

文章编号:1004-7220(2021)05-0805-06

羽毛球运动员足踝落地瞬间生物力学特征与运动风险分析

赵文悦^{a,b}, 孟庆华^{a,b}, 鲍春雨^{b,c}

(天津体育学院 a. 体育教育与教育科学学院; b. 天津市运动生理与运动医学重点实验室; c. 社会体育与健康科学学院, 天津 301617)

摘要:目的 探讨羽毛球运动员足踝落地瞬间生物力学特征对运动风险的影响, 为避免初学者踝关节高频次、高强度触地发生运动风险提供参考。**方法** 采用三维测力台和动作捕捉系统, 对 30 名羽毛球运动初学者(实验组)和 30 名高水平运动员(对照组)在进行蹬转(1步)起跳动作时踝关节落地瞬间的运动学与动力学数据进行采集。**结果** 实验组跖屈背屈角度均显著小于对照组, 实验组内翻和内旋角度均显著大于对照组, 外翻和外旋角度不存在显著差异。实验组向左右方向力均显著大于对照组, 实验组与对照组前后方向力和垂直方向力不存在显著性差异。实验组外翻、外旋力矩均显著大于对照组, 对照组内旋力矩显著高于实验组。**结论** 相比初学者, 专业运动员踝关节运动具有良好的动态稳定性和灵活性, 左右方向较小的活动幅度和受力就可以完成缓冲任务, 并且专业运动员跖屈背屈角度增大, 也是良好训练效果的体现, 使缓冲时间稍微加长, 以防止踝关节突然落地时刻的冲击。

关键词: 羽毛球; 踝关节; 运动学; 地面反作用力; 运动风险

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.022

Biomechanical Characteristics and Sports Risk Analysis on Foot-Ankle Joints of Badminton Players at the Moment of Landing

ZHAO Wenyue^{a,b}, MENG Qinghua^{a,b}, BAO Chunyu^{b,c}

(a. College of Physical Education and Educational Sciences; b. Tianjin Key Laboratory of Sports Physiology and Sports Medicine; c. College of Social Sports and Health Sciences, Tianjin University of Sport, Tianjin 301617, China)

Abstract: Objective To explore the influence of biomechanical characteristics of badminton players on sports risk at the moment of foot and ankle landing, so as to provide references basis for avoiding the sports risk of high-frequency and high-intensity landing of ankle joint of beginners. **Methods** Using three-dimensional force measuring platform and motion capture system, the kinematic and dynamic data of 30 badminton beginners (experimental group) and 30 high-level athletes (control group) at the kick-off (1 step) moment during ankle landing were collected. **Results** The angles of metatarsal flexion and dorsiflexion in experimental group were significantly smaller than those in control group, and the angles of varus and internal rotation in experimental group were significantly larger than those in control group. The left-right forces in experimental group were significantly larger than those in control group, and there was no significant difference in anterior-posterior force and vertical force between experimental group and control group. The valgus and external rotation torque of

收稿日期:2020-11-03;修回日期:2020-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11372223,11102135),天津市自然科学基金重点项目(17JZDJJC36000,18JZDJJC35900)

通信作者:孟庆华,教授,E-mail:745112962@qq.com

experimental group were significantly higher than those of control group, and the internal rotation torque of control group was significantly higher than that of experimental group. **Conclusions** Compared with beginners, the ankle movement of professional athletes has good dynamic stability and flexibility, the cushioning task can be completed with a smaller range of movement and force in left-right direction, and the angle of metatarsal flexion and dorsiflexion of professional athletes is relatively increased. It is also the embodiment of good training effect, so that the buffer time is slightly longer to prevent the impact of sudden landing of the ankle.

Key words: badminton; knee joint; kinematics; ground reaction force; sports risk

踝关节损伤经常发生在运动员跳跃时的落地阶段,是下肢最常见的运动损伤之一,反复扭伤可能会导致运动性功能不稳^[1]。研究表明,相比羽毛球高水平运动员,初学者具有较高的踝关节运动损伤发生率^[2]。蹬转起跳击球动作是羽毛球运动员在训练和比赛中使用频率非常高的后场快速移动步法,表现为进攻性强、速度快,多以左后场蹬转(1步)起跳为主^[3]。本文在以往研究总结的羽毛球运动员损伤类型和预防方法的基础上,进一步通过运动生物力学测量方法,探讨可能与运动损伤有关的生物力学参数。Fong等^[4]通过使用光学捕捉系统与测力板对35名受试者膝关节进行生物力学评估,发现膝关节活动度(range of motion, ROM)与受力之间存在着显著的相关性,适当的角度变化是预防运动风险的重要条件。踝关节运动是远端环节向近端环节发生反应模式的体现,常表现出功能不稳^[5]。鉴于踝关节骨骼质量小、受重强度大,本文选用地面反作用力(ground reaction force, GRF)和关节ROM反映踝关节与地面之间的相互作用情况。踝关节运动损伤的产生往往与运动员跳起落地过程中机体所承受的地面冲击力极值有关,故检测GRF对认识踝关节损伤有着重要的作用^[6]。本文通过对比羽毛球运动初学者和高水平运动员落地动作中踝关节生物力学参数,确定可能与踝关节损伤有关的下肢生物力学参数,为避免初学者踝关节高频次、高强度触地发生运动风险提供参考。

根据研究目的,本文建立如下假设:①初学者落地过程中踝关节跖屈/背屈、内旋/外旋角度显著大于高水平运动员;②初学者落地过程中踝关节内翻/外翻力矩显著高于高水平运动员;③初学者落地过程中踝关节左右方向GRF显著大于高水平运动员。本文对上述假设进行检验,研究结果有助于

增强下肢关节运动过程中的动态稳定性,维持身体平衡,充分发挥运动系统的效能,对保持运动安全性提供一些参考。

1 研究对象与方法

1.1 受试者资料

受试者为60名羽毛球男子运动员。对照组为高水平运动员30人,包括1级9人,2级21人,年龄(20.57±1.77)岁,身高(177.83±4.88)cm,体质量(70.60±7.99)kg;实验组为羽毛球初学者30人,年龄(22.07±0.70)岁,身高(173.67±4.23)cm,体质量(69.13±4.24)kg,均为右手持拍。所有受试者1年内均无疾病损伤史。参与实验前,受试者均了解测试动作,并签署知情同意书。

1.2 实验方法

采用8镜头Qualisys红外光点高速运动捕捉测试系统(MCU 500,Qualisys公司,瑞典)和Kistler三维测力台(9281B,Kistler公司,瑞典)在天津体育学院运动损伤与康复虚拟仿真实验室进行测量,录制范围5m,红外摄像头高度2.0m,以240帧/s拍摄频率与测力台同步进行数据采集,标记点主要贴在受试者踝关节内踝内侧突、外踝外侧突、跟骨跟腱止点及第1跖骨头背缘、第2跖骨头背侧、第5跖骨头背缘处。本文重点考察羽毛球运动员蹬转(1步)起跳动作落地瞬间到缓冲结束阶段踝关节ROM和不同方向受力的差异变化。每名运动员分别做3次技术动作,取3次有效测试结果的平均值。考虑到急性踝关节损伤的易发性^[7],在实验室环境中采集该动作的生物力学参数,由科研助理、教练员均按照羽毛球规则进行测试,以尽量达到与真实比赛环境中相同的运动速度与强度,为后期康复人员设计具有针对性的运动处方提供理论依据。

1.3 统计学分析

使用 Qualisys Track Manager (QTM) 和 Visual 3D 软件对原始数据进行处理,导出与踝关节对应标志点的三维空间坐标及有关运动参数;对处理后的数据进行平滑处理,再对基本的运动学数据进行计算与整理后,导出数据。采用 SPSS 26.0 进行数据分析,计算各参数指标的平均值和标准差,同时对原始数据进行 z-score 标准化,数据均服从以 0 为均值、1 为标准差的标准正态分布。采用独立样本 *t* 检验, $P < 0.05$ 表示差异具有显著性意义, $P < 0.001$ 表示差异具有非常显著性意义。

2 研究结果

2.1 运动学参数

表 1 所示为受试者踝关节最大屈曲角度。对照组背屈和跖屈峰值分别为 9.17° 、 18.39° ,实验组背屈峰值和跖屈峰值均小于对照组。两组受试者关节 ROM 从踝关节落地瞬间到缓冲完毕均有较大

幅度的变化。与对照组相比,实验组背屈、跖屈峰值角度分别下降 33%、23% [见图 1(a)]。将内翻与外翻角度变化特征定义为 0% ~ 50% 和 50% ~ 100% 两个阶段。在第 1 阶段,同等测试条件下实验组内翻角度从 8.78° 开始大幅度下降,与对照组形成鲜明对比;10% ~ 20% 阶段,受试者开始做外翻运动,对照组和实验组分别从 0° 分别增加到峰值 3.64° 、 3.52° 。在第 2 阶段,与对照组相比,实验组内翻角度峰值已经达到 9.14° ,而对照组为 3.69° ,两组受试者几乎只有内翻角度发生变化 [见图 1(b)]。对照组足踝关节整体 ROM 小于实验组,较实验组呈现出更趋于稳定的动态趋势。实验组的内旋峰值角度为 19.36° ,比对照组峰值角度 (12.42°) 高出约 36%。在整个缓冲阶段,主要显示出足踝关节的内旋运动,角度变化范围为 $9.50^\circ \sim 19.36^\circ$,没有进行外旋运动,而对照组进行了一小段波动的外旋运动 [见图 1(c)]。

表 1 受试者踝关节最大屈曲角度

Tab.1 Maximum ankle flexion angle of the subjects

组别	屈曲角度/ ($^\circ$)					
	背屈	跖屈	内翻	外翻	内旋	外旋
实验组	4.40 ± 2.09	8.29 ± 4.67	4.70 ± 6.71	2.51 ± 9.62	13.52 ± 2.07	0
对照组	5.70 ± 2.80	10.42 ± 6.10	2.34 ± 7.75	2.40 ± 1.02	5.46 ± 3.24	1.95 ± 1.01
<i>P</i>	< 0.05	< 0.05	< 0.001	> 0.05	< 0.001	

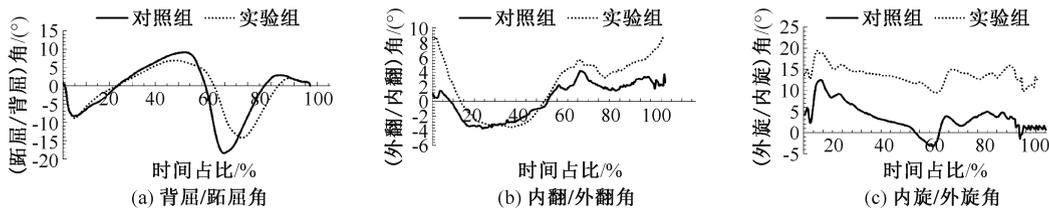


图 1 左足落地瞬间到缓冲结束阶段踝关节角度与时间百分比曲线

Fig.1 Ankle angle-time percentage curve from the moment of left foot landing to the end of buffering

(a) Flexion-dorsiflexion angle, (b) Varus-valgus angle, (c) External-internal rotation angle

2.2 动力学参数

表 2 所示为受试者踝关节不同方向受力情况。图 2 显示了两组受试者不同方向的受力程度。踝关节落地瞬间,对照组与实验组分别做了积极的缓冲,前后方向力峰值力分别达 2.85 、 2.53 N/kg [见图 2(a)]。受力均从约 20% 阶段

开始增加,同时在运动员刚开始进行缓冲时,实验组相比对照组显示出受力不稳。可以观察到,两组受试者左右方向力在 30% ~ 50% 阶段存在明显的差异性,此阶段对照组的平均受力约为 2.04 N/kg,比实验组平均受力 (1.62 N/kg) 高出约 21%,左右方向力变化与前后方向力缓冲主要

阶段变化相似,只是实验组在20%~50%阶段表现出较大的左右方向力[见图2(b)]。此外,对照组、实验组踝关节垂直方向受力峰值力分别达11.18、9.56 N/kg。对照组踝关节在约20%和57%时刻出现两个小波峰,而实验组曲线呈平坦变化[见图2(c)]。

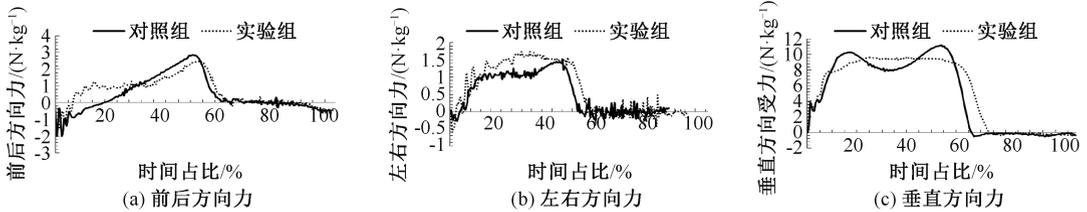


图2 左足落地瞬间到缓冲结束阶段踝关节不同方向力与时间百分比曲线

Fig.2 Force in different directions-time percentage curve from the moment of left foot landing to the end of buffering (a) Anterior-posterior force, (b) Left-right force, (c) Vertical force

2.3 关节力矩

表3对比了两组受试者踝关节不同角度的力矩。对照组和实验组左踝关节矢状面峰值力矩小于冠状面、水平面的峰值力矩,矢状面和冠状面关节ROM相似。对照组、实验组跖屈峰值力矩绝对值分别为1.36、1.48 N·m/kg,对照组、实验组外翻峰值力矩绝对值分别为0.19、0.22 N·m/kg。当踝关节力矩随着旋转角度的增加而增大时,在达到峰值后迅速减小,两组受试者跖屈和外翻力矩变化从开始大幅度增加,直到达到峰值,与地面形成的反作用力最大,说明踝关节完成了急性的制动。此外,对照组内旋、外旋力矩较实验组变化幅度趋于平缓,ROM在1°之间,而相比之下实验组的外旋力矩过大,差异有显著意义($P<0.05$)。

表3 受试者踝关节不同角度力矩

Tab.3 Torque of the subjects at different ankle angles

参数	单位:(N·m)·kg ⁻¹		
	对照组	实验组	P
跖屈力矩	0.69±0.50	0.69±0.46	>0.05
外翻力矩	0.08±0.07	0.11±0.07	<0.05
内旋力矩	0.07±0.02	0.03±0.03	<0.05
外旋力矩	0.05±0.32	0.16±0.11	<0.05
跖屈峰值力矩	1.36	1.48	
外翻峰值力矩	0.19	0.22	
内旋峰值力矩	0.10	0.11	
外旋峰值力矩	0.09	0.32	

表2 受试者踝关节不同方向受力

Tab.2 Ankle force of the subjects in different directions

组别	F/(N·kg ⁻¹)				
	向前方向	向后方向	向左方向	向右方向	垂直方向
实验组	0.74±0.67	0.96±0.74	0.41±0.19	1.32±0.35	1.32±0.35
对照组	0.64±0.51	1.30±9.14	0.18±0.08	0.99±0.35	8.13±2.63
P	>0.05	>0.05	<0.05	<0.05	>0.05

3 讨论

3.1 运动学特征

踝关节损伤是体育运动中最常见的损伤,剧烈运动时踝关节损伤约占25%,同时大多数运动项目的运动损伤涉及踝关节外侧韧带。研究表明,动力稳定性下降、姿势控制、踝关节背屈、脚踝力量等是踝关节损伤的潜在危险因素。虽然利用平衡训练对感觉运动系统进行干预可有效降低运动风险,但由于踝关节仍存在一系列运动不当的因素,还是会导致一些运动损伤的发生。当踝关节触地时,其形态的预备阶段在踝关节损伤机制中发挥重要的作用。踝关节扭伤时,每一个角度的运动对腓神经激活程度相对较高,有可能增加扭伤的风险。从损伤机制的角度来看,重点需要观察着地阶段的屈曲角度。本文研究表明,对照组和实验组足踝关节三轴方向的机械角度表现出明显的差异性。当足部接触到地面,踝关节突然内旋时,为了防止踝关节外侧韧带出现损伤,必须加强对踝关节的控制。且姿势稳定性被认为是预防损伤的重要内在因素之一,故应该结合关节着地时的运动学变化来评估动态稳定性,这也符合羽毛球运动步法中足部落地时要稍微外展的要求。本文主要通过生物力学测量方法根据所测试的生物力学参数探析踝关节真实损伤的原因。研究发现,踝关节受伤时,承受更多的

是内旋运动,内旋运动会使压力中心(center of pressure, COP)侧移,也被认为是踝关节损伤的一个重要因素。此外,适当程度的矢状面位移可能会增加对骨稳定性的依赖,减少外侧韧带的松弛,降低发生运动风险的可能。Kristianslund等^[8]研究发现,当踝关节翻转和内旋角度突然增加并达到载荷时,可能会超过损伤阈值,造成运动风险。

3.2 动力学特征与关节力矩

在踝关节生物力学参数改变的过程中,会伴随着力学性能的变化,可能会对其作为下肢最先受力的远端踝环节造成冲击。之后,在较高的运动速度下,可以观察到“足踝触地”的运动模式,踝关节的内部旋转运动力矩臂加长。由于力矩是GRF和力矩臂的乘积,故应该适当地增加力矩。足踝关节由小腿和脚组成,并形成运动连接,与地面产生相互作用。小腿腓骨不活跃可能是损伤发生的原因,运动前需提前激活腓肌以保护踝关节。本文结果表明,对照组和实验组跖屈/背屈力矩和外翻/内翻力矩的ROM呈相似的态势,而外旋/内旋力矩表现出明显的不同。对照组从落地时轻微的内旋力矩过渡到小幅度的外旋力矩,表明运动员在击球后进行充分的转体,使躯干通过下肢的蹬转,扭转到正对球网方向,有助于与下一拍球的连接。实验组表现出从较小的内旋力矩过渡到较大的外旋力矩,力矩的突然增大,也使得实验组左右方向力明显大于对照组。从运动技术上分析,可能是击球后足踝关节过度地向身体左侧扭转,导致力矩过量增加,过大的力矩扭转不利于发力,导致体能消耗。尽管踝关节韧带和骨性结构使其拥有高度的稳定性,但在踝关节的高速运动中,还是会因不同方向力而产生形变。从解剖角度来看,足踝关节由跟距骨、胫距骨和横距骨关节组成,三者形成一个三平面的多轴关节。踝关节的内侧面由内侧副韧带支撑,是抵制关节内翻和外翻左右方向力的关键。本文发现,相比对照组,实验组表现出较大的力矩和力,提示实验组在缓冲时刻时承受了较大的力,内侧副韧带发生形变的程度比对照组高,可能会导致运动损伤。两组间踝关节受力的主要差异还是在垂直方向上,载荷分布从前脚掌过渡到后脚跟,内侧关节在发生内旋时承受的载荷最高,外侧关节在外翻时承受的负荷最大。

3.3 运动风险

运动中损伤风险最大的影响取决于运动本身的性质。蹬转起跳动作作为羽毛球运动员后场最典型的落地接触性运动,其不稳定性作为损伤的一个危险因素,损伤风险的增加表现为足底外翻与倒转强度之比增加,足底屈曲强度增加,足背屈与足底屈曲之比降低。为了保证运动员落地后下一个动作的衔接,优化着陆姿势也是积极采取的一种自我保护性机制。本文结果表明,对照组踝关节角度和关节力矩对关节稳定性有明显的影响。Fong等^[9]研究发现,羽毛球运动员增加与地面接触时的踝关节扭转角,可能会增加踝关节外侧损伤的风险,特别是由于初始接触时COP位置的偏移。本文发现,两组受试者左右方向力和前后方向力表现出明显的不同,实验组在起始阶段要显著高于对照组,实验组增加踝关节足部接触时过大的角度和COP偏移,意味着踝关节扭伤的风险增加;而相对来说,对照组的运动风险降低。如果运动员缺少长期的科学训练,导致对于运动技术上的认知程度不够,动作容易偏离运动生物力学原理,且不符合解剖学结构,从而导致踝关节损伤的发生。研究表明,采用平衡训练可作为踝关节康复训练方案的一部分,并且与不同活动踝关节受伤的风险程度显著相关,平衡、跳跃、着陆和敏捷性等练习,会使踝关节的损伤明显减少。因此,也可将这些训练内容设为准备活动内容的一部分。

4 结论

本文通过分析60名羽毛球运动员蹬转(1步)起跳击球动作踝关节落地生物力学特征发现,相比初学者,专业运动员踝关节运动具有良好的动态稳定性和灵活性,左右方向较小的活动幅度和受力就可以完成缓冲任务,并且专业运动员跖屈背屈角度较大,也是良好训练效果的体现,使缓冲时间稍微加长,以防止踝关节突然落地时刻的冲击。两组受试者即使在踝关节的解剖和发力结构上个体差异间很相似,但是在与GRF和关节ROM之间存在着明显的差异。由于训练年限和训练程度不同,专业运动员表现出更好的稳定性和功能性。因此,初学者在进行下肢步法训练时,教练员有必要设计针对腓骨肌群和踝关节外侧韧带

的专项运动处方,以肌肉激活来适应中枢神经的兴奋性,根据生物力学原理和人体结构采用符合自己的运动技术,加强快速启动和落地时的协调性。后续研究可结合肌电测试来分析踝关节的动作模式。

参考文献:

- [1] BROCKETT CL, CHAPMAN GJ. Biomechanics of the ankle [J]. *Orthop Trauma*, 2016, 30(3): 232-238.
- [2] 陈宏.羽毛球运动损伤的研究现状及内容分析[J]. *福建体育科技*, 2019, 38(4): 49-53.
- [3] 魏勇, 刘宇, 傅维杰. 羽毛球运动步法分类及使用频率[J]. *上海体育学院学报*, 2008, 32(5): 54-56.
- [4] FONG CM, BLACKBURN JT, NORCROSS MF, *et al.*

Ankle-dorsiflexion range of motion and landing biomechanics [J]. *J Athl Train*, 2011, 46(1): 5-10.

- [5] 刘展. 人体动作模式和运动链的理念在运动损伤防护和康复中的应用[J]. *成都体育学院学报*, 2016, 42(6): 1-11.
- [6] 赵勇, 王钢. 踝关节扭伤的生物力学与运动学研究进展[J]. *中国骨伤*, 2015, 28(4): 374-377.
- [7] 王琳珏. 急性踝关节扭伤的治疗进展[J]. *中医正骨*, 2014, 26(3): 67-68.
- [8] KRISTIANSLUND E, BAHR R, KROSSHAUG T. Kinematics and kinetics of an accidental lateral ankle sprain [J]. *J Biomech*, 2011, 44(14): 2576-2578.
- [9] FONG DTP, HONG Y, SHIMA Y, *et al.* Biomechanics of supination ankle sprain: A case report of an accidental injury event in the laboratory [J]. *Am J Sports Med*, 2009, 37(4): 822-827.