=0.001$ ,  $r=0.928$ ),膝关节外旋角( $P<0.001$ ,  $r=0.968$ )显著增大,髋关节矢状面活动度显著增大( $P=0.022$ ,  $r=0.783$ ;表2)。上述参数在疲劳诱导或疲劳方案间显著性差异的效应量均达到0.7以上,对总差异的解释程度约为50%。

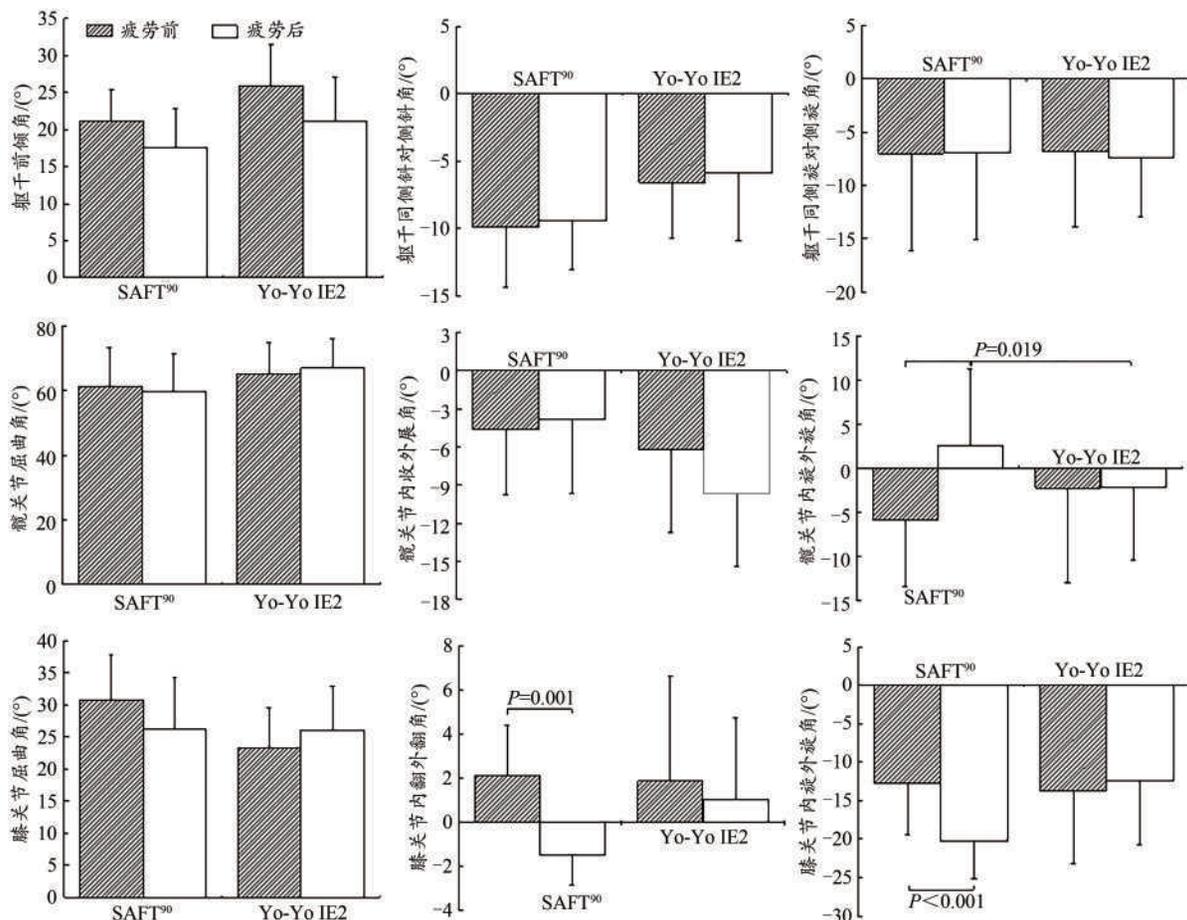


图5 单脚落地起跳动作下疲劳方案及疲劳诱导对运动学特征的影响

Figure 5. Effect of Fatigue Protocols and Pre-post Tests on Kinematics during Single-Leg Drop Jump

表2 单脚落地起跳时疲劳方案及疲劳诱导对关节活动度及着地方式的影响

Table 2 Effect of Fatigue Protocols and Pre-post Tests on Joint ROM and Landing Style during Single-Leg Drop Jump

参数	SAFT <sup>90</sup>		Yo-Yo IE2	
	疲劳前	疲劳后	疲劳前	疲劳后
躯干矢状面活动度/(°)	12.3±13.7	15.7±12.1	8.8±6.2	12.7±10.7
髋关节矢状面活动度/(°)	13.6±17.1	18.5±14.0 <sup>a</sup>	12.9±6.7	14.5±8.6
膝关节矢状面活动度/(°)	43.6±11.0	47.9±8.9	44.7±12.2	46.5±6.4
足跟(-)/足尖(+)着地/m	2.0±4.6	-1.3±5.9	4.6±12.9	2.9±9.9

注:a表示疲劳测试前后具有显著性差异(P<0.05)。

### 2.2.2 急停侧切动作下不同疲劳方案及疲劳诱导运动学特征的变化

双因素方差分析显示,相比SAFT<sup>90</sup>方案,Yo-Yo IE2疲劳诱导后,被试躯干向同侧(优势侧)侧斜程度更大(P=0.048, r=0.729);侧切动作着地时刻膝关节屈曲角[F<sub>(1,6)</sub>=14.164, P=0.009, r=0.838]、膝关节内外翻角[F<sub>(1,6)</sub>=17.679, P=0.006, r=0.864]在2种运动性疲劳方案及疲劳诱导前后存在显著性交互作用。t检验发现,膝关节屈曲角在SAFT<sup>90</sup>疲劳诱导后显著减小(P=0.046, r=0.717),膝关节内外翻角由疲劳诱导前的内翻调整为外翻姿势,且疲劳前后具有显著性差异;Yo-Yo IE2(P=0.013, r=0.819)疲劳诱导前后均为膝关节内翻,但疲劳后内翻程度显著减小(图6)。与诱导前相

比,SAFT<sup>90</sup>疲劳诱导后,被试更趋于足跟着地(P=0.031, r=0.753;表3)。运动学特征在疲劳诱导或疲劳方案间显著性差异效应量均达到0.7以上,对总差异的解释程度达到49%。

## 3 讨论

本研究支持假设1:足球运动员在疲劳诱导后完成动作的运动学特征与疲劳前不同,单脚落地跳和急停侧切动作的差异有所不同。同时亦支持假设2:SAFT<sup>90</sup>诱导方案对足球运动躯干和下肢运动学特征的影响比Yo-Yo IE2的影响更大。

### 3.1 跳箱落地起跳动作疲劳方案和疲劳诱导对运动学特征的影响

本研究显示,当足球运动员完成跳箱落地起跳时,在跳箱落地着地时刻,若不区分诱导方案,表现出疲劳后躯干前倾角减小、膝关节屈曲角度减小的特征。有研究证实,完成蹲起(squat)的下降阶段时躯干较为直立,会增加对股四头肌的需求,以保持对重心的控制,从而可能导致ACL损伤风险增加(Griffin et al., 2000)。有研究表明,膝关节屈曲角越小( $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ),ACL损伤危险越大(刘卉等, 2011; 张美珍等, 2017; Yu et al., 2005)。如果受试者躯干前倾,垂直地面反作用力矢量会远离髌关节中心,从而增加对髌伸肌的需

求,减少对膝伸肌的需求,落地时髌关节和膝关节屈曲角度会增加(Powers, 2010),反之亦然(Blackburn et al., 2008)。本研究表明,疲劳后躯干前倾减小( $23.4^{\circ}$  vs  $19.3^{\circ}$ )、膝关节屈曲角度减小( $29.7^{\circ}$  vs  $26.2^{\circ}$ ),在一定程度上与Power (2010)、Griffin(2000)的研究结论一致。足球运动员采用较直立姿势的一个原因可能是其在落地时刻缺乏控制重心向前位移的髌伸肌力量不得不依赖股四头肌,使得膝关节屈曲角度减小,增大ACL损伤风险(Powers, 2010)。

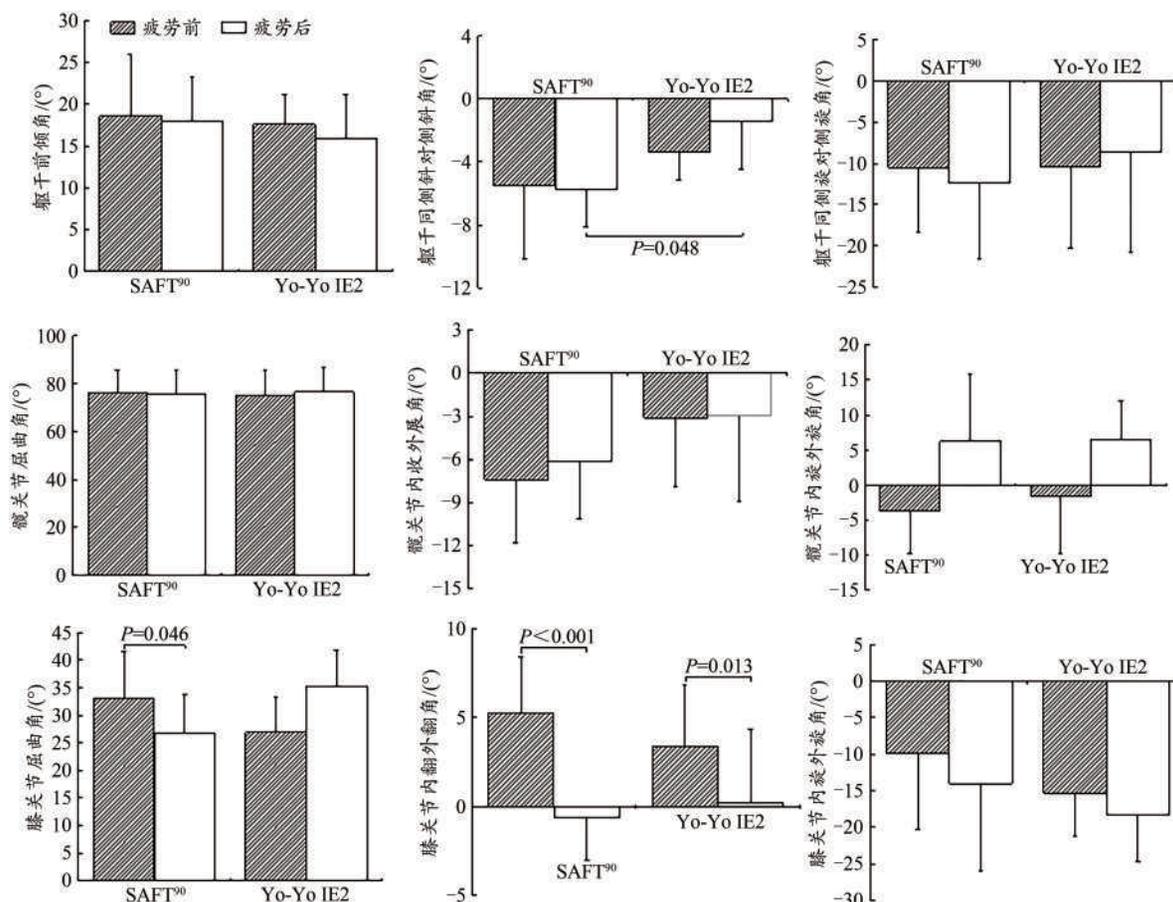


图6 急停侧切动作下疲劳方案及疲劳诱导对运动学特征的影响

Figure 6. Effect of Fatigue Protocols and Pre-post Tests on Kinematics during Side-Cutting

表3 急停侧切时疲劳方案及疲劳诱导对关节活动度及着地方式的影响

Table 3 The Effect of Fatigue and Pre-post Tests on Joint ROM and Landing Style during Side-Cutting

参数	SAFT <sup>90</sup>		YO-YO IE2	
	疲劳前	疲劳后	疲劳前	疲劳后
躯干矢状面活动度/( $^{\circ}$ )	7.4±3.5	6.4±7.1	5.0±1.4	4.7±3.5
髌关节矢状面活动度/( $^{\circ}$ )	-9.7±9.0	-11.7±5.5	-10.7±3.3	-10.3±3.5
膝关节矢状面活动度/( $^{\circ}$ )	33.5±7.5	34.8±10.4	28.0±7.2	21.5±7.2
足跟(-)/足尖(+ )着地/m	-3.8±4.8	-6.9±2.7 <sup>a</sup>	-4.0±3.9	-4.4±4.2

注:a表示疲劳诱导前后具有显著性差异( $P<0.05$ )。

本研究发现,疲劳方案对髌关节的屈曲角和内外翻角无显著性影响,然而对髌关节内旋外旋角具有显著性交互作用,进一步得出该指标由SAFT<sup>90</sup>运动性疲劳诱导

前的外旋变化为疲劳诱导后的内旋,且具有显著性差异,统计结果的效应量达到64%,在一定程度上支持Thomas等(2010)的研究。着地时刻髌关节内旋姿势会导致膝外翻

负荷增加,进而增加 ACL 损伤风险 (McLean et al., 2009)。本研究显示,SAFT<sup>90</sup> 运动性疲劳后髌关节内旋角度显著增加,而 Yo-Yo IE2 疲劳诱导后髌关节依然表现为外旋趋势,2 个疲劳方案间具有显著性差异,且占总差异的 81%,一定程度上说明 SAFT<sup>90</sup> 比 Yo-Yo IE2 疲劳诱导方案更容易引起髌关节内旋,增加损伤风险。此外,SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导前后髌关节矢状面活动度具有显著性差异,该结果与张希妮等 (2017) 研究类似,但关节活动度数值低于该研究 (48.5°~58.6°),与 Madigan 等 (2003) 研究的 10° 较为接近。这主要与测试动作有关:前者要求受试者进行双脚落地跳动作,而后者与本研究类似,均以单脚落地跳为测试动作。关节矢状面活动度的增加是否会造成 ACL 损伤尚存争议。有研究认为,活动度增加是下肢关节的自我保护动作,有利于着地时刻能量缓冲或降低地面反作用力 (Kernozek et al., 2008)。还有研究认为,活动度增加不利于躯干肌肉离心收缩后快速转变为向心收缩,继而会增大股四头肌的收缩水平,引起 ACL 损伤风险增加 (邹晓峰等, 2009)。本研究中,足球运动员在 SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导后单脚落地时对平衡的需求更大,可能通过增加髌关节活动度 (13.6° vs 18.5°) 降低膝关节外翻、外旋引起的 ACL 损伤风险,利用髌关节屈曲肌群的补偿性反应吸收撞击的能量。不同关节着地策略的调整和重新分配对 ACL 应力的影响机制还有待进一步研究。

本研究发现,足球运动员 SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导后膝关节表现外翻和外旋姿势,且与疲劳前具有显著性差异,均有 50% 以上的可靠性说明总体差异。该结果支持 Wright 等 (2017) 对女性足球运动员 SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导的研究。还有研究认为,在单腿垂直起跳和单腿落地时,疲劳对膝外翻角没有影响 (Benjaminse et al., 2008; Kernozek et al., 2008; Lessi et al., 2017; Liederbach et al., 2014),这与本研究结果不一致。主要原因是这些研究中采用的疲劳诱导方案均为重复性动作,如连续蹲起、跨步加快速起跳等,而 SAFT<sup>90</sup> 测试是模拟比赛强度的长时间疲劳诱导方案,其运动形式除了向前运动外,还包括侧向滑步和变向跑等,可能对额状面神经肌肉控制疲劳诱导影响较深,所以对膝关节额状面运动特征产生较显著的变化。流行病学和实验研究显示,膝关节外翻角是 ACL 损伤的危险因素,特别是当膝关节屈曲角度较小时 (Boden et al., 2000; Teng et al., 2017)。Boden 等 (2010) 研究表明,膝关节外翻以及下肢较大的地面反作用力会导致胫骨的内外旋,极易出现 ACL 损伤。

因此,足球运动员完成 SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导后进行跳箱单脚落地跳动作,躯干趋于直立,髌关节内旋角度和活动度增加,膝关节屈曲角度表现为减小的趋势,同时伴有外翻和外旋增加,这些特征的变化可能增加 ACL 损伤风险。Yo-Yo IE2 疲劳诱导对足球运动员躯干和下肢运动学特征的影响未达到显著性差异。2 个疲劳方案间运动学的差

异仅在疲劳诱导后,SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导髌关节内旋角与 Yo-Yo IE2 疲劳诱导髌关节外旋角具有显著性差异,髌关节内旋增加会引起 ACL 负荷增加。

### 3.2 急停侧切疲劳方案和疲劳诱导对运动学特征的影响

2 种疲劳诱导方案对足球运动员急停侧切运动学特征的影响,主要集中于膝关节和足的着地方式。本研究显示,SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导后进行急停侧切时,在着地时刻膝关节屈曲角度显著减小,膝关节由内翻调整为外翻,其差异效应均占总体变异的 64% 以上。在一定程度上与 Benjaminse 等 (2019) 的研究结果一致。已有研究证实,ACL 和内侧副韧带 (medial collateral ligament, MCL) 能够对抗膝关节外翻,且 MCL 是对外翻的主要结构。因此,虽然膝关节外翻会增加 ACL 负荷,但单独的膝关节外翻不能造成 MCL 和 ACL 同时损伤 (Boden et al., 2010)。通过有限元模拟不同膝关节屈曲角度下外翻加内旋力矩联合载荷,ACL 应力较单独外翻时增大,且随膝关节屈曲角度的减小而增加,提示,ACL 具有同时限制膝外翻和胫骨向前的作用 (何川等, 2015)。另外,足球运动员 SAFT<sup>90</sup> 疲劳诱导后着地时刻更趋于足跟着地方式,该效应约有 50% 的可靠性解释总方差。足跟着地时会增加膝关节外部弯曲力矩,这时需要膝关节内部伸展力矩和股四头肌肌力增加,引起 ACL 受力增大 (Burkhart et al., 2008)。Yo-Yo IE2 疲劳诱导后,足球运动员急停侧切着地时刻膝关节内翻角显著性下降,可能增加 ACL 损伤风险 (Lin et al., 2009)。

本研究还发现,2 种疲劳诱导方案对足球运动员急停侧切着地时刻躯干侧向运动有显著性差异。由于着地时刻产生 45° 变向运动,受试者在 Yo-Yo IE2 疲劳诱导后向同侧 (优势侧) 倾斜程度显著减小。有研究认为,着地时刻躯干同侧倾斜角越大,地面反作用力分量相对于膝关节中心横向通过,使膝关节外翻力矩增大,ACL 负荷增加 (Kristianslund et al., 2014; Powers, 2010)。

本研究发现,疲劳诱导对足球运动员侧切动作的影响主要体现在膝关节运动学特征方面。与 Yo-Yo IE2 疲劳诱导相比,SAFT<sup>90</sup> 疲劳运动方案的影响更大,后者还会引起受试者倾向于足跟着地,增加 ACL 损伤可能性。

本研究局限:1) 仅采集了足球运动员运动学特征参数,并未采集动力学和肌电数据,对于全面理解疲劳后足球运动员的神经肌肉控制情况略显不足;2) 对足球运动员动作的采集均是在可预期的条件下进行的,而在足球训练或比赛场上非预期状况较多,对于可预见性的运动,机体有充足的时间给予神经肌肉系统对预先得知的动作采取对应的策略,因此后续研究中可以考虑设计处于不同预期状态的动作以对比分析不同疲劳方案的影响;3) 仅采集了心率以及 RPE 等级,未加入身体柔韧性、力量素质、反应时间、动作控制等与神经肌肉控制有关的指标,未来研究中将综合考虑这些因素,建立损伤-动作-能力的关系,确

定可实施干预并预防损伤的因素。

#### 4 结论

足球运动员疲劳诱导后完成动作的运动学特征与疲劳前不同,特别是SAFT<sup>90</sup>运动性疲劳诱导后,其单脚落地跳着地时刻髌关节内旋、膝关节外翻、外旋显著增加;在急停侧切着地时刻,膝关节更加直立、外翻,同时趋于足跟着地。这些因素可能增加疲劳后ACL损伤风险。完成Yo-Yo IE2运动性疲劳诱导后,足球运动员急停侧切时刻膝关节外翻角度增加。此外,2种疲劳诱导方案存在差异,SAFT<sup>90</sup>较Yo-Yo IE2运动性疲劳诱导方案对足球运动员ACL损伤风险影响更大。提示,不同疲劳诱导方案的运动干预模式有所区别,本研究中SAFT<sup>90</sup>疲劳方案是在矢状面、冠状面以及水平面进行综合性运动,而Yo-Yo IE2主要集中于矢状面进行疲劳诱导。因此,采用SAFT<sup>90</sup>作为足球运动性疲劳诱导方案,对于理解下肢疲劳后的神经肌肉控制可能更有参考价值。

#### 参考文献:

何川,李彦林,张振光,等,2015.不同屈曲状态下膝关节韧带生物力学的有限元分析[J].中国运动医学杂志,34(7):662-669.

刘海瑞,伍颢,吴瑛,2014.疲劳因素影响膝关节前交叉韧带的非接触性损伤生物力学[J].中国组织工程研究,18(7):1101-1108.

刘卉,张美珍,李翰君,等,2011.足球运动员在急停起跳和侧切动作中前交叉韧带损伤的生物力学特征研究[J].体育科学,31(12):38-43.

张美珍,刘德林,孙文文,等,2017.随机生物力学模拟比较不同落地形式对篮球运动员ACL损伤危险性和危险因素的影响[J].天津体育学院学报,32(3):245-251.

张美珍,刘卉,刘万将,等,2016.随机生物力学模型分析篮球运动员和普通大学生ACL损伤危险因素的差异[J].体育科学,36(10):40-47.

张希妮,傅维杰,夏锐,等,2017.不同疲劳诱导方案对落地时下肢关节力学、刚度和能量吸收的影响[J].体育科学,37(11):48-55.

邹晓峰,陈民盛,2009.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,16(7):89-92.

AGEL J, ROCKWOOD T, KLOSSNER D, 2016. Collegiate ACL injury rates across 15 sports: National Collegiate Athletic Association injury surveillance system data update (2004—2005 through 2012—2013)[J]. Clin J Sport Med,26(6):518-523.

BARBER-WESTIN S D, NOYES F R, 2017. Effect of fatigue protocols on lower limb neuromuscular function and implications for anterior cruciate ligament injury prevention training: A systematic review[J]. Am J Sports Med,45(14):3388-3396.

BENJAMINSE A, HABU A, SELL T C, et al., 2008. Fatigue alters lower extremity kinematics during a single-leg stop-jump task [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc,16(4):400-407.

BENJAMINSE A, WEBSTER K E, KIMP A, et al., 2019. Revised approach to the role of fatigue in anterior cruciate ligament injury prevention: A systematic review with meta-analyses [J]. Sports Med,49(4):565-586.

BLACKBURN J T, PADUA D A, 2008. Influence of trunk flexion on hip and knee joint kinematics during a controlled drop landing [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon),23(3):313-319.

BODEN B P, DEAN G S, FEAGIN J J A, et al., 2000. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury [J]. Orthopedics,23(6):573-578.

BODEN B P, SHEEHAN F T, TORG J S, et al., 2010. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: Mechanisms and risk factors [J]. J Am Acad Orthop Surg,18(9):520-527.

BOROTIKAR B S, NEWCOMER R, KOPPEL R, et al., 2008. Combined effects of fatigue and decision making on female lower limb landing postures: Central and peripheral contributions to ACL injury risk [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon),23(1):81-92.

BOURNE M N, WEBSTER K E, HEWETT T E, 2019. Is fatigue a risk factor for anterior cruciate ligament rupture? [J] Sports Med,49(11):1629-1635.

BRADLEY P S, MOHR M, BENDIKSEN M, et al., 2011. Sub-maximal and maximal Yo-Yo intermittent endurance test level 2: Heart rate response, reproducibility and application to elite soccer [J]. Eur J Appl Physiol,111(6):969-978.

BRAZEN D M, TODD M K, AMBEGAONKAR J P, et al., 2010. The effect of fatigue on landing biomechanics in single-leg drop landings [J]. Clin J Sport Med,20(4):286-292.

BURKHART B, FORD K R, MYER G D, et al., 2008. Anterior cruciate ligament tear in an athlete: Does increased heel loading contribute to ACL rupture? [J]. N Am J Sports Phys Ther,3(3):141-144.

CORTES N, GRESKA E, AMBEGAONKAR J P, et al., 2014a. Knee kinematics is altered post-fatigue while performing a crossover task [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc,22(9):2202-2208.

CORTES N, ONATE J, MORRISON S, 2014b. Differential effects of fatigue on movement variability [J]. Gait Posture,39(3):888-893.

CORTES N, QUAMMEN D, LUCCHI S, et al., 2012. A functional agility short-term fatigue protocol changes lower extremity mechanics [J]. J Sports Sci,30(8):797-805.

DE STE CROIX M B, PRIESTLEY A M, LLOYD R S, et al., 2015. ACL injury risk in elite female youth soccer: Changes in neuromuscular control of the knee following soccer-specific fatigue [J]. Scand J Med Sci Sports,25(5):e531-e538.

DONNELLY C J, LLOYD D G, ELLIOTT B C, et al., 2012. Optimizing whole-body kinematics to minimize valgus knee loading during sidestepping: Implications for ACL injury risk [J]. J Bio-mech,45(8):1491-1497.

FAUNØ P, JAKOBSEN B W, 2006. Mechanism of anterior cruciate ligament injuries in soccer [J]. Int J Sports Med,27(1):75-79.

GREIG M, 2008. The influence of soccer-specific fatigue on peak isokinetic torque production of the knee flexors and extensors [J]. Am J Sports Med,36(7):1403-1409.

GRIFFIN L Y, AGEL J, ALBOHM M J, et al., 2000. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: Risk factors and prevention strategies [J]. J Am Acad Orthop Surg,8(3):141-150.

HEWETT T E, FORD K R, HOOGENBOOM B J, et al., 2010. Understanding and preventing acl injuries: Current biomechanical and epidemiologic considerations—update 2010 [J]. N Am J Sports Phys Ther,5(4):234-251.

JOHNSTON J T, MANDELBAUM B R, SCHUB D, et al., 2018.

- Video analysis of anterior cruciate ligament tears in Professional American Football Athletes[J]. *Am J Sports Med*,46(4): 862-868.
- KERNOZEK T W, TORRY M R, IWASAKI M, 2008. Gender differences in lower extremity landing mechanics caused by neuromuscular fatigue[J]. *Am J Sports Med*,36(3): 554-565.
- KRISTIANSLUND E, FAUL O, BAHR R, et al., 2014. Sidestep cutting technique and knee abduction loading: Implications for ACL prevention exercises[J]. *Br J Sports Med*,48(9): 779-783.
- KRUSTRUP P, FAUL O, BAHR R, et al., 2010. Game-induced fatigue patterns in elite female soccer[J]. *J Strength Cond Res*, 24(2): 437-441.
- LESSI G C, DOS SANTOS A F, BATISTA L F, et al., 2017. Effects of fatigue on lower limb, pelvis and trunk kinematics and muscle activation: Gender differences[J]. *J Electromyogr Kinesiol*,32: 9-14.
- LIEDERBACH M, KREMENIC I J, ORISHIMO K F, 2014. Comparison of landing biomechanics between male and female dancers and athletes, part 2: Influence of fatigue and implications for anterior cruciate ligament injury[J]. *Am J Sports Med*, 42(5): 1089-1095.
- LIN C F, GROSS M, JI C, et al., 2009. A stochastic biomechanical model for risk and risk factors of non-contact anterior cruciate ligament injuries[J]. *J Biomech*,42(4): 418-423.
- LOVELL R, BEN K, SMALL K, 2008. Physiological responses to SAFT90: A new soccer-specific match simulation[J]. *Coach Sports Sci*, 3:46-67.
- MADIGAN M L, PIDCOE P E, 2003. Changes in landing biomechanics during a fatiguing landing activity[J]. *J Electromyogr Kinesiol*,13(5): 491-498.
- MCLEAN S G, SAMOREZOV J E, 2009. Fatigue-induced ACL injury risk stems from a degradation in central control [J]. *Med Sci Sports Exer*,41(8): 1661-1672.
- NICHOLAS C W, NUTTALL F E, WILLIAMS C, 2000. The Loughborough Intermittent Shuttle Test: A field test that simulates the activity pattern of soccer[J]. *J Sports Sci*,18(2):97-104.
- ORTIZ A, OLSON S L, ETNYRE B, et al., 2010. Fatigue effects on knee joint stability during two jump tasks in women[J]. *J Strength Cond Res*,24(4): 1019-1027.
- PAPANIKOLAOU K, CHATZINIKOLAOU A, PONTIDIS T, et al., 2019. The Yo-Yo intermittent endurance level 2 test: Reliability of performance scores, physiological responses and overload characteristics in competitive soccer, basketball and volleyball Players[J]. *J Hum Kinet*,67(1): 223-233.
- POWERS C M, 2010. The influence of abnormal hip mechanics on knee injury: A biomechanical perspective[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*,40(2): 42-51.
- ROS A G, HOLM S E, FRIDEN C, et al., 2013. Responsiveness of the one-leg hop test and the square hop test to fatiguing intermittent aerobic work and subsequent recovery [J]. *J Strength Cond Res*, 27(4): 988-994.
- SAVAGE R J, LAY B S, WILLS J A, et al., 2018. Prolonged running increases knee moments in sidestepping and cutting manoeuvres in sport[J]. *J Sci Med Sport*,21(5): 508-512.
- TENG P S P, KONG P W, LEONG K F, 2017. Effects of foot rotation positions on knee valgus during single-leg drop landing: Implications for ACL injury risk reduction[J]. *Knee*,24(3): 547-554.
- THOMAS A C, MCLEAN S G, PALMIERI-SMITH R M, 2010. Quadriceps and hamstrings fatigue alters hip and knee mechanics [J]. *J Appl Biomech*,26(2): 159-170.
- WRIGHT M, CHESTERTON P, WIJNBURGEN M, et al., 2017. The effect of a simulated soccer match on anterior cruciate ligament injury risk factors[J]. *Int J Sports Med*,38(8): 620-626.
- YAMADA R K, ARLIANI G G, ALMEIDA G P, et al., 2012. The effects of one-half of a soccer match on the postural stability and functional capacity of the lower limbs in young soccer players[J]. *Clinics (Sao Paulo)*,67(12): 1361-1364.
- YANG C, YAO W, GARRETT W E, et al., 2018. Effects of an intervention program on lower extremity biomechanics in stop-jump and side-cutting tasks[J]. *Am J Sports Med*,46(12): 3014-3022.
- YU B, GABRIEL D, NOBLE L, et al., 1999. Estimate of the optimum cutoff frequency for the Butterworth Low-pass digital filter [J]. *J Appl Biomech*, 15(3):318-329.
- YU B, LIN C F, GARRETT W E, 2006. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* ,21(3): 297-305.
- YU B, MCCLURE S B, ONATE J A, 2005. Age and gender effects on lower extremity kinematics of youth soccer players in a stop-jump task[J]. *Am J Sports Med*,33(9): 1356-1364.

(收稿日期:2020-03-19; 修订日期:2022-03-17; 编辑:尹航)

