



力量素质对正脚背踢球动作腓绳肌生物力学特征的影响

Effects of Strength Ability on Biomechanical Characteristics of Hamstring Muscles in Instep Kicking

雷静民¹, 李翰君^{1*}, 张力文^{1,2}

LEI Jingmin¹, LI Hanjun^{1*}, ZHANG Liwen^{1,2}

摘要:目的:分析正脚背踢球动作中下肢和腓绳肌生物力学特征参数,探讨踢球动作腓绳肌拉伤危险时相,同时探究腓绳肌和股四头肌力量素质与踢球动作下肢和腓绳肌生物力学特征的关系,进一步明确踢球动作中腓绳肌拉伤机制。方法:以15名足球专项国家一级运动员为受试者,采集180(°)/s动作角速度下的等速腓绳肌向心(H_{con})、腓绳肌离心(H_{ecc})、股四头肌向心峰值力矩(Q_{con});采集受试者最大力正脚背踢球动作运动学和肌电数据,根据腓绳肌肌肉起止点和髌、膝关节中心的相对位置获得肌肉起止点坐标,从而获得腓绳肌3块双关节肌肌肉-肌腱复合体(muscle-tendon unit, MTU)长度,以MTU拉伸速度和标准化MTU长度为分析指标。采用样条插值法对各指标按踢球动作周期阶段进行3次归一化处理。结果:腓绳肌3块双关节肌在正脚背踢球动作小腿前摆阶段和触球随摆阶段处于激活状态并被拉长,进行离心收缩;触球随摆阶段3块双关节MTU拉伸速度、肌标准化MTU长度、肌肉激活程度均显著大于小腿前摆阶段($P<0.05$),标准化MTU长度在触球随摆阶段中期达到峰值; Q_{con} 与踢球腿髌关节最大屈角、髌关节活动范围显著相关($P<0.05$),腓绳肌最大标准化MTU长度与 $H_{ecc}:Q_{con}$ 、髌关节最大屈角、髌关节活动范围显著相关($P<0.05$)。结论:腓绳肌在正脚背踢球动作触球随摆阶段进行离心收缩,被拉长到最大,因而在这一阶段可能更易拉伤; $H_{ecc}:Q_{con}$ 与腓绳肌最大肌肉长度呈正相关,可能反应了身体的一种保护机制;相比于其他力量素质指标, $H_{ecc}:Q_{con}$ 更可能与腓绳肌拉伤有关。

关键词:腓绳肌拉伤;损伤机制;正脚背踢球;肌肉力量

Abstract: Objective: To investigate the biomechanical characteristic parameters of lower limbs and hamstring muscle during instep kicking, analyse the potential for hamstring strain, and explore the relationship between the strength ability of the hamstring and quadriceps and the biomechanical characteristics of lower limb and hamstring muscles in kicking action, and to further clarify the mechanism of a hamstring strain in kicking action. Methods: Fifteen soccer-majored first-grade athletes were enrolled as subjects, and the peak hamstring concentric torque (H_{con}), hamstring eccentric torque (H_{ecc}), and quadriceps concentric torque (Q_{con}) at 180(°)/s were collected; the electromyographic and kinematic data in an instep kicking test of maximum force were collected, and the coordinates of the muscle starting and ending points were obtained according to the starting and ending points of the hamstring muscle and the relative positions of the centers of the hip and knee joints, thereby the muscle-tendon unit (MTU) length of the hamstring muscle was determined. Taking MTU elongation velocity and normalized MTU length as analysis indicators. The spline interpolation method was used to normalize each index 3 times according to the periodic stages of the kicking action. Results: Hamstring muscles are activated and elongated and exhibited eccentric contraction during leg acceleration and follow-through phases of instep kicking. The elongation velocity, hamstring normalized MTU length, and activation degree in the follow-through phase were greater than those in the leg acceleration phase ($P<0.05$), and the MTU length peaked in the middle follow-through phase. The peak Q_{con} was

第一作者简介:

雷静民(1997-),男,硕士,主要研究方向为运动生物力学,E-mail:17779148480@163.com。

*通信作者简介:

李翰君(1983-),男,教授,博士,主要研究方向为运动生物力学,E-mail:lihanjun@bsu.edu.cn。

作者单位:

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

significantly correlated with the maximum hip flexion angle and the hip range of motion of the kicking leg ($P < 0.05$). The maximum normalized hamstring MTU length was significantly correlated to the value of $H_{ecc}:Q_{con}$, the maximum hip flexion angle, and the hip range of motion ($P < 0.05$). Conclusions: The hamstring muscle is elongated to the maximum by eccentric contraction during the follow-through phase of instep kicking, and the hamstring muscle may be more susceptible to strain during this phase. The positive correlation between the value of $H_{ecc}:Q_{con}$ and the maximum hamstring muscle-tendon unit length can be interpreted as a protective mechanism. Compared with other strength ability parameters, $H_{ecc}:Q_{con}$ is more likely to be associated with hamstring strain.

Keywords: hamstring strain injury; injury mechanism; instep kicking; muscle strength

中图分类号: G804.6 **文献标识码:** A

腓绳肌拉伤是足球、橄榄球、田径等项目中最为常见的损伤之一。在足球项目中,职业运动员腓绳肌拉伤占所有损伤的 37%,且有 12%~33% 的复发率(周林等, 2018; Hägglund et al., 2013; Heiderscheidt et al., 2010),不仅影响运动员的运动表现,还会给俱乐部带来经济损失。腓绳肌拉伤主要发生在疾跑动作中,其次是踢球动作(Brooks et al., 2006; Gabbe, 2005)。踢球动作造成的腓绳肌拉伤更为严重,平均康复时间为 14~28 天(Ekstrand et al., 2011)。正脚背踢球动作是足球项目常用的踢球技术,与其他踢球方式相比,正脚背踢球动作需同时屈膝屈髋(部义峰等, 2007b; Nunome et al., 2002),动作幅度较大、角速度大,能获得更高的球速(Katis et al., 2010),但更易造成损伤。目前,踢球动作生物力学研究主要关注动作技术(部义峰等, 2007a, 2010; 蒋仲君等, 2010)和动作技术对球速和准确性的影响(傅旭波等, 2021; Palucci Vieira et al., 2021),较少关注踢球动作腓绳肌的生物力学特征和拉伤机制。

动物模型研究表明,肌肉应变(肌肉长度相对静息长度的增量与肌肉静息长度的比)过高是肌肉拉伤的首要形成机制,肌肉拉伤与肌肉拉伸速度和肌肉收缩力无关(Yu et al., 2017)。虽然对于人体而言,在体肌肉的静息长度难以测量,但根据肌肉应变的计算方法,肌肉长度和肌肉应变成正比,且当肌肉长度达到峰值时肌肉应变也达到峰值。所以,在以往腓绳肌生物力学研究中常直接分析腓绳肌肌肉-肌腱复合体(muscle-tendon unit, MTU)的长度(Yu et al., 2008),或采用 MTU 长度相对直立时 MTU 长度的形变量来间接反应肌肉应变(Heiderscheidt et al., 2005; Thelen et al., 2005)。此外,有研究提出可以用最优长度(肌力最大时的 MTU 长度)代替静息长度(Kaufman et al., 1991)计算 MTU 应变。在此基础上,许多生物力学研究探讨了疾跑动作腓绳肌拉伤机制(万祥林等, 2019; Thelen et al., 2005; Yu et al., 2008),发现疾跑摆动阶段腓绳肌在激活状态被拉长,进行离心收缩,MTU 长度和应变在摆动末期达到峰值,因此推测疾跑摆动末期更可能是腓绳肌拉伤的危险时相(Kenneally-Dabrowski et al., 2019)。但是踢球动作腓绳肌拉伤的危险时相尚未明确,不利于

对腓绳肌拉伤机制的进一步理解。

另一方面,腓绳肌力量(谭恺等, 2019; Opar et al., 2015; Van Dyk et al., 2016)和股四头肌力量(Freckleton et al., 2013)被认为是腓绳肌拉伤的危险因素,但目前仍存在争论(韩经超等, 2015; Zvijac et al., 2013)。从损伤机制角度考虑,腓绳肌和股四头肌力量不足可能会影响腓绳肌易伤动作中的下肢生物力学特征,进而影响腓绳肌 MTU 长度,最终增加损伤风险。Opar 等(2012)分析认为,腓绳肌力量较弱(即较低的腓绳肌与股四头肌的力量比)可能导致动作中产生更长的腓绳肌 MTU 长度。Wan 等(2017a)研究发现,腓绳肌力量和疾跑动作腓绳肌肌肉应变无显著相关,这可能是因为其只考虑了腓绳肌向心力量,忽略了股四头肌力量和腓绳肌离心力量的影响。同时,腓绳肌力量和股四头肌力量对踢球动作腓绳肌 MTU 长度的影响也仍然未知。与疾跑动作相比,踢球动作关节活动幅度更大,大腿前后群肌肉力量更可能对腓绳肌 MTU 长度和应变产生影响。在踢球动作中,股四头肌向心收缩、屈髋伸膝,而腓绳肌离心收缩,实现腿部的减速。因此,相比腓绳肌向心力量,更应考虑腓绳肌离心力量和股四头肌向心力量对肌肉长度和肌肉应变的影响。有研究认为,以腓绳肌离心峰值力距(H_{ecc})与股四头肌向心峰值力距(Q_{con})的比值($H_{ecc}:Q_{con}$)评估大腿前后群肌肉力量更具有功能性(曹峰锐等, 2017; Delestrat et al., 2010)。据此,本研究旨在通过测算正脚背踢球动作中腓绳肌 3 块双关节肌 MTU 长度特征,结合运动学、肌肉激活特征,探讨踢球动作腓绳肌拉伤危险时相,同时探究腓绳肌和股四头肌力量素质对踢球动作下肢和腓绳肌生物力学特征的影响,进一步明确腓绳肌拉伤机制。

1 研究对象与方法

1.1 受试者

15 名国家一级男性足球运动员自愿参加本研究,年龄(19.79±1.19)岁,身高(179.33±6.44) cm,体质量(70.19±6.96) kg,实验前 48 h 内无剧烈活动,半年内无下肢损伤。

1.2 数据采集

实验流程为:1)15 min 国际足球联合会(Fédération In-

ternationale de Football Association, FIFA) 足球专项热身 (FIFA11+); 2) 腓绳肌和股四头肌等速力量测试; 3) 正脚背踢球生物力学测试, 采集下肢和腓绳肌生物力学特征参数; 4) 成功完成 3 次正脚背踢球测试后, 进行最大自主等长收缩 (maximal voluntary isometric contraction, MVIC) 测试, 期间同步采集肌电信号。

等速力量测试时, 要求受试者在 Isomed 2000 等速测试仪 (D&R Ferstl GmbH, 德国) 上保持坐姿, 屈髋 90° , 踢球腿完成 $180^\circ/s$, $0^\circ \sim 90^\circ$ 的等速向心屈膝、离心屈膝、向心伸膝力量测试, 每个动作做 1 组, 5 次/组。该方法常用于评估足球运动员大腿前后侧肌肉力量和力量均衡性 (Delextrat et al., 2010; Sangnier et al., 2007)。

踢球生物力学测试时, 要求受试者穿着统一的紧身裤和碎钉足球鞋, 依据体表解剖标志, 在受试者身上粘贴 21 个反光标志点 (第 4、5 腰椎棘突中点, 左右侧的髂前上棘, 股骨大转子, 股骨外侧髁, 股骨内侧髁, 胫骨粗隆, 腓骨外踝, 胫骨内踝, 足跟, 第 1、5 跖骨; 图 1)。在足球正中粘贴 1 个反光片, 用于确定脚与足球的接触时刻。股二头肌、半腱肌中间肌腹位置处放置电极片, 用 Trigno Mobile 无线肌电测试仪 (Delsys, 2 000 Hz, 美国) 进行肌电采集。测试场地正前方为足球标准球门 (图 2), 场地四周有 8 个镜头红外高速运动捕捉系统 (Motion Analysis, 200 Hz, 美国), 在动作平面右侧有 1 台主光轴垂直于运动平面的高速摄像机 (50 Hz)。测试时, 要求受试者在足球斜后方准备, 从 45° 助跑 2~4 步, 用最大力量进行正脚背踢球, 将足球踢到球门中央方形标志框内。



图 1 反光标志点粘贴位置示意图

Figure 1. Pasting Location of Reflective Marks

1.3 数据处理

反光标志点三维坐标通过 Butterworth 低通滤波法进行平滑, 截断频率为 13.3 Hz (Yu et al., 1999), 根据标志点坐标建立骨盆、大腿、小腿和足的环节坐标系。根据股二头肌长头、半腱肌、半膜肌起止点相对于髋关节和膝关节中心的相对位置, 确定肌肉起止点在环节坐标系中的坐

标, 通过左、右髂前上棘的距离对肌肉在骨盆的起点坐标进行标准化, 通过膝关节中心到踝关节中心的距离对肌肉在小腿上的止点坐标进行标准化 (Wan et al., 2017b; Yu et al., 2008)。获得腓绳肌 3 块双关节肌起止点在环节坐标系中的坐标后, 转化为大地坐标系坐标。MTU 长度为大地坐标系中肌肉起止点连线的直线距离, MTU 拉伸速度为 MTU 长度相对于时间的一阶导数。踢球动作周期中的标准化 MTU 长度 (L_N) 被定义为: 这一时刻 MTU 长度 (L_t) 相对于站立标定时刻 MTU 长度 (L_0) 的增量与站立标定时刻 MTU 长度 (L_0) 的比, 即 $L_N = (L_t - L_0) / L_0$ (Thelen et al., 2005)。采用欧拉角方法计算髋、膝的三维角度。肌电信号采用 10~800 Hz 带通滤波平滑, 然后进行全波整流, 再经过 20 Hz 低通滤波处理, 获得肌电线性包络线, 通过 3 s MVIC 肌电信号的平均值对整个踢球动作过程肌电进行标准化。

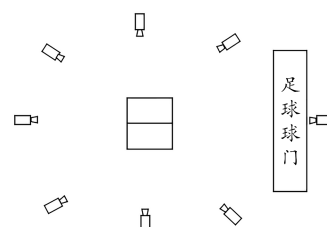


图 2 踢球测试场地示意图

Figure 2. Diagram of Kicking Test Site

将正脚背踢球动作划分为 4 个动作阶段 (图 3): 主动后摆阶段 (踢球腿脚尖离地到髋关节伸展角最大)、大腿前摆阶段 (髋关节伸角最大到膝关节屈角最大)、小腿前摆阶段 (膝关节屈角最大到足-球接触) 和触球随摆阶段 (足-球接触到髋关节屈角最大), 采用 3 次样条插值法对各指标按踢球动作周期阶段进行归一化处理。

1.4 数据分析

采用配对样本 t 检验分析小腿前摆阶段和触球随摆阶段腓绳肌最大 MTU 拉伸速度、最大标准化 MTU 长度的差异。采用 Pearson 相关分析检验腓绳肌 3 块双关节肌最大标准化 MTU 长度、踢球腿下肢运动学特征、腓绳股四力量素质指标 (Q_{con} 、 H_{con} 、 H_{ecc} 、 H_{con} 、 Q_{con} 、 H_{ecc} 、 Q_{con}) 之间的相关性, 相关系数小于 0.10 为几乎不相关, 0.10~0.39 为弱相关, 0.40~0.69 为中度相关, 0.70~0.89 为强相关, 大于 0.90 为非常强相关 (Schober et al., 2018)。所有统计学分析采用 SPSS 16.0 软件完成, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 研究结果

2.1 等速力量测试结果

等速力量测试结果显示, Q_{con} 为 $(151.73 \pm 26.86) N \cdot m$, H_{con} 为 $(88.73 \pm 18.13) N \cdot m$, H_{ecc} 为 $(171.20 \pm 28.24) N \cdot m$ 。 $H_{con} : Q_{con}$ 为 0.59 ± 0.12 , $H_{ecc} : Q_{con}$ 为 1.14 ± 0.16 。

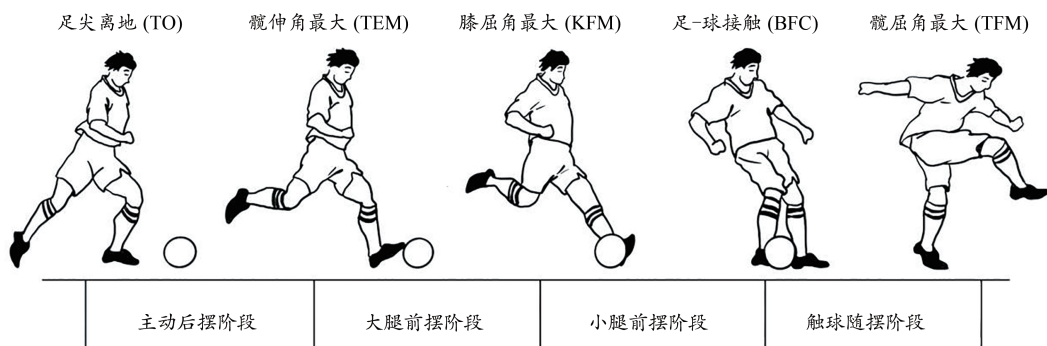


图3 正脚背踢球动作阶段

Figure 3. Instep Kicking Action Phases

注:TO.足尖离地(toe off),TEM.髋伸角最大(thigh extension max),KFM.膝屈角最大(knee flexion max),BFC.足-球接触(ball-foot contact),TFM.髋屈角最大(thigh flexion max);下同。

2.2 生物力学测试结果

正脚背踢球动作最大球速为(19.87±2.09)m/s;正脚背踢球动作中,主动后摆阶段占23.48%±5.77%,大腿前摆阶段占18.11%±4.65%,小腿前摆阶段占14.18%±3.12%,触球随摆阶段占44.21%±6.47%,踢球腿运动学参数见表1。

表1 踢球腿运动学参数

Table 1 Kinematic Parameters of Kicking Leg

关节	最大伸角/(°)	最大屈角/(°)	关节活动范围/(°)
髋关节	24.96±6.81	-68.93±21.71	93.89±21.58
膝关节	-5.82±6.32	92.72±9.32	98.54±12.50

正脚背踢球动作中,腓绳肌3块双关节肌标准化MTU长度从足尖离地开始逐渐减小,在踢球动作周期的41%左右开始增加,在踢球动作周期的80%左右达到峰值,之后缓慢减小直到动作结束(图4,表2);MTU拉伸速度在主动后摆阶段和大腿前摆阶段为负值,在小腿前摆阶段和触球随摆阶段为正值,在动作周期的55%左右达到峰值,之后逐渐减小,接近于0(图4)。结合肌电线性包络线(图5)发现,小腿前摆和触球随摆阶段腓绳肌在激活状态下被拉长,进行离心收缩。

触球随摆阶段,腓绳肌3块双关节肌最大标准化MTU长度显著大于小腿前摆阶段($P<0.001$);半腱肌、半膜肌最大MTU拉伸速度与小腿前摆阶段无显著差异($P=0.306$, $P=0.214$);股二头肌长头MTU拉伸速度显著大于小腿前摆阶段($P<0.001$;表3)。

根据腓绳肌肌电线性包络线结果,半腱肌和股二头肌长头在大腿前摆阶段和小腿前摆阶段激活程度低,在主动后摆阶段肌激活程度适中,在触球随摆阶段激活程度最高(图5)。

2.3 相关性分析结果

2.3.1 最大标准化MTU长度与下肢运动学参数

腓绳肌3块双关节肌最大标准化MTU长度与膝关节

最大伸角、膝关节活动范围无显著相关($P>0.05$),与髋关节最大屈角(半腱肌: $r=-0.713$, $P=0.003$;半膜肌: $r=-0.664$, $P=0.007$;股二头肌长头: $r=-0.688$, $P=0.005$)、髋关节活动范围(半腱肌: $r=0.618$, $P=0.014$;半膜肌: $r=0.596$, $P=0.019$;股二头肌长头: $r=0.592$, $P=0.020$)显著相关(表4)。

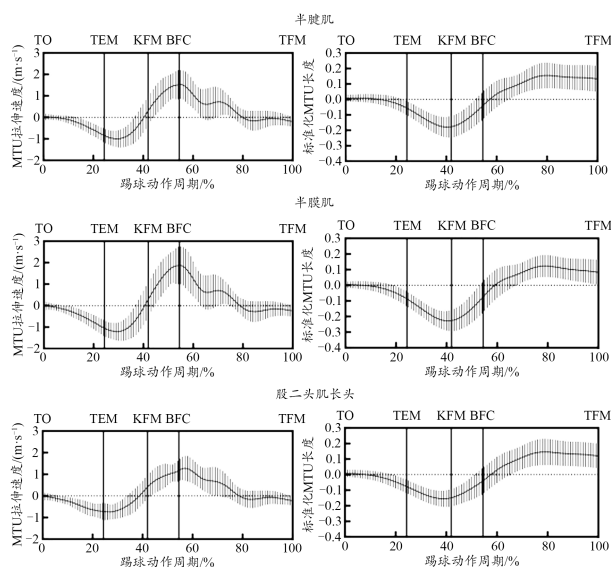


图4 腓绳肌MTU拉伸速度和标准化MTU长度

Figure 4. MTU Elongation Velocity and Normalized Length of Hamstring Muscle

注:标准化MTU长度的正负表示这一时刻MTU长度与站立标定时刻MTU长度的大小关系;下同。

2.3.2 肌肉力量素质与下肢运动学参数

H_{con} 、 H_{ecc} 、 H_{con} ; Q_{con} 和 H_{ecc} ; Q_{con} 与踢球腿下肢运动学参数无显著相关($P>0.05$), Q_{con} 与髋关节最大屈曲角($r=0.538$, $P=0.038$)、髋关节活动范围显著相关($r=-0.599$, $P=0.018$;表5)。

2.3.3 肌肉力量素质与最大标准化MTU长度

腓绳肌3块双关节肌最大标准化MTU长度与 Q_{con} 、

H_{con} 、 H_{ecc} 、 H_{con} : Q_{con} 无显著相关($P>0.05$),与 H_{ecc} : Q_{con} 显著相关(半腱肌: $r=0.679$, $P=0.005$;半膜肌: $r=0.724$, $P=0.002$;
股二头肌长头: $r=0.657$, $P=0.008$;表6)。

表2 两离心动作阶段最大MTU拉伸速度、最大标准化MTU长度出现时刻(%踢球动作周期)

Table 2 Occurrence Time of Maximum MTU Elongation Velocity and Maximum Normalized MTU Length in Two Eccentric Action Phases (% Kicking Action Cycle)

肌肉	最大MTU拉伸速度		最大标准化MTU长度	
	小腿前摆阶段	触球随摆阶段	小腿前摆阶段	触球随摆阶段
半腱肌	54.46±6.03	57.11±6.23	55.42±6.58	83.88±9.67
半膜肌	54.49±6.00	56.42±6.00	55.42±6.58	79.73±9.18
股二头肌长头	54.53±6.48	58.72±5.81	55.42±6.58	80.56±9.84

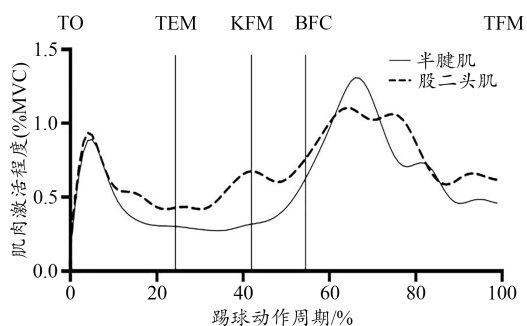


图5 踢球动作周期肌电线性包络线

Figure 5. EMG Linear Envelop in Kicking Action Cycle

注:MVC为最大肌力(maximum voluntary contraction)。

3 讨论

本研究发现,小腿前摆阶段和触球随摆阶段腓绳肌3块双关节肌均在激活状态下被拉长,进行离心收缩,但

触球随摆阶段MTU长度、激活程度均大于小腿前摆阶段。MTU长度在触球随摆阶段中期达到峰值,根据MTU长度和MTU应变的关系,推断此时MTU应变也达到峰值,触球随摆阶段可能是踢球动作中腓绳肌拉伤的危险时相,与前人研究结果一致(万祥林等,2019; Kenneally-Dabrowski et al., 2019; Yu et al., 2008)。

本研究结果表明,正脚背踢球动作中腓绳肌MTU长度为站立长度的1.12~1.16倍,腓绳肌最大MTU拉伸速度为1.71~2.47 m/s。前人研究发现,疾跑动作中腓绳肌MTU最大长度为站立标定时MTU长度的1.074~1.095倍(Thelen et al., 2005),腓绳肌最大肌肉拉伸速度为1.31~1.34 m/s(万祥林, 2017),股二头肌长头MTU长度达到站立时的1.12倍时会造成拉伤(Heiderschei et al., 2005)。据此推测,正脚背踢球动作中腓绳肌MTU最大长度和最大拉伸速度大于疾跑动作,这可能是造成更严重腓绳肌拉伤的原因之一。

表3 两离心动作阶段最大MTU拉伸速度和最大标准化MTU长度

Table 3 Maximum Elongation Velocity and Maximum Normalized MTU Length in Two Eccentric Action Phases

肌肉	生物力学参数	小腿前摆阶段	触球随摆阶段	P
半腱肌	最大MTU拉伸速度/($m \cdot s^{-1}$)	1.96±0.32	1.92±0.30	0.306
	最大标准化MTU长度	-0.03±0.04	0.16±0.07	<0.001
半膜肌	最大MTU拉伸速度/($m \cdot s^{-1}$)	2.42±0.41	2.35±0.37	0.214
	最大标准化MTU长度	-0.06±0.04	0.12±0.07	<0.001
股二头肌长头	最大MTU拉伸速度/($m \cdot s^{-1}$)	1.59±0.30	1.70±0.26	0.006
	最大标准化MTU长度	-0.04±0.04	0.15±0.07	0.001

表4 最大标准化MTU长度与下肢运动学参数的相关性

Table 4 Relationship between Maximum Normalized MTU Length and Kinematic Parameters of Lower Limbs

下肢运动学参数	半腱肌		半膜肌		股二头肌长头	
	r	P	r	P	r	P
髌关节最大屈角	-0.713*	0.003	-0.664*	0.007	-0.688*	0.005
髌关节活动范围	0.618*	0.014	0.596*	0.019	0.592*	0.020
膝关节最大伸角	0.505	0.055	0.475	0.073	0.468	0.078
膝关节活动范围	-0.193	0.492	-0.168	0.548	-0.148	0.600

注:* $P<0.05$;下同。

表 5 肌肉力量素质与下肢运动参数的相关性

Table 5 Relationship between Strength Ability and Kinematic Parameters of Lower Limbs

力量素质指标	最大髋屈角		髋关节活动范围		最大膝伸角		膝关节活动范围	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
Q_{con}	0.538*	0.038	-0.599*	0.018	0.082	0.771	0.222	0.426
H_{con}	0.090	0.750	-0.218	0.436	-0.199	0.476	-0.241	0.388
H_{ecc}	0.279	0.314	-0.273	0.324	0.213	0.446	0.195	0.485
$H_{con}:Q_{con}$	-0.357	0.191	0.277	0.317	-0.193	0.490	-0.378	0.165
$H_{ecc}:Q_{con}$	-0.416	0.123	0.495	0.061	0.215	0.443	-0.006	0.983

表 6 肌肉力量与最大标准化 MTU 长度的相关性

Table 6 Relationship between Muscle Strength and Maximum Normalized MTU Length

力量素质指标	半腱肌		半膜肌		股二头肌长头	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
Q_{con}	-0.427	0.113	-0.392	0.149	-0.346	0.206
H_{con}	0.033	0.906	0.018	0.951	0.131	0.643
H_{ecc}	0.105	0.709	0.168	0.549	0.164	0.560
$H_{con}:Q_{con}$	0.437	0.103	0.402	0.138	0.474	0.074
$H_{ecc}:Q_{con}$	0.679*	0.005	0.724*	0.002	0.657*	0.008

本研究表明,腓绳肌 3 块双关节肌最大标准化 MTU 长度只与 $H_{ecc}:Q_{con}$ 显著相关。有研究认为,腓绳肌力量较弱可能会增大疾跑摆动阶段膝伸的速度,从而增大小腿的惯性负荷,使腓绳肌被拉得更长(Opar et al., 2012),与本研究结果不一致。本研究显示, $H_{ecc}:Q_{con}$ 与腓绳肌最大标准化 MTU 长度呈正相关,表明运动员 $H_{ecc}:Q_{con}$ 越大,腓绳肌最大 MTU 长度越大。值得注意的是,这并不代表 $H_{ecc}:Q_{con}$ 越大的运动员腓绳肌损伤风险越大。肌肉应变是腓绳肌拉伤风险的敏感指标(Yu et al., 2017),而运动员腓绳肌 MTU 长度大并不等同于其腓绳肌肌肉应变更大。肌肉应变为肌肉长度相对静息长度(肌肉未产生被动张力时的长度)的增量与静息长度的比,在体肌肉的静息长度很难测量,有研究建议用最优化长度(肌力最大时的肌肉长度)代替静息长度(Kaufman et al., 1991),但因测算复杂(万祥林等, 2020),本研究未涉及。虽然本研究通过站立时 MTU 长度对腓绳肌 MTU 长度进行了标准化,但前人研究指出站立时腓绳肌 MTU 长度与腓绳肌最优化长度呈弱相关(Wan et al., 2017b)。因此,在未知最优化长度的情况下,本研究中较大的 MTU 长度并不等同于较大的 MTU 应变,所以并不能认为 $H_{ecc}:Q_{con}$ 越大,损伤风险越大。

本研究发现, $H_{ecc}:Q_{con}$ 与髋关节最大屈角呈负相关,髋关节最大屈角与腓绳肌最大标准化 MTU 长度呈负相关,提示较大的股四头肌力量(较小的 $H_{ecc}:Q_{con}$)可能会造成踢球动作中髋关节屈角变小,从而使腓绳肌最大标准化 MTU 长度变小。Pinniger 等(2000)同样发现,当疲劳使腓绳肌力量下降,即 $H_{ecc}:Q_{con}$ 变小后,疾跑动作髋屈角减小,并将这种现象解释为减小腓绳肌负荷的保护机制。综

上,推测 $H_{ecc}:Q_{con}$ 与腓绳肌长度的正相关关系也可能是身体的一种保护机制,以此减小腓绳肌制动下肢的负荷。但这一观点缺乏进一步证据,需后续探究 $H_{ecc}:Q_{con}$ 与腓绳肌最优化长度、腓绳肌肌肉应变的关系,进一步明确腓绳肌拉伤的危险因素。

4 结论

1) 正脚背踢球动作中,腓绳肌在触球随摆阶段进行离心收缩,被拉长到最大,在该阶段更易拉伤;2) 腓绳肌最大标准化 MTU 长度与 $H_{ecc}:Q_{con}$ 呈正相关,可能反应了身体的一种保护机制;3) 相比于 H_{con} 、 H_{ecc} 、 $H_{con}:Q_{con}$ 等力量素质指标,腓绳肌拉伤更可能与 $H_{ecc}:Q_{con}$ 有关。

参考文献:

部义峰,李世明,秦玉鹏,等,2007a. 不同踢球方式摆动腿的运动学与肌电信号特征研究[J]. 体育科学,27(12):27-32.
 部义峰,李世明,王前进,等,2010. 正脚背踢球技术摆动腿的动力学研究[J]. 北京体育大学学报,33(6):62-65,70.
 部义峰,李世明,熊安竹,等,2007b. 脚背内侧踢球摆动腿的运动学与肌电信号特征研究[J]. 体育科学,27(3):54-58.
 曹峰锐,2017. “腓绳肌离心收缩力矩/股四头肌向心收缩力矩”在预防腓绳肌运动性拉伤和膝关节前交叉韧带损伤方面的应用[J]. 中国体育科技,53(2):43-52,63.
 傅旭波,潘德运,余保玲,2021. 足球运动员脚内侧踢球支撑腿肌肉力量和跳跃能力对球速的影响[J]. 中国体育科技,57(5):62-70,77.
 韩经超,刘卉,2015. 运动员腓绳肌损伤危险因素的 Meta 分析[J]. 北京体育大学学报,38(2):79-86.
 蒋仲君,鲁梅,部义峰,2010. 足球运动踢球腿摆动阶段的不同时相

- 运动特征[J]. 体育学刊, 17(8):102-106.
- 谭恺,张春合,吕海龙,2019. Nordic Hamstring 跪姿前倾离心训练的生理效应及其对腘绳肌拉伤的预防效果[J]. 中国运动医学杂志, 38(7):601-610.
- 万祥林,2017. 柔韧和力量素质对疾跑中股后肌群生物力学特征的影响[D]. 北京:北京体育大学.
- 万祥林,刘卉,李翰君,等,2020. 在体股后肌群最优长度的测算方法[J]. 医用生物力学, 35(4):481-488.
- 万祥林,曲峰,刘卉,等,2019. 疾跑时股后肌群的生物力学特征:对拉伤危险时相的分析[J]. 中国体育科技, 55(2):70-75.
- 周林,章岚,2018. 足球运动员腘绳肌损伤研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 37(12):1038-1044.
- BROOKS J H M, FULLER C W, KEMP S P T, et al., 2006. Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union[J]. *Am J Sports Med*, 34(8):1297-1306.
- DELESTRAT A, GREGORY J, COHEN D, 2010. The use of the functional H:Q ratio to assess fatigue in soccer[J]. *Int J Sports Med*, 31(3):192-197.
- EKSTRAND J, HÄGGLUND M, WALDÉN M, 2011. Epidemiology of muscle injuries in professional football(soccer)[J]. *Am J Sports Med*, 39(6):1226-1232.
- FRECKLETON G, PIZZARI T, 2013. Risk factors for hamstring muscle strain injury in sport: A systematic review and meta-analysis[J]. *Brit J Sports Med*, 47(6):351-358.
- GABBE B J, 2005. Risk factors for hamstring injuries in community level Australian football[J]. *Brit J Sports Med*, 39(2):106-110.
- HÄGGLUND M, WALDÉN M, EKSTRAND J, 2013. Risk factors for lower extremity muscle injury in professional soccer: The UEFA injury study[J]. *Am J Sports Med*, 41(2):327-335.
- HEIDERSCHEIT B C, HOERTH D M, CHUMANOV E S, et al., 2005. Identifying the time of occurrence of a hamstring strain injury during treadmill running: A case study[J]. *Clin Biomech*, 20(10):1072-1078.
- HEIDERSCHEIT B C, SHERRY M A, SILDER A, et al., 2010. Hamstring strain injuries: Recommendations for diagnosis, rehabilitation, and injury prevention[J]. *J Orthop Sports Phys*, 40(2):67-81.
- KATIS A, KELLIS E, 2010. Three-dimensional kinematics and ground reaction forces during the instep and outstep soccer kicks in pubertal players[J]. *J Sports Sci*, 28(11):1233-1241.
- KAUFMAN K R, AN K N, LITCHY W J, et al., 1991. Physiological prediction of muscle forces: II. Application to isokinetic exercise[J]. *Neuroscience*, 40(3):793-804.
- KENNEALLY-DABROWSKI C J B, BROWN N A T, LAI A K M, et al., 2019. Late swing or early stance? A narrative review of hamstring injury mechanisms during high-speed running [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 29(8):1083-1091.
- NUNOME H, ASAI T, IKEGAMI Y, et al., 2002. Three-dimensional kinetic analysis of side-foot and instep soccer kicks [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 34(12):2028-2036.
- OPAR D A, WILLIAMS M D, SHIELD A J, 2012. Hamstring strain injuries: Factors that lead to injury and re-injury [J]. *Sports Med*, 42(3):209-226.
- OPAR D A, WILLIAMS M D, TIMMINS R G, et al., 2015. Eccentric hamstring strength and hamstring injury risk in Australian footballers [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 47(4):857-865.
- PALUCCI VIEIRA L H, SANTINELLI F B, CARLING C, et al., 2021. Acute effects of warm-up, exercise and recovery-related strategies on assessments of soccer kicking performance: A critical and systematic review [J]. *Sports Med*, 51:661-705.
- PINNIGER G J, STEELE J R, GROELLER H, 2000. Does fatigue induced by repeated dynamic efforts affect hamstring muscle function? [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 32(3):647-653.
- SANGNIER S, TOURNY-CHOLLET C, 2007. Comparison of the decrease in strength between hamstrings and quadriceps during isokinetic fatigue testing in semiprofessional soccer players [J]. *Int J Sports Med*, 28(11):952-957.
- SCHOBER P, BOER C, SCHWARTE L A, 2018. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation [J]. *Anesth Analg*, 126(5):1763-1768.
- THELEN D G, CHUMANOV E S, HOERTH D M, et al., 2005. Hamstring muscle kinematics during treadmill sprinting [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 37(1):108-114.
- VAN DYK N, BAHR R, WHITELEY R, et al., 2016. Hamstring and quadriceps isokinetic strength deficits are weak risk factors for hamstring strain injuries: A 4-year cohort study [J]. *Am J Sports Med*, 44(7):1789-1795.
- WAN X L, QU F, GARRETT W E, et al., 2017a. The effect of hamstring flexibility on peak hamstring muscle strain in sprinting [J]. *J Sport Health Sci*, 6(3):283-289.
- WAN X L, QU F, GARRETT W E, et al., 2017b. Relationships among hamstring muscle optimal length and hamstring flexibility and strength [J]. *J Sport Health Sci*, 6(3):275-282.
- 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, LIU H, GARRETT W E, 2017. Mechanism of hamstring muscle strain injury in sprinting [J]. *J Sport Health Sci*, 6(2):130-132.
- YU B, QUEEN R M, ABBEY A N, et al., 2008. Hamstring muscle kinematics and activation during overground sprinting [J]. *J Biomech*, 41(15):3121-3126.
- ZVIJAC J E, TORISCELLI T A, MERRICK S, et al., 2013. Isokinetic concentric quadriceps and hamstring strength variables from the NFL scouting combine are not predictive of hamstring injury in first-year professional football players [J]. *Am J Sports Med*, 41(7):1511-1518.

(收稿日期:2022-01-19; 修订日期:2022-03-20; 编辑:高天艾)