



## 多目标追踪任务下疲劳对足球运动员前交叉韧带损伤风险的影响

### Effects of Fatigue Under Multiple-object Tracking Tasks on the Risk of Anterior Cruciate Ligament Injury of Football Players

任园园,陆阿明\*,王国栋,王文镭,杨海琪,陈一言,刘丹,骆乐

REN Yuanyuan, LU Aming\*, WANG Guodong, WANG Wenlei, YANG Haiqi, CHEN Yiyang, LIU Dan, LUO Le

**摘要:**目的:以3D-MOT任务模拟真实比赛中的动态追踪任务,探究足球运动员在疲劳发展过程中下肢生物力学的渐进性变化及其对非接触性前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤的影响。方法:采用Vicon运动捕捉系统与三维测力台,同步采集15名足球运动员在多目标追踪任务下,由未疲劳、中度疲劳至重度疲劳时完成落地动作的下肢生物力学参数,并应用Visual 3D软件对各项参数进行比较。结果:1)与未疲劳相比,受试者中度疲劳时,膝关节屈曲角度与踝关节跖屈角度增加、膝关节内旋角度及垂直地面反作用力首峰出现的时间减少( $P<0.05$ );达到重度疲劳时,髋关节屈曲角度、膝关节外翻角度、髋关节伸力矩等明显增加,垂直方向、水平方向以及前后方向地面反作用力也明显增加( $P<0.05$ );2)与中度疲劳相比,受试者重度疲劳时髋关节屈曲角度、膝关节屈曲角度及膝关节伸力矩减小,膝关节外翻角度与膝关节内收力矩仍明显增大( $P<0.05$ )。结论:多目标追踪任务下的运动疲劳会引起足球运动员落地缓冲动作发生不利的下肢生物力学变化;随着疲劳程度的加深,足球运动员的着地模式由“软”变“硬”,可增大非接触性ACL损伤风险。

**关键词:** 疲劳;多目标追踪;足球运动员;前交叉韧带损伤;生物力学

**Abstract:** Objective: The 3D-MOT task was used to simulate the dynamic tracking tasks in the real games to explore the gradual change of lower extremity biomechanics and its influence on non-contact anterior cruciate ligament (ACL) injury in the process of fatigue development of football players. Methods: By using Vicon motion capture system and three-dimensional force platform, the lower extremity biomechanical parameters of 15 football players were collected synchronously under the condition of multiple-object tracking tasks, under the condition of non-fatigue, medium fatigue and serious fatigue, and the parameters were compared by inverse dynamics with visual 3D software. Results: 1) Compared with non-fatigue state, the knee flexion angle and ankle plantar flexion angle increased, and knee internal rotation angle and the time for the first peak of vertical ground reaction reduced in medium fatigue. During the serious fatigue, the hip flexion angle, the knee valgus angle and hip extension moment increased, and vertical direction, medial-lateral direction as well as anterior-posterior direction ground reaction force increased significantly ( $P<0.05$ ); 2) compared with medium fatigue, hip flexion angle, knee flexion angle and knee extension moment decreased, and knee valgus angle and knee adduction moment increased significantly ( $P<0.05$ ) during serious fatigue. Conclusion: Fatigue under multiple-object tracking tasks will cause adverse lower limb biomechanical changes in landing buffer action of football players, and with the development of fatigue, the landing mode of football players changes from “soft” to “hard”, which can increase the risk of non-contact ACL injury.

**Keywords:** fatigue; multiple-object tracking; football players; anterior cruciate ligament injury; biomechanics

**中图分类号:**G843 **文献标识码:**A

#### 基金项目:

江苏省产学研合作项目(BY2019022)

#### 第一作者简介:

任园园(1995-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为运动人体科学、运动生物力学,E-mail: 2919535396@qq.com。

#### \*通信作者简介:

陆阿明(1965-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为人体运动控制与生物力学、运动与健康促进,E-mail: luaming@suda.edu.cn。

#### 作者单位:

苏州大学,江苏苏州215021  
Soochow University, Suzhou 215021, China.

近年,关于前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)运动损伤的研究日益增多,运动员 ACL 损伤后可能无法完全恢复正常的膝关节生物力学性能,甚至容易造成膝关节炎、半月板损伤等后遗症,影响运动能力(Filardo et al., 2019; Lien-Iversen et al., 2019)。在足球运动中,ACL 损伤的发生率较高,且有 60.8%~69.6% 属于非接触性损伤(Kobayashi et al., 2010)。研究表明,随着机体疲劳的产生,中枢神经系统和外周肌肉骨骼系统功能逐渐降低(Benjaminse et al., 2019),造成完成动作时膝关节屈曲角度减小、下肢关节力矩增大以及腿的刚度降低等不利的下肢生物力学变化(Chang et al., 2018; Lehnert et al., 2018; Qu et al., 2018)。因而,疲劳是造成非接触性 ACL 损伤的重要因素之一。有研究发现,足球运动员参加日常训练时间远多于比赛时间,但其在比赛中发生 ACL 损伤的概率仍比训练中高出 14.4%(Romeas et al., 2016),说明可能存在其他的机制影响 ACL 损伤。足球比赛中,运动员在发挥自身技能的同时还要时刻关注球、队员和对手的位置(刘洋等, 2018)。将注意力分配到多个运动客体上并对其进行视觉追踪的任务称为多目标追踪范式(multiple-object tracking, MOT),主要研究内容为动态加工能力,涉及注意力加工、工作记忆及视觉空间记忆等大脑认知过程(Alvarez et al., 2005)。目前的研究认为,运动员下肢损伤与 MOT 任务下的注意力加工及神经认知能力有关(Alves et al., 2013; Faubert, 2012; Mejane et al., 2019; Swanik et al., 2016),该动态加工能力与足球运动员的 ACL 损伤之间存在的关联尚待进一步探索。因此,本研究以 3D-MOT 任务范式为前提,探索足球运动员在疲劳发展过程中下肢生物力学的渐进性变化及其对非接触性 ACL 损伤的影响,从而更好地揭示运动性疲劳与动作变化及下肢损伤的关系。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 受试者

受试者均来自某高校高水平足球队,排除各项条件后共有 15 人自愿参与实验[年龄(20.07±1.53)岁,身高(181.43±7.36)cm,体质量(75.37±10.67)kg],其中一级运动员 6 名,二级运动员 9 名。受试者纳入标准:1)近半年内无下肢关节、神经肌肉等疾病或损伤;2)有比赛经历的足球运动员,体能水平相似且达到较优标准;3)测试前 24 h 内无剧烈运动。

### 1.2 仪器设备

#### 1.2.1 Vicon 运动捕捉系统

采用由 8 台红外摄像机组成的三维摄像运动捕捉系统(Vicon Motion Analysis, 英国),配套直径 14 mm 的红外反光球以及 Vicon 系统自带的下肢模型(Plug-in-Gait)进行动作捕捉与采集,采样频率为 100 Hz。

#### 1.2.2 三维测力台

选用 2 块 Kistler 三维测力台(90 cm×60 cm×10 cm, 型号:9287B, 瑞士),分别对 X、Y、Z 轴 3 个方向的力进行检测,采样频率为 1 000 Hz,与 Vicon 红外高速运动捕捉系统实现同步(图 1)。

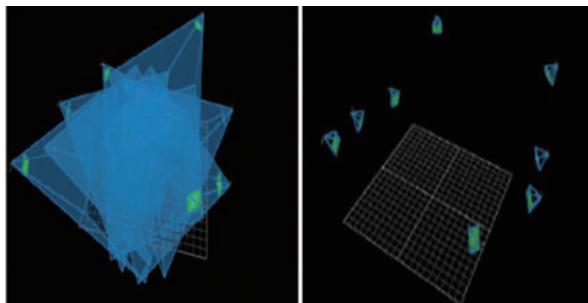


图 1 Vicon 红外高速运动捕捉系统拍摄区域

Figure 1. Shooting Area by Vicon Infrared High Speed Motion Capture System

### 1.3 实验步骤

准备工作:受试者签署知情同意书并填写个人基本信息,更换统一配备的紧身短裤和运动鞋。由专门的实验人员对受试者进行 Mark 点贴扎,位置分别为双侧髂前上棘、双侧髂后上棘、双侧膝关节外侧髁、双侧外踝、双侧跟骨、双侧第二趾骨底、左大腿和左小腿上 1/3 处、右大腿和右小腿下 1/3 处(图 2)。为减小实验误差,所有粘贴工作由一人完成。



图 2 下肢模型 Mark 点贴扎位置

Figure 2. Position of Lower Limb Model Mark Points

实验前测:受试者进行静态采集,随后在跑台上以 4 km/h 的速度进行 5~10 min 热身,紧接着在测力台上进行连续 5 次最大纵跳,取最好一次成绩计算受试者最大纵跳高度。采用踢球法对受试者进行下肢优势侧判定(张英媛等, 2014),完成测试后对受试者进行落地动作与 3D-MOT 任务培训。

### 1.4 实验方案

#### 1.4.1 落地动作测试方案

受试者双手叉腰,双脚直立站在 40 cm 的高台上,听

到“开始”口令后,优势腿向前迈出,同时身体前倾从台上无初速度垂直落下。落地时双脚同时着地,分别落在2块测力台上,着地方式均采用“足趾-足跟”模式,每个动作测试2~3次(图3)。

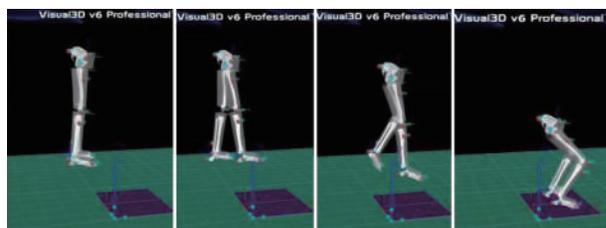


图3 落地动作模式示意图

Figure 3. Schematic Diagram of Landing Action Mode

#### 1.4.2 MOT任务方案

采用由8个相同球体组成的3D-MOT任务(Mejane et al., 2019)。每个任务分为4步:1)屏幕上呈现8个随机排列的相同球体;2)3个目标球体改变颜色(变亮);3)所有球体变回原有颜色,在屏幕内以相同的速度随机运动;4)任务结束时受试者依次指出屏幕上目标球体的位置(图4)。为保证受试者接受的MOT任务负荷相同,目标球体的速度根据受试者自身的临界水平进行标准化。标准化过程:任务以随机速度呈现,若受试者能正确识别目标球体,下一次进行的任务速度则变快;若不能正确识别目标球体,下一次执行的任务速度则变慢,球体速度呈阶梯式进行升降调节,直到受试者的临界速度被确定。为保证受试者在完成下落任务时能够顺利执行MOT任务,将其实验中的MOT速度水平调节为受试者临界速度的30%,规定受试者若不能正确识别目标球体则重新开始测试。同时,下落动作与MOT任务保持同步,若受试者完成MOT任务的反应时间超过2 s则重新开始测试。

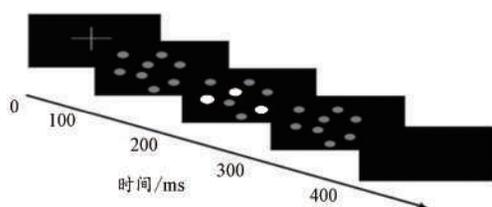


图4 3D-MOT任务呈现流程示意图

Figure 4. Schematic Diagram of 3D-MOT Tasks Process

#### 1.4.3 疲劳方案

由于足球运动员需进行长时间间歇性奔跑,且跳起、下落(头顶球)的动作模式经常出现,故研究采用“跑+跳”的方案进行疲劳诱导。要求受试者先以自身最大速度进行10×6 m折返跑,完成后迅速跑回到测力台进行5个连续最大纵跳(张希妮等,2017)。参考张强等(2014)和Tsai等(2009)的研究,以纵跳高度的平均衰减率来定

义疲劳程度,同时采用自感疲劳分级量表(Rating of Perceived Exertion, RPE)作为辅助的疲劳程度测定,疲劳判定标准根据预实验结果进行了调整。研究将疲劳分为3种水平:1)未疲劳(non-fatigue, NF);2)中度疲劳(medium-fatigue, MF),受试者纵跳高度衰减量达到30%,且RPE=14~16;3)重度疲劳(serious-fatigue, SF),受试者纵跳高度衰减量达到50%,且RPE>17。其中,纵跳高度(H)采用腾空时间计算法,公式为 $H=0.5g(T/2)^2=1.225T^2$ 。g表示重力加速度 $9.8\text{ m/s}^2$ ,T表示最大纵跳腾空时间(单信海等,2004)。当受试者达到不同疲劳程度时,即刻进行落地动作测试,否则继续执行疲劳方案。要求受试者在每组落地动作之间分别完成5次最大连续纵跳,以维持疲劳程度。

#### 1.5 数据采集与分析

所有数据通过Vicon导入Visual 3D软件,并采用逆向动力学方法进行计算。数据运算与处理在METLAB软件中完成。

由于ACL最大张力常出现于触地后垂直地面反作用力首峰时刻(Cerulli et al., 2003),故研究主要选取垂直地面反作用力首峰时刻受试者优势侧各项运动学和动力学指标进行分析。运动学参数主要选取下肢髋、膝、踝关节在3个平面内的关节角度,各关节角度在身体直立状态下定义为 $0^\circ$ 。动力学参数主要选取首峰时刻下肢各主要关节力矩、各个方向地面反作用力值以及垂直方向载荷率。时间参数主要选取垂直地面反作用力首峰出现的时间( $t_1$ ),即触地时刻至首峰时刻的时间差值。其中,VGRF为垂直地面反作用力首峰值;M-LGRF为水平方向的地面反作用力,MGRF代表向内(身体某结构离人体正中矢状面相对较近)地面反作用力,LGRF代表向外地面反作用力;A-PGRF为前后方向的地面反作用力,AGRPF代表向前地面反作用力,PGRF代表向后地面反作用力。垂直方向的载荷率(loading rate, LR)计算公式为 $LR=VGRF1/t_1$ 。以上各方向的地面反作用力指标统一除以体质量进行标准化。

#### 1.6 统计学分析

采用SPSS 20.0对数据进行正态分布检验,以单因素重复测量方差分析法(One-way Repeated Measures Anova)进行统计学分析,并运用最小显著性差异法(Least-Significant Difference, LSD)法进行两两比较,观察运动员在MOT任务下进行不同程度疲劳(NF、MF、SF)对下肢生物力学参数的影响。显著性水平定义为 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 疲劳干预情况

受试者平均执行了 $(5.93 \pm 1.62)$ 组疲劳方案达到研究规定的SF标准,数据均符合正态分布,说明运动员从NF

至 SF 的水平相差不大。此时,受试者的腾空高度较 MF 时平均减少了 12.44 cm,较 NF 时平均减少了 20.06 cm(表 1),达到研究规定的疲劳衰减标准。

### 2.2 下肢关节角度变化

MOT 任务下不同疲劳程度对下肢各关节角度有显著的影响。受试者达到 MF 时,与 NF 相比膝关节屈曲角度与踝关节跖屈角度增大(图 5b、5d),而膝关节内旋角度减小(图 5e,  $P < 0.05$ )。受试者达到 SF 时,与 NF 相比,髋关节屈曲角度与膝关节外翻角度增大(图 5a、5c,  $P < 0.05$ );

与 MF 相比,髋关节屈曲角与膝关节屈曲角减小(图 5a、5b),膝关节外翻角增大(图 5c,  $P < 0.05$ )。

表 1 受试者执行疲劳干预情况

Table 1 Fatigue Intervention of Subjects

疲劳状态	疲劳组数/n	纵跳高度/cm	纵跳高度百分比/%
NF	—	40.01 ± 6.11	100.00
MF	3.13 ± 1.12	27.57 ± 3.92	69.01
SF	5.93 ± 1.62	19.95 ± 3.18	49.82

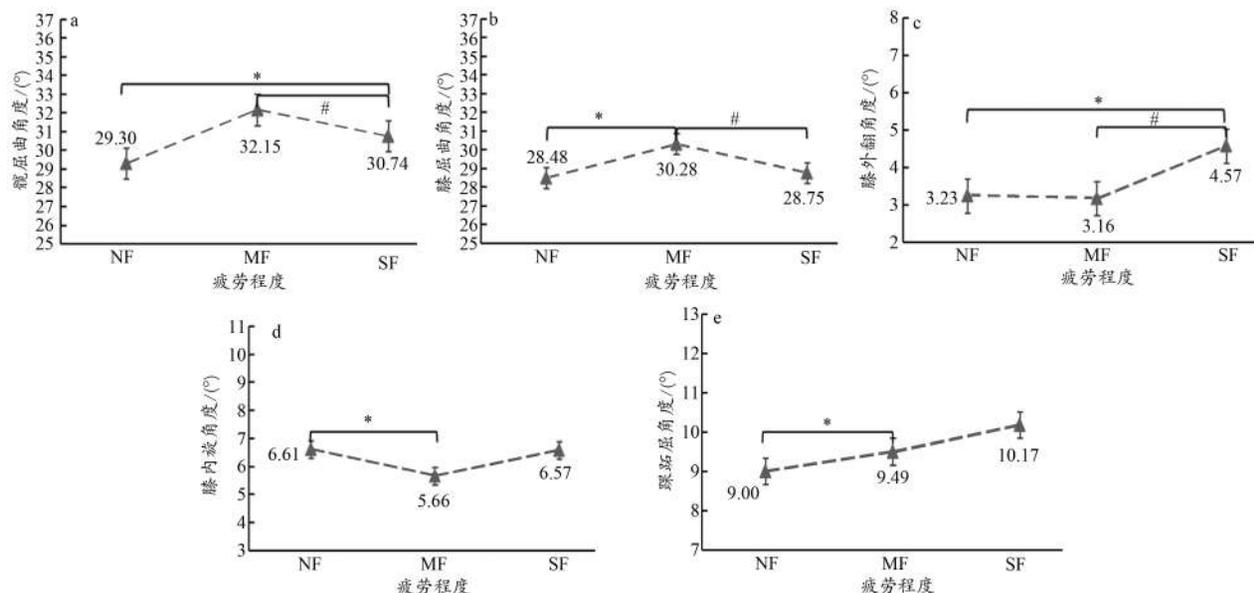


图 5 下肢各关节角度

Figure 5. Angle of Lower Limb Hip Joint

注:\*表示与 NF 相比,  $P < 0.05$ ; #表示与 MF 时相比,  $P < 0.05$ ;下同。

### 2.3 下肢关节力矩变化

在 MOT 任务下,受试者达到 MF 时踝关节背屈力矩较 NF 时明显增加(图 6e,  $P < 0.05$ )。达到 SF 时,髋关节伸力矩与内收力矩较 NF 时增加(图 6a、6c,  $P < 0.05$ ),膝关节伸力矩较 MF 时减小,膝关节内收力矩较 MF 时增大(图 6b、6c,  $P < 0.05$ )。

### 2.4 地面反作用力、载荷率及首峰出现时间变化

受试者从 NF 状态达到 MF 状态时,垂直地面反作用力首峰出现的时间缩短( $P < 0.05$ ,表 2)。受试者达到 SF 时,垂直方向、水平方向以及前后方向地面反作用力值较 NF 时均明显增大( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论与分析

研究表明,随着疲劳的发展,运动员的最大纵跳高度明显下降,说明采用的疲劳诱导方案能够成功引起中枢神经系统与外周肌肉系统产生疲劳,具有一定的合理性。刘洋等(2019)也认为,“跑+跳”的疲劳诱导方式来研究膝关节 ACL 损伤比较切实、准确。

### 3.1 MF 水平下的“软”着地

研究发现,与 NF 相比,受试者达到 MF 水平时,膝关节屈曲角度与踝关节跖屈角度增大。通常在高冲击力的情况下,着地时较大的矢状面关节位移被认为是主要的减震机制(Yom et al., 2019)。研究中膝关节和踝关节在矢状面内的角度增大,表明在下落着地后,下肢采用更积极的缓冲策略,使膝、踝关节周围的肌肉吸收外力作用的时间延长,一定程度上起到了减震保护作用。这与 Cortes 等(2013)的研究相符,受试者在触地时刻与峰值时刻均采取更大的膝关节屈曲角度,以更好地保护膝关节结构。当 MF 发生时,运动员进入一个更灵活的姿势,仍以一种保护性的“软着陆”姿势落地。有研究认为,此结果可能是由于研究涉及的疲劳诱导方案与运动员平时在练习和比赛中进行的活动相似,易导致运动员的中枢神经系统与骨骼肌肉系统对于出现的疲劳表现出一定的适应性(Cortes et al., 2013),使机体依然能够调整躯干与下肢关节做出保护性的着地姿势。研究还发现,膝关节内旋角度以及垂直地面反作用力首峰出现的时间减小。此时膝

关节内旋角度减少可能带来的消极影响是引起膝关节在着地过程后续阶段内的膝关节内旋角度增加(Schmitz et al., 2013),且垂直地面反作用力首峰出现的时间缩短也

不利于下肢缓冲,甚至会增大下肢刚度,这也是导致ACL损伤的重要危险因素之一。

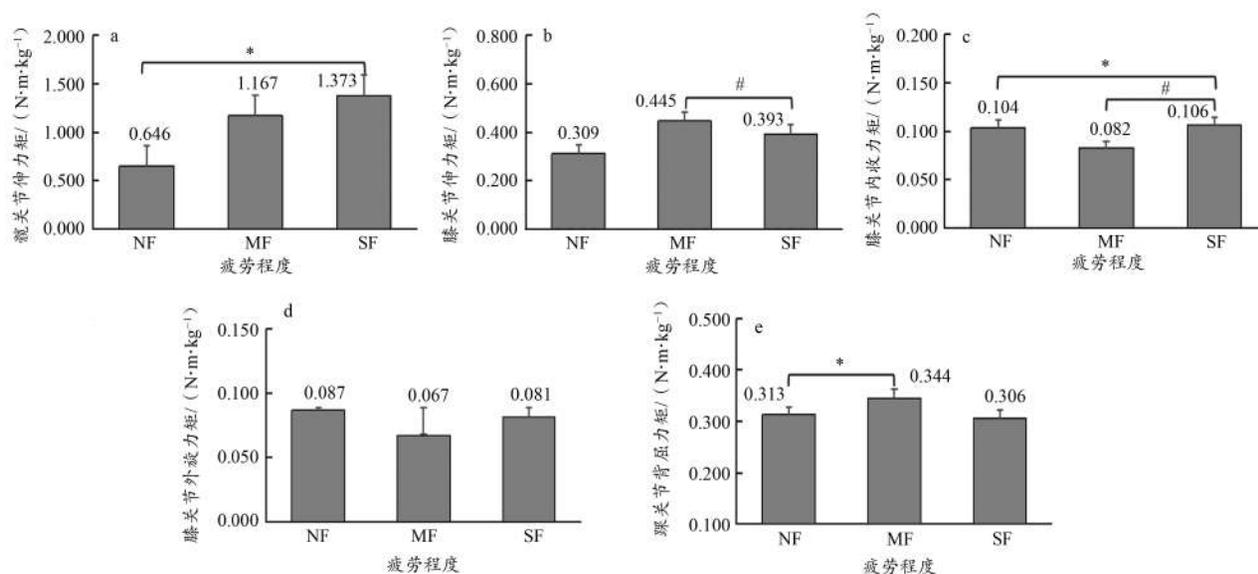


图6 下肢关节力矩值

Figure 6. Moment of Lower Limb

表2 首峰时刻优势侧下肢地面反作用力、载荷率及首峰出现时间比较

Table 2 Comparison of Ground Reaction Force, Load Rate and Occurrence Time of the First Peak on the Dominant Side

指标	NF	MF	SF
VGRF/BW	1.020±0.178	1.070±0.283	1.223±0.288*
M-LGRF/BW	0.767±0.248	0.853±0.237	0.945±0.164*
A-PGRF/BW	0.525±0.127	0.609±0.192	0.621±0.172*
LR/(Bw/s)	74.227±11.380	76.823±12.215	78.627±10.329
t1/s	0.011±0.003	0.010±0.003*	0.011±0.003

### 3.2 SF水平下的“硬”着地

随着疲劳程度的进一步增加,运动员达到SF水平,此时与NF相比,SF状态下的髋关节屈曲角度、膝关节外翻角度、髋关节伸力矩及膝关节内收力矩均有所增加。与MF相比,运动员达到SF时髋关节屈曲角度、膝关节屈曲角度及膝关节伸力矩呈下降趋势,而膝关节外翻角度与膝关节内收力矩较MF时呈增大趋势。这提示在SF状态下,运动员的下肢着地模式发生了变化,与MF相比呈现出变“硬”的趋势。与此同时,运动员达到SF时首峰时刻的垂直方向、水平方向以及前后方向地面反作用力均明显增加,表明此种较“硬”的着地模式会导致更多的负荷直接作用于关节周围的骨和韧带。运动员在下落过程中受到各个方向的冲击力变大,若髋关节和膝关节屈曲角度较小就无法抵消较大的冲击力,不利于关节能量吸收及落地动作缓冲,还会导致较大的冲击力沿着跟骨、距骨传递到小腿及其他下肢关节(Nawoczinski et al., 1995),进一步增大肢

骨前端的剪切力以及膝关节周围韧带的负荷(Schilaty et al., 2019; Wang et al., 2010),甚至导致膝关节内部结构发生过度应变和应力(Brown et al., 2009)。Cortes等(2013)的研究与之相似,机体达到最大疲劳时会对下肢关节产生十分不利的影响。研究认为,关于SF引起着地模式发生较“硬”的变化机制,主要有以下两点原因:1)随着机体疲劳不断发展,中枢神经系统功能下降明显,引起高位中枢对脊髓运动神经元的支配能力与工作效率降低(Rathey et al., 2006);2)随着疲劳的加剧,外周肌肉系统感知运动的敏感性也急剧衰退,造成下肢肌肉力量合成能力下降以及关节松弛(Proske et al., 2012),进一步抑制周围肌肉对这些极端负荷状态的稳定(Boucher et al., 2012),致使机体无法调整躯干与下肢到恰当的位置以产生适当的动量用于着地缓冲(Cortes et al., 2013; Frank et al., 2013)。

### 3.3 MOT任务下的影响机制

研究发现,运动员在MF与SF时均可能导致其ACL损伤风险增加。此结论符合Mejane等(2019)的研究,受试者在疲劳状态下完成MOT任务时膝关节负荷明显增大。Dietrich(2003)提出的暂时性额叶衰退理论与注意资源分配理论可以解释这一现象。其构建了一个意识层次结构,人体基本的生物功能(如心率、说话等功能)位于此意识层次中的底层,前额叶背外侧皮层的执行功能(如认知功能)位于顶层。该理论认为,运动会与导致与前额叶皮层相关的顶层意识水平发生短暂放松,即一个人的前额叶皮层受到其他刺激时,相关功能会暂时性受损。Di-

etric (2006) 还指出, 由于大脑的代谢资源在运动过程中是固定不变的, 若身体要进行动态运动, 就需要以牺牲其他区域为代价来增加大脑的激活量。根据这一理论, 前额叶皮层受资源重新分配的影响最大, 在机体受到运动等刺激时, 会产生一种暂时性的放松调节, 在行为上表现为运动期间认知功能的暂时性减退。在本研究中, MOT 任务作为一项高水平的感知认知任务, 能够刺激大量的大脑神经网络, 使其在运动过程中须完成运动整合、持续和分散的注意力处理以及工作记忆等工作 (Romeas et al., 2016)。由于这种有效的认知在控制运动中起重要作用, 故疲劳引起认知功能的短暂衰退可能会损害运动员在动态环境中的运动能力, 容易造成次优肌肉行为和关节不稳的情况出现 (Agel et al., 2016), 从而导致下肢着地模式发生不利的变化。Lochner 等 (2014) 的研究也支持这一结论, 在驾驶的同时执行 MOT 任务, 会影响受试者驾驭前行与停车等驾驶技能的执行, 说明当受试者受到运动刺激时仍要保持对多个目标的追踪任务, 就很难处理和调节两种信息冲突, 容易出现视觉-空间定向能力减弱, 干扰正常运动路线的执行 (Swanik et al., 2016)。因此, 足球运动员在 MOT 任务下完成落地动作, 可能存在更高的损伤风险。

#### 4 结论

1) MOT 任务下的运动疲劳引起足球运动员完成落地缓冲动作发生不利的下肢生物力学变化。

2) 随着疲劳的发展, 足球运动员完成落地动作的着地模式呈现出由“软”到“硬”的趋势, 进一步增加非接触性 ACL 损伤风险。

#### 参考文献:

- 刘洋, 漆昌柱, 秦杰, 2018. 视觉运动追踪及其在体育运动中的应用与启示[J]. 武汉体育学院学报, 52(8): 78-84.
- 刘洋, 王德新, 程丽芬, 等, 2019. 基于运动生物力学视角研究运动性疲劳干预方案的可视化知识图谱分析[J]. 中国组织工程研究, 23(27): 4291-4299.
- 单信海, 丁萌, 2004. 纵跳高度腾空时间计算法的理论探讨与实验评价[J]. 中国临床康复, 8(24): 5103-5105.
- 张强, 胡婧, 伍颢, 2014. 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, 33(12): 1153-1160.
- 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.
- 张英媛, 王国栋, 陆阿明, 2014. 下肢优势侧评定方法的比较研究[J]. 北京体育大学学报, 37(10): 83-88.
- 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.
- ALVAREZ G A, CAVANAGH P, 2005. Independent resources for attentional tracking in the left and right visual hemifields[J]. Psychol Sci, 16(8): 637-643.

- ALVES H, VOSS M W, BOOT W R, et al., 2013. Perceptual-cognitive expertise in elite volleyball players[J]. Front Psychol, 4(36): 1-9.
- 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.
- BOUCHER J, ABOUD J, DESCARREAU M, 2012. The influence of acute back muscle fatigue and fatigue recovery on trunk sensorimotor control[J]. J Manip Physiol Ther, 35(9): 662-668.
- BROWN T N, PALMIERI-SMITH R M, MCLEAN S G, 2009. Sex and limb differences in hip and knee kinematics and kinetics during anticipated and unanticipated jump landings: Implications for anterior cruciate ligament injury[J]. Brit J Sports Med, 43(13): 1049-1056.
- CERULLI G, BENOIT D L, LAMONTAGNE M, et al., 2003. In vivo anterior cruciate ligament strain behaviour during a rapid deceleration movement: Case report[J]. Knee Surg Sports Tr A, 11(5): 307-311.
- CHANG E W, JOHNSON S, POLLARD C, et al., 2018. Landing biomechanics in anterior cruciate ligament reconstructed females who pass or fail a functional test battery[J]. Knee, 25(6): 1074-1082.
- CORTES N, GRESKA E, KOLLOCK R, et al., 2013. Changes in lower extremity biomechanics due to a short-term fatigue protocol [J]. J Athl Training, 48(3): 306-313.
- DIETRICH A, 2003. Functional neuroanatomy of altered states of consciousness: The transient hypofrontality hypothesis[J]. Conscious Cogn, 12(2): 231-256.
- DIETRICH A, 2006. Transient hypofrontality as a mechanism for the psychological effects of exercise[J]. Psychiat Res, 145(1): 79-83.
- FAUBERT J A L S, 2012. Perceptual-cognitive training of athletes[J]. J Clin Sport Psychol, 26(1): 85-102.
- FILARDO G, ANDRIOLO L, DI LAURA FRATTURA G, et al., 2019. Bone bruise in anterior cruciate ligament rupture entails a more severe joint damage affecting joint degenerative progression [J]. Knee Surg Sports Tr A, 27(1): 44-59.
- FRANK B, BELL D R, NORCROSS M F, et al., 2013. Trunk and hip biomechanics influence anterior cruciate loading mechanisms in physically active participants[J]. Am J Sports Med, 41(11): 2676-2683.
- KOBAYASHI H, KANAMURA T, KOSHIDA S, et al., 2010. Mechanisms of the anterior cruciate ligament injury in sports activities: A twenty-year clinical research of 1 700 athletes[J]. J Sports Sci Med, 9(4): 669-675.
- LEHNERT M, CROIX M D S, XAVEROVA Z, et al., 2018. Changes in injury risk mechanisms after soccer-specific fatigue in male youth soccer players[J]. J Human Kinet, 62(1): 33-42.
- LIEN-IVERSEN T, MORGAN D B, JENSEN C, et al., 2019. Does surgery reduce knee osteoarthritis, meniscal injury and subsequent complications compared with non-surgery after ACL rupture with at least 10 years follow-up? A systematic review and meta-analysis [J]. Brit J Sports Med, 5(11): 1-8.
- LOCHNER M J, TRICK L M, 2014. Multiple-object tracking while driving: The multiple-vehicle tracking task[J]. Atten Percept Psycho, 76(8): 2326-2345.
- MEJANE J, FAUBERT J, ROMEAS T, et al., 2019. The combined impact of a perceptual-cognitive task and neuromuscular fatigue on knee biomechanics during landing[J]. Knee, 26(1): 52-60.

- NAWOCZENSKI D A, COOK T M, SALTZMAN C L, 1995. The effect of foot orthotics on three-dimensional kinematics of the leg and rearfoot during running[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 21(6): 317-327.
- PROSKE U, GANDEVIA S C, 2012. The proprioceptive senses: Their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force[J]. *Physiol Rev*, 92(4): 1651-1697.
- PYLYSHYN Z W, STORM R W, 1988. Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism[J]. *Spat Vis*, 3(3): 179-197.
- QU X, JIANG J, HU X, 2018. Effects of subsensory noise and fatigue on knee landing and cross-over cutting biomechanics in male athletes[J]. *J Appl Biomech*, 34(3): 205-210.
- RATTEY J, MARTIN P G, KAY D, et al., 2006. Contralateral muscle fatigue in human quadriceps muscle: Evidence for a centrally mediated fatigue response and cross-over effect[J]. *Pflügers Arch - Eur J Physiol*, 452(2): 199-207.
- ROMEAS T, GULDNER A, FAUBERT J, 2016. 3D-multiple object tracking training task improves passing decision-making accuracy in soccer players[J]. *Psychol Sport Exerc*, 22: 1-9.
- SCHILATY N D, BATES N A, KRYCH A J, et al., 2019. Frontal plane loading characteristics of medial collateral ligament strain concurrent with anterior cruciate ligament failure [J]. *Am J Sports Med*, 47(9): 2143-2150.
- SCHMITZ R J, SHULTZ S J, KULAS A S, et al., 2004. Kinematic analysis of functional lower body perturbations[J]. *Clin Biomech*, 19(10): 1032-1039.
- SWANIK C B, COVASSIN T, STEARNE D J, et al., 2017. The relationship between neurocognitive function and noncontact anterior cruciate ligament injuries[J]. *Am J Sports Med*, 35(6): 943-948.
- TAI L, SIGWARD S M, POLLARD C D, et al., 2009. Effects of fatigue and recovery on knee mechanics during side-step cutting[J]. *Med Sci Sports Exer*, 41(10): 1952-1957.
- WANG L, GU C, CHEN W, et al., 2010. Potential for non-contact ACL injury between step-close-jump and hop-jump tasks [J]. *J Sports Sci Med*, 9(1): 134-139.
- YOM J P, OWENS T, ARNETT S, et al., 2019. The effects of an unanticipated side-cut on lower extremity kinematics and ground reaction forces during a drop landing [J]. *Sports Biomech*, 18(4): 414-425.

(收稿日期:2020-01-07; 修订日期:2020-10-22; 编辑:尹航)

(上接第10页)

- 蒋抒博, 2019. 吉林省冰雪产业发展现状及对策研究[J]. *税务与经济*, 41(1): 105-112.
- 蒋中伟, 李国强, 姜明金, 等, 2020. 我国冰雪特色小镇建设的复杂适应性机理与发展规划研究[J]. *天津体育学院学报*, 35(4): 399-403.
- 郎君, 2017. 论 2022 北京—张家口冬奥会的奥运经济产业化运作 [J]. *南京体育学院学报(社会科学版)*, 31(1): 29-34.
- 李刚, 张林, 2020. 中国现代体育市场体系发展的历史溯源、现实审视与路径选择[J]. *体育科学*, 40(9): 3-13.
- 李璟圆, 2020. 新冠肺炎疫情下推进大众冰雪治理能力现代化研究[J]. *沈阳体育学院学报*, 39(6): 48-56.
- 李双金, 2020. 加快建设统一开放、竞争有序的现代化市场体系[J]. *上海经济研究*, 40(2): 19-24.
- 连玉明, 武建忠, 2020. *新改革经济学*[M]. 北京: 社会科学文献出版社: 122.
- 刘泉红, 2020. “十四五”时期我国现代市场体系建设思路和关键举措[J]. *经济纵横*, 36(5): 66-75.
- 刘桢, 程文广, 2020. 东北城市群冰雪产业共生发展研究[J]. *体育文化导刊*, 38(7): 21-26, 37.
- 柳思维, 2020. 关于促进形成强大国内统一市场体系的思考[J]. *湖南大学学报(社会科学版)*, 34(1): 34-39.
- 卢现祥, 2020. 论产权制度、要素市场与高质量发展[J]. *经济纵横*, (1): 65-73, 2.
- 沈宏亮, 2018. 现代市场体系完善进程中的监管体系改革研究[J]. *中国特色社会主义研究*(4): 27-32.
- 宋宗宏, 2020. 中国市场体系的渐进孵化: 基于国家能力的视角[J]. *南方经济*, 38(1): 1-12.
- 王露露, 陈丹, 高晓波, 2019. 我国南方冰雪产业发展问题及对策[J]. *体育文化导刊*, 37(4): 94-99.
- 王洋, 2020. 基于熵权-耦合的冰雪经济与城市劳动力供需协调度研究[J]. *统计与决策*, 36(2): 85-88.
- 新华网, 2020. 第 22 届哈尔滨冰雪大世界基础设施建设已全面展开 [EB/OL]. [2020-10-31]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1682046715212632783&wfr=spider&for=pc>.
- 央广网, 2018. 雪乡宰客事件持续发酵 导游称“九个月磨刀三个月宰羊”[EB/OL]. [2018-01-16]. [http://finance.cnr.cn/315/gz/20180116/t20180116\\_524101070.shtml](http://finance.cnr.cn/315/gz/20180116/t20180116_524101070.shtml).
- 杨永生, 李兆鹏, 杨阳, 2020. 冬季体育行业人才需求与职业院校专业设置匹配分析研究[J]. *中国职业技术教育*, 28(35): 33-41, 60.
- 杨育敏, 魏翔, 韩玉灵, 2009. 行业协会的市场作用: 基于信号传递模型的分析[J]. *财经研究*, 35(5): 104-114, 143.
- 于施洋, 王建冬, 郭巧敏, 2020. 我国构建数据新型要素市场体系面临的挑战与对策[J]. *电子政务*, 17(3): 2-12.
- 中国新闻网, 2019. 官方发布滑雪消费提示: 自愿购买保险防意外 [EB/OL]. [2019-01-07]. <http://www.bj.chinanews.com/news/2019/0107/69218.html>.
- 庄艳华, 2018. 我国冰雪文化普及的理论之维与实现路径[J]. *体育与科学*, 39(5): 109-114.
- BAUSCH T, GARTNER W C, 2020. Winter tourism in the European Alps: Is a new paradigm needed?[J]. *J Outdoor Rec Tour*, 3(31): 1-9.
- CROMPTON J L, FAJETE P C, LUE C C, 2016. Positioning: The example of the Lower Rio Grande Valley in the Winter Long Stat[J]. *J Travel Res*, 31(2): 20-26.
- EZRACHI A, MAGGIOLINO M, 2012. European competition law, compulsory licensing, and innovation [J]. *J Compet Law Econ*, 8(3): 595-614.
- LAINÉ A, VEHMAS H, COATES D, 2017. *The Private Sport Sector in Europe*[M]. BALTIMORE, Maryland, USA: Springer: 282.
- PHILLIPS J, BRUNT P, 2013. Tourist differentiation: Developing a typology for the winter sports market[J]. *Tour*, 61(3): 219-243.
- TAKS M, KESENNE S, 2000. The economic significance of sport in Flanders[J]. *J Sport Manage*, 14(4): 342-265.

(收稿日期:2021-09-26; 修订日期:2022-04-01; 编辑:尹航)