

文章编号: 1004-7220(2023)06-1127-07

非预期条件下前交叉韧带重建术后运动员 侧切动作下肢运动生物力学特征

张嘉源^{1#}, 马小远^{2#}, 周志鹏¹, 鲁林涛², 陈岩¹, 宋祺鹏¹, 戴国锋², 王呈², 孙威¹
(1. 山东体育学院 运动与健康学院, 济南 250102; 2. 山东大学齐鲁医院 骨科; 关节和运动医学科, 济南 250012)

摘要:目的 量化非预期条件下前交叉韧带重建(anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR)术后运动员侧切动作中膝关节生物力学特征,探讨运动员前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)损伤潜在风险。方法 应用红外运动捕捉系统和三维测力台同步采集30名 ACLR 男性运动员在预期和非预期条件下侧切动作中健侧、患侧下肢运动学和动力学数据。应用双因素方差分析对关节角度、关节力矩、地面反作用力(ground reaction force, GRF)等测试指标进行统计分析。结果 患侧肢体的膝关节屈曲角度、外翻力矩和屈曲力矩显著低于健侧肢体,内旋力矩和胫骨前剪切力显著高于健侧肢体。与预期条件相比,非预期条件下膝关节屈曲角度、内旋力矩、胫骨前剪切力显著增加。患侧肢体膝关节外旋角度在预期和非预期条件下均显著高于健侧,非预期条件下健侧肢体侧向 GRF 和前后 GRF 显著小于预期条件,患侧肢体侧向 GRF 显著高于预期条件。结论 ACLR 运动员进行侧切动作时,相比于健侧,患侧表现出较小的膝关节屈曲角度,较大的膝关节内旋力矩和胫骨前剪切力的生物力学特征,可能存在较大的 ACL 潜在损伤风险;在非预期条件下,ACLR 运动员双侧下肢均表现出膝关节内旋力矩增大,侧向 GRF 增大和胫骨前剪切力增大的生物力学特征,提示 ACL 潜在损伤风险不仅限于患侧,健侧下肢也应加强侧切动作中 ACL 损伤预防。

关键词: 前交叉韧带; 侧切; 非预期条件; 运动学; 动力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.06.011

Biomechanical Characteristics of Lower Limb for Athletes with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction During Side Cutting under Unanticipated Condition

ZHANG Jiayuan^{1#}, MA Xiaoyuan^{2#}, ZHOU Zhipeng¹, LU Lintao², CHEN Yan¹, SONG Qipeng¹, DAI Guofeng², WANG Cheng², SUN Wei¹

(1. College of Sports and Health, Shandong Sport University, Ji'nan 250102, China; 2. Department of Orthopedics; Department of Joint and Sports Medicine, Qilu Hospital of Shandong University, Ji'nan 250012, China)

Abstract: Objective To quantify biomechanical characteristics of knee joints for athletes after anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR) surgery during side cutting under unanticipated conditions, and to investigate the potential risk of anterior cruciate ligament (ACL) injury in athletes. **Methods** The infrared motion capture system

收稿日期: 2023-03-20; 修回日期: 2023-05-14

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019BH008, ZR2021MH225), 山东省大学生创新训练计划(S202210457001)

通信作者: 孙威, 副教授, E-mail: sunwei841024@163.com

#为共同第一作者

and three-dimensional (3D) force platform were used to collect the kinematic and kinetic data of lower limbs of 30 male athletes with ACLR during side cutting under anticipated and unanticipated conditions. The angle, moment, ground reaction force (GRF) and other test parameters were analyzed statistically by using two-way ANOVA with repeated measures. **Results** The knee flexion angle, valgus moment and flexion moment of the affected limb were significantly lower than those of the healthy limb. The internal rotation moment and tibial anterior shear force of the affected limb were significantly higher than those of the healthy limb. Compared with the anticipated conditions, the knee flexion angle, internal rotation moment and tibial anterior shear force significantly increased under unanticipated conditions. The knee external rotation angle of the affected limb was significantly larger than that of the healthy limb under both anticipated and unanticipated conditions. Under unanticipated conditions, the lateral GRF and anterior-posterior GRF of the unaffected limb were significantly lower than those under anticipated conditions, and the lateral GRF of the affected limb was significantly higher than that under anticipated conditions. **Conclusions** Compared with the healthy limb, the affected limb of athletes with ACLR showed biomechanical characteristics of smaller knee flexion angle, larger knee internal rotation moment and anterior tibial shear force during side cutting, indicating that the affected limb might have a greater potential risk of ACL injury. Under unanticipated conditions, both lower limbs of athletes with ACLR showed biomechanical characteristics of increased knee internal rotation moment, lateral GRF and anterior tibial shear force, indicating that the potential risk of ACL injury is not limited to the affected limb, and ACL injury prevention should also be strengthened in healthy lower limb during side cutting.

Key words: anterior cruciate ligament; side cutting; unanticipated condition; kinematics; kinetics

前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 损伤是最常见的下肢运动损伤之一, 常见于篮球、足球等运动, 70% 的运动员在 ACL 损伤后 1 年内不能恢复到损伤前的运动能力^[1]。前交叉韧带重建 (anterior cruciate ligament reconstruction, ACLR) 术后的运动员中约 1/3 患侧会发生 ACL 再次损伤^[2]。ACLR 术后重返赛场运动员再次发生 ACL 损伤的概率增加了 7 倍^[3]。因此, 探讨 ACLR 运动员下肢生物力学特征为 ACL 的损伤预防提供重要参考。

侧切动作是导致 ACL 损伤的重要危险因素, 约 70% 的 ACL 损伤发生在侧切、横切等急速转向动作中^[4-6]。侧切是运动员在训练或赛场上快速变向的方式之一, 需要运动员在快速助跑后急速减速、变向, 导致膝关节伸展并伴有外翻、内外旋^[7]。研究显示, 男性足球运动员着地初期的膝关节屈角显著大于女性运动员, 且膝关节内翻外翻角度也有显著的性别差异^[8-9]。人体在侧切动作中下肢瞬时加速度峰值急剧增大, 膝关节外翻角度、外翻力矩及内外旋力矩增加, 造成 ACL 承受过大的剪切力, 从而增加 ACL 损伤的风险^[10-11]。

预期条件下, ACLR 运动员侧切动作中相比于受伤前, 患侧膝关节屈曲角度、内旋角度、内旋力矩

显著较低, ACL 载荷、膝关节内翻力矩显著较大^[12]。ACLR 运动员在 90° 变向动作测试中, 患侧肢体相比于健侧, 膝关节外翻力矩、外旋力矩、外翻角度、内旋角度显著较小^[13]。上述研究表明, ACLR 运动员侧切动作中患侧膝关节仍存在较大 ACL 载荷, 以及较大的膝关节外翻角度和外翻力矩, 具有二次损伤风险。因此, 分析 ACLR 运动员侧切动作的生物力学特性, 有助于了解 ACL 损伤原因, 为损伤预防及训练提供一定的参考。

现有 ACL 损伤风险研究多集中在预期条件下侧切动作的生物力学分析, 然而在体育比赛中, 运动员不得不在没有充分准备的非预期情况下完成侧切动作, 故非预期条件比预期条件更能模拟体育比赛中瞬息变化的真实场景。研究表明, 与预期条件相比, 健康足球运动员在非预期条件下完成侧切时会受到更大的侧向地面反作用力 (ground reaction force, GRF), 初始接触时膝关节外翻角度更大, 在缓冲阶段表现出更大的膝关节外翻角度和膝关节内旋角度^[14-17]。上述生物力学特征表明, 健康人群在非预期条件下进行侧切动作可能会增加 ACL 非接触性损伤的风险。

综上所述, 以往研究局限于健康人在预期和非

预期条件下侧切时的生物力学分析,目前缺乏对 ACLR 运动员非预期条件下侧切动作的生物力学研究。本文通过对比 ACLR 运动员健侧与患侧在预期与非预期条件下 45°侧切动作的生物力学差异,探讨运动员 ACL 损伤风险,为运动员 ACL 损伤预防提供数据与理论支持。

1 研究方法

1.1 受试者

招募 30 名男性 ACLR 受试者,年龄 (29.0 ± 6.5) 岁,身高 (182.9 ± 8.4) cm,体质量 (81.4 ± 9.4) kg;身体质量指数 (body mass index, BMI) 为 (24.4 ± 3.1) kg/m^2 ; ACL 损伤至手术时间间隔为 (15.7 ± 3.8) d, ACLR 手术至测试时间为 (9.6 ± 2.2) 月;训练年限为 (12.2 ± 3.2) 年;训练项目包括篮球 19 人、足球 11 人;运动等级为全国专业二级以上。纳入标准:① 18~40 岁;② Tegner 评分 ≥ 5 ;③ 单侧 ACL 损伤,完成自体半腱肌或股薄肌肌腱移植术;④ ACLR 术后 6~12 个月。排除标准:① 合并后交叉韧带断裂;② 合并膝关节侧副韧带损伤;③ 合并关节腔内其他疾病者,如结核、感染等疾病;④ 色弱或色盲;⑤ 存在临床相关心血管病史。所有受试者均签署知情同意书,研究得到山东体育学院科研伦理委员会的批准。

1.2 测试仪器

1.2.1 三维动作捕捉系统 应用 Vicon 红外运动捕捉系统 (Vicon 公司,英国),以 100 Hz 频率采集运动学数据。

1.2.2 三维测力系统 应用 Kistler 测力台 (9281CA, 90 cm \times 60 cm \times 10 cm, Kistler 公司,瑞士),以 1 kHz 频率采集 GRF。

1.2.3 同步采集 应用 Vicon Nexus 1.7.1 建立全局坐标系,同步采集运动学及 GRF 原始数据。

1.2.4 非预期场景模拟系统 利用红外光栅阻断系统来设置非预期条件,该装置分为红外发射器、红外接收器和红、绿信号灯三部分。其中,红外发射和接收设备分别放置在跑道两侧,测力台中心后 3 m 处。红、绿信号灯放置在测力台边缘前方 4 m 处。当受试者阻断红外光栅时,会触发红、绿信号灯随机亮起,模拟非预期实验环境 (见图 1)。

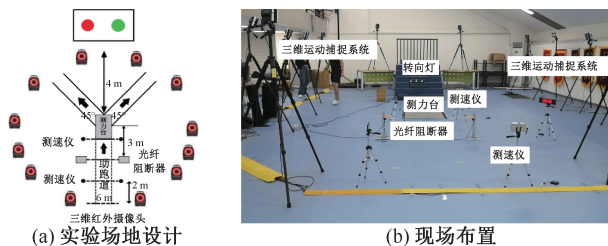
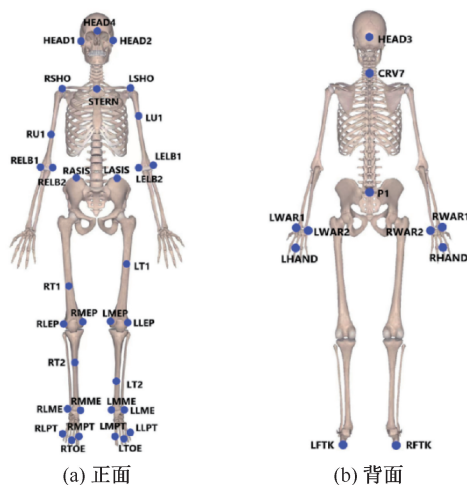


图 1 实验场地

Fig. 1 Testing site (a) Testing site design, (b) Site layout

1.3 测试方案

受试者更换统一测试服、测试鞋,并进行 10 min 热身,按照标准粘贴 43 个直径 14 mm 的红外反光球 (见图 2)。每名受试者将随机完成预期和非预期两种条件下的侧切动作测试。在预期条件下进行侧切测试时,受试者先完成 6 m 助跑,再按照测试人员提前指定的转向方向主动完成向左或向右 45°侧切动作测试各 5 次。在非预期条件下进行侧切测试时,受试者助跑后通过触发的随机信号灯颜色,快速判断并即时完成向左 45°侧切 (红灯亮) 或向右 45°侧切 (绿灯亮) 动作测试各 5 次。应用红外计时器控制受试者的助跑速度为 (3.5 ± 0.5) m/s ^[18],以降低速度造成的误差。



(a) 正面

(b) 背面

图 2 标记球位置

Fig. 2 Marker positions (a) Front view, (b) Back view

1.4 数据处理

侧切动作周期定义为支撑脚着地时刻至脚尖离地时刻 (见图 3)。着地定义为脚接触测力台后垂直 GRF 超过 20 N^[19]。运动学与动力学原始数据分

别以 10 Hz^[20] 和 50 Hz^[21] 进行 Butterworth 四阶低通滤波。测试指标包括触地时刻、侧向 GRF 峰值时刻的三维方向的膝关节角度、关节力矩、GRF、胫骨剪切力及其侧切动作中各指标峰值等,其中动力学指标以体重进行标准化处理。GRF 正值分别表示垂直向上、左侧向、前向。膝关节运动学和动力学指标正负号按右手螺旋法则确定,正号(+)表示膝关节伸展、外翻、外旋。

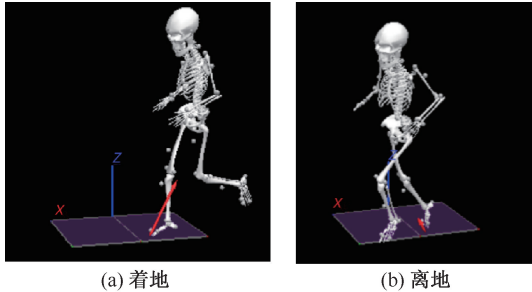


图3 支撑脚着地和离地动作模拟

Fig. 3 Motion simulation on landing and push-off of the support foot (a) Landing, (b) Push-off

1.5 统计学分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。对肢体自变量(健侧、患侧)和条件自变量(预期、非预期条件)进行双因素重复测量方差分析,以比较预期和非预期侧切动作时双下肢之间的运动学和动力学差异。如果两个自变量的交互作用存在显著性,则使用 Bonferroni 调整的事后检验进行两两比较。所有结果均以平均值±标准差表示,显著性水平设为 0.05。

2 研究结果

2.1 预期与非预期条件下侧切动作健患侧下肢运动学结果

肢体主效应结果表明,患侧肢体的膝关节屈曲角度显著低于健侧肢体,外旋角度显著高于健侧肢体,健患侧膝关节外翻角度差异无统计学意义;预期主效应结果表明,与预期条件相比,非预期条件下膝关节屈曲角度显著增加,膝关节外翻角度、外旋角度差异无统计学意义(见表1)。

肢体主效应结果表明,患侧肢体的峰值膝关节屈曲角度显著低于健侧肢体;健患侧峰值外翻角度差异无统计学意义。预期主效应结果表明,与预期

表1 触地时刻膝关节角度

Tab. 1 Knee joint angles at the moment of foot landing

肢体	条件	角度/(°)		
		屈伸	内/外翻	内/外旋
健侧	预期	-20.38±5.39	3.70±3.51	3.07±9.08
	非预期	-24.69±9.66	4.24±5.18	3.63±7.69
患侧	预期	-18.89±5.84	2.53±4.03	12.45±9.00
	非预期	-20.78±6.55	2.00±4.42	13.32±10.13
肢体效应 <i>P</i>		0.038	0.053	<0.001
条件效应 <i>P</i>		0.018	0.993	0.663
肢体×条件效应 <i>P</i>		0.350	0.500	0.926

条件相比,非预期条件下峰值膝关节屈曲角度显著较大,峰值外翻角度差异无统计学意义。侧切动作中膝关节峰值外旋角度存在显著的交互效应,事后分析结果表明,患侧肢体角度在预期与非预期条件下均显著高于健侧(见表2)。

表2 侧切动作中膝关节角度峰值

Tab. 2 Peak knee joint angle during side cutting

肢体	条件	角度/(°)		
		屈伸	内/外翻	内/外旋
健侧	预期	-43.60±9.08	10.53±6.17	10.84±3.96
	非预期	-46.78±10.02	12.35±5.65	9.89±2.92
患侧	预期	-39.41±8.05	8.07±4.76	15.46±6.53*
	非预期	-43.60±5.34	8.11±6.77	18.43±7.13*
肢体效应 <i>P</i>		0.017	0.052	<0.001
条件效应 <i>P</i>		0.017	0.389	0.309
肢体×条件效应 <i>P</i>		0.741	0.409	0.049

注:* 健患侧肢体比较, *P*<0.05。

2.2 预期与非预期条件下侧切动作健患侧下肢动力学结果

肢体主效应结果表明,患侧肢体的峰值膝关节屈曲力矩和膝关节外翻力矩显著低于健侧肢体,峰值膝关节内旋力矩、胫骨前剪切力均显著高于健侧肢体。条件主效应结果表明,与预期条件相比,非预期条件下峰值膝关节外旋力矩、胫骨前剪切力、峰值膝关节屈曲力矩显著较大,峰值膝关节外翻力矩差异无统计学意义。峰值侧向 GRF 与前后 GRF 存在显著的交互作用,事后分析结果表明,健侧肢体侧切动作中非预期条件下峰值侧向 GRF、前后 GRF 显著小于预期条件;非预期条件下患侧峰值侧向 GRF 显著高于预期条件(见表3)。

表3 侧切动作中下肢动力学指标峰值

Tab. 3 Peak of kinetic parameters of lower limbs during side cutting

指标	健侧		患侧		肢体 效应 P	条件 效应 P	肢体×条件 效应 P
	预期	非预期	预期	非预期			
膝屈/伸力矩/ $[(N \cdot m) \cdot kg^{-1}]$	-2.09±0.52	-2.58±0.66	-1.35±0.70	-1.86±0.45	<0.001	<0.001	0.955
膝内/外翻力矩/ $[(N \cdot m) \cdot kg^{-1}]$	2.62±0.38	2.55±0.51	1.88±0.85	2.35±0.74	<0.001	0.096	0.056
膝内/外旋力矩/ $[(N \cdot m) \cdot kg^{-1}]$	-0.31±0.41	0.19±0.42	0.81±0.28	1.04±0.28	<0.001	0.001	0.052
垂直 GRF/ $(N \cdot kg^{-1})$	2.35±0.23	2.16±0.18	2.19±0.24	2.07±0.24	0.006	0.037	0.390
侧向 GRF/ $(N \cdot kg^{-1})$	0.27±0.13	0.13±0.03 [#]	0.42±0.20	0.51±0.11 [*]	<0.001	<0.001	0.001
前后 GRF/ $(N \cdot kg^{-1})$	0.56±0.10	0.42±0.11 [#]	0.54±0.16	0.46±0.16	0.685	<0.001	0.023
胫骨前剪切力/ $(N \cdot kg^{-1})$	2.83±0.45	1.36±1.04	5.70±1.68	6.38±1.74	0.001	0.013	0.453

注: * 健患侧肢体比较, # 预期条件比较, $P < 0.05$ 。

3 讨论

3.1 健患侧下肢的生物力学差异

本文运动学结果显示, ACLR 运动员无论是在预期还是非预期条件下进行侧切动作时, 患侧肢体的膝关节屈曲角度较健侧肢体显著降低, 与 King 等^[13]研究结果一致, ACLR 运动员在预期条件下完成变向侧切动作时, 患侧膝关节屈曲角度显著小于健侧。此外, Samaan 等^[12]研究发现, ACLR 运动员重建术后相比于损伤前, 侧切动作中膝关节屈曲角度依然显著减小, 患者术后膝关节运动模式可能发生了改变。以往研究发现, 侧切动作中较小的膝关节屈曲角度与较大的 ACL 损伤风险呈显著相关^[22]。本文发现, 患侧膝关节外旋角度显著大于健侧。Boden 等^[23]发现, 膝关节过度外旋会造成 ACL 撞击髁间切迹, 并增加 ACL 的应变, 从而增大 ACL 损伤风险。

本文动力学结果显示, 患侧肢体膝关节内旋力矩显著高于健侧, 与前人研究结果一致^[12]。以往研究发现, 膝关节内旋力矩增加会增大 ACL 负荷, 从而增加 ACL 损伤风险^[17]。患侧肢体的膝关节屈曲力矩峰值显著低于健侧肢体, 可能与股四头肌收缩力量下降有关^[24], 这将使患侧膝关节的关节软骨等结构缺乏保护, 导致膝关节不稳以及受力过大, 造成膝关节损伤风险增大。本文发现, 与健侧肢体相比, 在侧切测试时患侧肢体承受更大的胫骨前剪切力。Yu 等^[25]研究发现, 胫骨前剪切力增大, 可能造成膝关节前抽屈力值增大, 导致 ACL 负荷显著增大, 是造成 ACL 损伤的重要因素之一。本文结果表明, 患侧肢体侧切时膝关节屈曲角度较低, 这将导

致 ACL 被动拉长, 髁腱胫骨轴角增大, 进一步增加胫骨前剪切力, 从而增大 ACL 损伤的风险^[26]。因此, 本文认为, 患侧肢体 ACL 损伤风险可能大于健侧肢体。

本文发现, 侧切动作下肢着地瞬间, 健患侧膝关节屈曲角度均小于 30° , 这是非接触性 ACL 损伤多发的危险角度范围^[27]。Withrow 等^[28]研究发现, ACL 最大应变约发生在膝关节屈曲角度为 30° 时。本文结果显示, ACLR 患者侧切动作中健侧肢体膝关节外翻力矩高于患侧肢体, 该力矩的增加是 ACL 损伤的重要危险因素之一^[29]。以上结果预示着侧切动作中 ACL 损伤风险不仅存在于患侧, 健侧同样存在再次损伤的风险, ACLR 人群应注重双侧肢体的损伤预防。

3.2 预期与预期条件侧切动作的生物力学差异

本文运动学结果显示, 与预期条件相比, ACLR 运动员在非预期条件下进行侧切时膝关节屈曲角度显著较大。邹利民等^[16]研究发现, 足球运动员在非预期条件下侧切动作膝关节屈曲角度显著大于非预期条件, 该结果与本研究一致。患者在非预期条件下进行侧切时, 注意力集中于红、绿信号灯的指示以确定跑动的方向, 用于侧切动作控制的大脑认知资源可能有所减少。根据认知资源竞争理论, 当两个任务竞争大脑认知资源时, 任务完成的绩效均下降^[30], 这将可能使受试者在非预期条件下用于完成侧切动作的大脑认知资源减少, 影响动作表现。

本文发现, 在非预期条件下进行侧切动作时, 膝关节内旋力矩显著增加。Besier 等^[18]研究结果显示, 在进行非预期的侧切时, 由于缺乏姿势调整时间, 用于对抗施加在关节上的外部负荷的肌肉激

活不充分,这将导致侧切时膝关节内外旋力矩较大,从而增加 ACL 损伤的风险。目前的 ACLR 手术很难恢复患者的膝关节旋转稳定性^[31]。以往有研究表明,本体感觉训练可以提高 ACLR 运动员在非预期条件下侧切过程中膝关节旋转控制的稳定性^[32],建议受试者进行本体感觉训练,以降低 ACL 二次损伤的风险。本文结果显示,预期和非预期条件下进行侧切时,膝关节外翻力矩无显著差异。Kim 等^[14]研究认为,相比于预期条件,非预期条件下侧切动作中膝关节外翻力矩显著较大,该结果与本文结果不一致,推测与研究对象的差异有关。本文研究对象为 ACLR 运动员,而 Kim 等^[14]研究对象为健康运动员。ACLR 运动员膝周肌群肌力减弱,股四头肌、股二头肌电机械延迟增长^[33],在预期或非预期条件下完成侧切运动均采用了较谨慎的动作控制,以防再次损伤。本文发现,与预期条件下相比,ACLR 运动员在非预期条件下进行侧切时侧向 GRF 和胫骨前剪切力较高,增大了 ACL 损伤风险。Park 等^[34]研究表明,非预期侧切时下肢承受较大的侧向 GRF,躯干侧屈角度增大,人体姿势控制处于不稳定状态,从而增大非预期条件下侧切时 ACL 损伤风险。此外,非预期条件下侧切动作中较大的下肢胫骨前剪切力,增加 ACL 载荷^[25],增大损伤风险。尽管如此,本文结果显示,运动员侧切动作中侧向 GRF 相比于邹利民等^[16]相对较小,推测与性别差异有关。本文研究对象为男性运动员,邹利民等^[16]的研究对象为女性。有研究显示,与男性相比,女性运动员在侧切动作中表现出更大的 GRF、膝关节力矩峰值,ACL 损伤风险更大^[35]。

本研究的局限性在于受试者仅为男性 ACLR 运动员。因此,应谨慎将研究结果应用于 ACLR 整个群体。建议后续研究可以探讨性别与预期因素对 ACL 损伤生物力学指标的影响。

4 结论

ACLR 运动员进行侧切动作时,相比于健侧,患侧表现出较小的膝关节屈曲角度,较大的膝关节内旋力矩和胫骨前剪切力的生物力学特征,存在较大的 ACL 潜在损伤风险;在非预期条件下,ACLR 运动员双侧下肢均表现出膝关节内旋力矩增大,侧向 GRF 增大和胫骨前剪切力增大的生物力学特征,提

示 ACL 潜在损伤风险不仅限于患侧,健侧下肢也应加强侧切动作中 ACL 损伤预防。

参考文献:

- [1] BODEN BP, TORG JS, KNOWLES SB, *et al.* Video analysis of anterior cruciate ligament injury: Abnormalities in hip and ankle kinematics [J]. *Am J Sports Med*, 2009, 37(2): 252-259.
- [2] GRINDEM H, SNYDER-MACKLER L, MOKSNES H, *et al.* Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: The Delaware-Oslo ACL cohort study [J]. *Br J Sports Med*, 2016, 50(13): 804-808.
- [3] BEISCHER S, GUSTAVSSON L, SENORSKI EH, *et al.* Young athletes who return to sport before 9 months after anterior cruciate ligament reconstruction have a rate of new injury 7 times that of those who delay return [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2020, 50(2): 83-90.
- [4] NEDERGAARD NJ, DALBO S, PETERSEN SV, *et al.* Biomechanical and neuromuscular comparison of single- and multi-planar jump tests and a side-cutting maneuver: Implications for ACL injury risk assessment [J]. *Knee*, 2020, 27(2): 324-333.
- [5] ZEBIS MK, HOLMICH P, CLAUSEN MB, *et al.* First-time anterior cruciate ligament injury in adolescent female elite athletes: A prospective cohort study to identify modifiable risk factors [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(4): 1341-1351.
- [6] DAVID S, KOMNIK I, PETERS M, *et al.* Identification and risk estimation of movement strategies during cutting maneuvers [J]. *J Sci Med Sport*, 2017, 20(12): 1075-1080.
- [7] KING E, RICHTER C, FRANKLYN-MILLER A, *et al.* Whole-body biomechanical differences between limbs exist 9 months after ACL reconstruction across jump/landing tasks [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2018, 28(12): 2567-2578.
- [8] BEAULIEU ML, LAMONTAGNE M, XU L. Lower limb muscle activity and kinematics of an unanticipated cutting manoeuvre: A gender comparison [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2009, 17(8): 968-976.
- [9] FORD KR, MYER GD, TOMS HE, *et al.* Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2005, 37(1): 124-129.
- [10] MEINERZ CM, MALLOY P, GEISER CF, *et al.* Anticipatory effects on lower extremity neuromechanics during a cutting task [J]. *J Athl Train*, 2015, 50(9): 905-913.
- [11] WEINHANDL JT, EARL-BOEHM JE, EBERSOLE KT, *et al.* Anticipatory effects on anterior cruciate ligament

- loading during sidestep cutting [J]. *Clin Biomech*, 2013, 28(6): 655-663.
- [12] SAMAAN MA, RINGLEB SI, BAWAB SY, et al. Anterior cruciate ligament (ACL) loading in a collegiate athlete during sidestep cutting after ACL reconstruction: A case study [J]. *Knee*, 2016, 23(4): 744-752.
- [13] KING E, RICHTER C, FRANKLYN-MILLER A, et al. Biomechanical but not timed performance asymmetries persist between limbs 9 months after ACL reconstruction during planned and unplanned change of direction [J]. *J Biomech*, 2018, 81: 93-103.
- [14] KIM JH, LEE KK, KONG SJ, et al. Effect of anticipation on lower extremity biomechanics during side- and cross-cutting maneuvers in young soccer players [J]. *Am J Sports Med*, 2014, 42(8): 1985-1992.
- [15] 邹利民, 毛丽娟, 伍颢, 等. 疲劳与非预期效应对女子足球运动员侧切动作中膝关节生物力学的影响 [J]. *中国体育科技*, 2019, 55(7): 14-21.
- [16] 邹利民, 毛丽娟, 梁雷超, 等. 非预期条件下女足运动员侧切动作中膝关节运动生物力学特性 [J]. *上海体育学院学报*, 2019, 43(5): 77-83.
- [17] GIESCHE F, STIEF F, GRONEBERG DA, et al. Effect of unplanned athletic movement on knee mechanics: A systematic review with multilevel meta-analysis [J]. *Br J Sports Med*, 2021, 55(23): 1366-1378.
- [18] BESIER TF, LLOYD DG, ACKLAND TR, et al. Anticipatory effects on knee joint loading during running and cutting maneuvers [J]. *Med Sci Sport Exerc*, 2001, 33(7): 1176-1181.
- [19] KING E, RICHTER C, DANIELS KAJ, et al. Biomechanical but not strength or performance measures differentiate male athletes who experience ACL reinjury on return to level I sports [J]. *Am J Sports Med*, 2021, 49(4): 918-927.
- [20] KIM H, SON S, SEELEY MK, et al. Functional fatigue alters lower-extremity neuromechanics during a forward-side jump [J]. *Int J Sports Med*, 2015, 36(14): 1192-1200.
- [21] SAMAAN MA, WEINHANDL JT, HANS SA, et al. Predictive neuromuscular fatigue of the lower extremity utilizing computer modeling [J]. *J Biomech Eng*, 2016, 138(1): 1-10.
- [22] BEDO B, CESAR GM, MORAES R, et al. Influence of side uncertainty on knee kinematics of female handball athletes during sidestep cutting maneuvers [J]. *J Appl Biomech*, 2021, 37(3): 188-195.
- [23] BODEN BP, SHEEHAN FT, TORG JS, et al. Non-contact ACL injuries: Mechanisms and risk factors [J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2010, 18: 520-527.
- [24] SCHMITT LC, PATERNO MV, HEWEWW TE. The impact of quadriceps femoris strength asymmetry on functional performance at return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2012, 42(9): 750-759.
- [25] YU B, LIN CF, GARRETT WE. Lower extremity biomechanics during the landing of a stop-jump task [J]. *Clin Biomech*, 2006, 21(3): 297-305.
- [26] ENGLANDER ZA, CUTCLIFFE HC, UTTURKAR GM, et al. *In vivo* assessment of the interaction of patellar tendon tibial shaft angle and anterior cruciate ligament elongation during flexion [J]. *J Biomech*, 2019, 90: 123-127.
- [27] KROSSHAUG T, NAKAMAE A, BODEN BP, et al. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: Video analysis of 39 cases [J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(3): 359-367.
- [28] WITHROW TJ, HUSTON LJ, WOJTYNS EM, et al. The relationship between quadriceps muscle force, knee flexion, and anterior cruciate ligament strain in an *in vitro* simulated jump landing [J]. *Am J Sports Med*, 2006, 34(2): 269-274.
- [29] DONELON TA, DOS'SANTOS T, PITCHERS G, et al. Biomechanical determinants of knee joint loads associated with increased anterior cruciate ligament loading during cutting: A systematic review and technical framework [J]. *Sports Med Open*, 2020, 6(1): 1-21.
- [30] COOPER, RP, WUTKE K, DAVELAAR EJ. Differential contributions of set-shifting and monitoring to dual-task interference [J]. *Q J Exp Psychol*, 2012, 65(3): 587-612.
- [31] 张玲, 蔡宗远, 王少白, 等. 前交叉韧带重建术后膝关节运动分析研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(2): 240-246.
- ZHANG L, CAI Z, WANG SB, et al. Progress in knee joint motion analysis after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *J Med Biomech*, 2020, 35(2): 240-246.
- [32] JIANG L, ZHANG L, HUANG W, et al. The effect of proprioception training on knee kinematics after anterior cruciate ligament reconstruction: A randomized control trial [J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2022, 35(5): 1085-1095.
- [33] 王哲. 非接触性前交叉韧带损伤患者术后下肢功能特征的研究 [D]. 武汉: 武汉体育学院, 2019.
- [34] PARK EJ, LEE JH, RYUE JK, et al. Influence of anticipation on landing patterns during side-cutting maneuver in female collegiate soccer players [J]. *Korean J Sport Biomech*, 2011, 21(4): 391-395.
- [35] IGUCHI J, TATEUCHI H, TANIGUCHI M, et al. The effect of sex and fatigue on lower limb kinematics, kinetics, and muscle activity during unanticipated side-step cutting [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2014, 22(1): 41-48.