

膝关节前交叉韧带断裂者跑步时的步态分析特征及指导意义

任爽, 印钰, 张思, 梁子轩, 于媛媛, 时会娟, 苗欣, 李玳, 胡晓青,
黄红拾, 敖英芳*

北京大学第三医院运动医学科, 北京大学运动医学研究所, 运动医学关节伤病北京市
重点实验室, 北京 100191

摘要 为明确前交叉韧带(anterior cruciate ligament, ACL)断裂后患者的跑步步态以及合并内侧半月板后角撕裂对其进一步的影响,基于三维运动捕捉分析方法,量化分析了前交叉韧带断裂患者(8名单纯ACL断裂患者,8名ACL断裂合并内侧半月板后角撕裂患者,22名健康志愿者)的跑步步态改变。研究表明,慢跑时ACL断裂的膝关节主要表现为外源性屈曲力矩显著降低,这不仅与ACL断裂侧伸肌力量减弱有关,且与神经肌肉控制模式改变有关。ACL断裂合并内侧半月板撕裂患者膝关节在慢跑时表现出显著的外旋不稳,分析与内侧半月板后角撕裂降低了对旋转稳定性的控制功能有关。研究提示,ACL断裂患者的康复训练方案应关注并参考其跑步步态的异常,加强屈伸肌及旋转稳定肌群的训练,结合神经肌肉训练,改善其跑步步态异常,降低继发损伤风险。

关键词 前交叉韧带断裂;步态分析;生物力学

步态分析是研究下肢在跑步或步行等动态活动中动力学规律的技术手段,是运动医学领域的重要研究方法,旨在通过生物力学分析运动中的异常模式,指导运动伤病康复方案的制定,针对性恢复异常的运动模式,降低运动损伤的发生风险。

ACL起自股骨外髁内壁,向前向下止于胫骨平台髁间嵴,是维持膝关节稳定的重要结构。ACL断裂是膝关节常见且严重的损伤,ACL断裂常合并内侧半月板损伤^[1]。ACL断裂后10年内发生骨关节炎的风险超过50%,合并内侧半月板后角撕裂进一

收稿日期:2021-03-15;修回日期:2021-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(31900943, 31900961);北京大学医学部教育教学研究项目(2020YB44);北京市自然科学基金项目(7202232);北京大学医学部青年培育基金项目(BMU2021PY001)

作者简介:任爽,副研究员,研究方向为运动生物力学,电子信箱:renshuang_sunnie@bjmu.edu.cn;印钰(共同第一作者),副主任医师,研究方向为运动创伤临床,电子信箱:13501174894@qq.com;敖英芳(通信作者),教授,主任医师,研究方向为运动创伤基础与临床,电子信箱:aoyingfang@163.com

引用格式:任爽,印钰,张思,等. 膝关节前交叉韧带断裂者跑步时的步态分析特征及指导意义[J]. 科技导报, 2021, 39(22): 43-48; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.22.005

步增加 ACL 重建后骨关节炎风险^[2]。ACL 断裂人群膝关节在较为年轻时承担着更高的骨关节炎的风险^[3]。创伤性膝关节骨关节炎的重要风险因素是 ACL 断裂后膝关节的异常步态运动模式。研究发现, ACL 断裂后即使在平时走路中也表现出了异常的步态特性^[4-6], 且 ACL 断裂合并半月板撕裂患者表现出更多的步态异常特征^[7-9]。

ACL 损伤后步态改变表现为伸膝不足、旋转失稳, 呈现出“僵直步态”; 合并半月板损伤患者膝关节不稳加重, 旋转力矩显著降低, 呈现出“僵直步态”和“轴移避免步态”^[7]。ACL 断裂患者下肢的矢状面步态运动学及轴状面步态动力学的双侧差与健康人相比显著增加^[10]。既往跑步步态生物力学研究发现, ACL 重建膝关节外源性屈曲力矩显著低于未伤侧^[11-12]和健康膝关节^[13]。

精准的步态分析通过三维运动捕捉系统及三维测力台, 采集人体运动数据, 量化运动模式及受力状况。步行和跑步是日常生活中最常用的功能运动, 然而, ACL 断裂合并与不合并半月板损伤患者的跑步步态改变仍鲜有研究。既往研究分析了 ACL 断裂患者步行步态改变, 本研究进一步分析其慢跑时的三维步态特征以及合并内侧半月板撕裂对其步态的影响, 以期为临床患者的康复治疗提供指导。研究假设, ACL 断裂患者慢跑步态在矢

状面(屈伸)和轴状面(旋转)上的步态发生显著改变; 与单纯 ACL 断裂患者相比, 合并半月板撕裂患者出现显著旋转不稳。

1 研究方法

1.1 研究对象

纳入 8 名单纯前交叉韧带断裂(isolated ACL-deficient, ACLDs)患者, 入组标准为单侧前交叉韧带断裂, 未合并其他韧带损伤, 未合并半月板损伤, 根据 Outerbridge 标准软骨损伤不高于 II 度; 纳入 8 名前交叉韧带断裂合并内侧半月板后角撕裂(ACL D concomitant medial meniscus posterior horn tear, ACLD+MMPHT)患者, 入组标准为单侧前交叉韧带断裂, 未合并其他韧带损伤, 软骨损伤不高于 II 度, 内侧半月板后角撕裂, 不合并外侧半月板损伤; 以上均通过临床查体及磁共振成像(MRI)检查诊断, 并且在关节镜手术中得到确认; 健康志愿者 22 名, 纳入标准为没有下肢骨骼肌肉损伤史, 临床上未发现可测量的韧带不稳。受试者信息如表 1 所示。共 3 组数据纳入分析, 分别为 ACLDs 患者的伤侧膝关节、ACLD+MMPHT 患者的伤侧膝关节、健康志愿者每人随机选一侧膝关节。

表 1 受试者基本信息

	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	损伤时间/月
健康志愿者	29.95±4.84	172.45±4.35	72.45±8.61	—
单纯 ACLD	28.63±4.69	178.75±10.84	81.13±14.23	8.75±11.78
ACLD+MMPHT	27±3.91	175.5±5.94	77.88±11.11	19.63±22.57
<i>P</i> 值	0.33	0.1	0.14	0.28

1.2 数据采集

在受试者的下肢贴上反光标点(图 1), 通过有 8 个高速摄像头的运动捕捉系统(Vicon MX, Oxford Metrics, UK)以 100 Hz 的频率采集标记点的三维运动信息, 通过 2 块测力台以 1000 Hz 的频率采集地面反作用力。解剖标记点基于优化的 plug-in-gait 模型, 贴在以下标记点上, 包括髌前上棘、髌后上嵴、内侧和外侧股骨髁、踝, 内侧和外侧跟骨、

大腿前侧和外侧, 跟骨后部, 第一、第二、第五跖骨头, 舟骨、大拇指。首先采集一个静态的测试, 然后受试者以自选速度从指定点开始慢跑, 并使其双脚无意识地分别踩到 2 块测力台上。双脚分别踩到 2 块测力台记为 1 次成功的测试。每名受试者共采集 3 次成功的测试, 采用 3 次测试平均值用作分析。在测试过程中, 受试者主诉无疼痛(图 1)。



图1 跑步步态分析

1.3 数据分析和处理

三维运动捕捉的坐标点数据通过 12 Hz 的低通滤波器过滤,地面反作用力通过 100 Hz 的低通滤波器过滤。通过 visual 3D 软件分析受试者的三维运动学及动力学数据。三维关节角度分别为屈

曲—伸展、内收—外展、内旋—外旋。关节力矩通过逆向动力学来计算,本研究计算的力矩为外力矩,力矩通过身高和体重的乘积进行标准化。一个跑步周期包括支撑期和腾空期。支撑期是从脚跟着地到脚尖离地的阶段,而支撑期包括缓冲和蹬地 2 个阶段。缓冲期是从支撑腿触地开始至膝关节最大弯曲为止的阶段,蹬地期是膝关节伸的动作开始至蹬离地面前的阶段^[14]。本研究着重分析关节负荷较高的支撑期的关节运动角度及力矩,对于每一个运动学和动力学变量,将整个支撑期标准化为 101 个离散点分别对应 0~100% 的支撑期。

1.4 肌肉力量评估

通过等速测试评定系统(Con-Trex MJ, 德国)测量 60°/s 和 180°/s 时伸肌和屈肌的等速肌力。等速肌肉力矩的平均值如表 2 所示。

表2 受试者等速肌肉力量

力矩/ $N \cdot m \cdot (kg \cdot m)^{-1}$	健康组	ACLDS	ACL D+MMPHT	P 值	bc_P
60°/s 伸肌	0.91±0.25	0.56±0.18*	0.68±0.28	0.01	0.40
180°/s 伸肌	0.67±0.18	0.48±0.13	0.64±0.3	0.11	0.25
60°/s 屈肌	0.54±0.08	0.41±0.12*	0.46±0.15	0.03	0.5
180°/s 屈肌	0.47±0.09	0.43±0.09	0.49±0.17	0.63	0.47

注:与健康志愿者相比较的显著差异 $P < 0.0167$ “*”, $P < 0.001$ “***”;bc_P 为 ACLDS 和 ACL D+MMPHT 两组的 P 值

1.5 统计分析方法

由于速度会影响关节的三维跑步步态的运动学及动力学,因此我们通过协方差分析,将速度作为协变量,分析 ACLDS、ACL D+MMPHT、健康组的三维运动学与动力学差异(当 $P < 0.05$ 为存在统计学差异),出现显著差异的部分,通过协方差分析进行后验分析(bonferroni correction, 当 $P < 0.0167$ 为存在统计学差异)。

2 结果分析

健康组、ACLDS 与 ACL D+MMPHT 3 组跑步速度无显著差异。(ACLDS: 2.41±0.16 m/s, ACL D+MMPHT: 2.3±0.13 m/s, 健康组: 2.3±0.23 m/s, $P = 0.9$)。健康组、ACLDS、ACL D+MMPHT 3 组跑步步态分析的关节角度及力矩如图 2 所示。

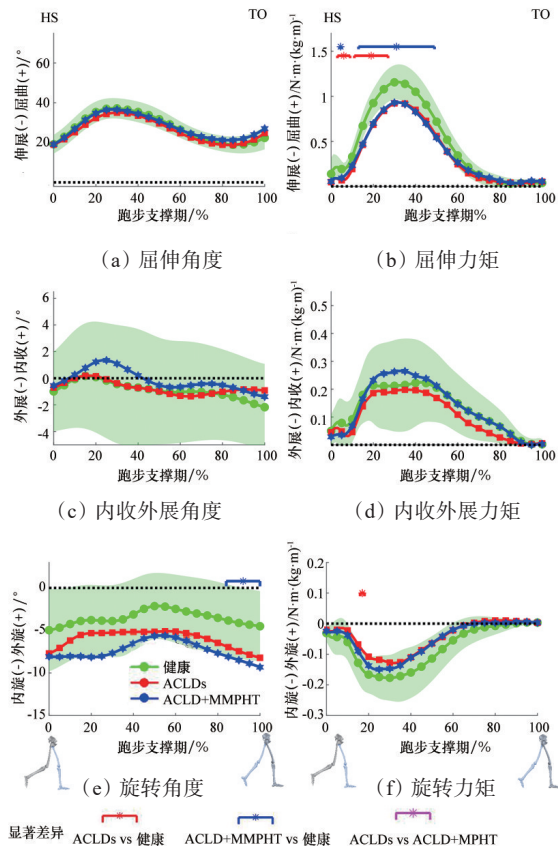
2.1 ACLDS 膝关节三维跑步步态与健康膝关节的差异

ACLDS 与健康膝关节的三维运动角度并无显著差异(图 2(a)、(c)、(e))。在缓冲期,ACLDS 膝关节的外源性屈曲力矩显著低于健康膝关节(图 2(b))。健康膝关节跑步时的屈曲力矩峰值是走路时的 2 倍以上。慢跑时,ACLDS 膝关节的内收力矩及旋转力矩均与健康膝关节无显著差异(图 2(d)、(f))。

2.2 ACL D+MMPHT 膝关节三维跑步步态与健康膝关节的差异

慢跑时,ACL D+MMPHT 膝关节的内收力矩及旋转力矩均与健康膝关节无显著差异(图 2(d)、(f))。ACL D+MMPHT 膝关节的屈伸角度及内收外展角度均与健康膝关节无显著差异。

ACL D+MMPHT 膝关节在蹬地期末外旋显著



每两组之间的显著性差异已标记出,绿色阴影部分代表控制组健康膝关节的标准差,HS: heel strike,表示脚跟初始着地的时刻; TO: toe off,表示脚尖离地的时刻

图2 健康组、ACLDs、ACLD+MMPHT 膝关节的慢跑支撑期的三维运动学与动力学

高于健康膝关节(图2(e))。在缓冲期和蹬地期, ACLD+MMPHT 膝关节的外源性屈曲力矩显著低于健康膝关节(图2(b))。

2.3 ACLDs与ACLD+MMPHT 膝关节三维跑步步态差异

ACLDs与ACLD+MMPHT 膝关节的三维运动角度和力矩均无显著差异(图2)。结果与预期结果不符合。预计在较为剧烈的跑步运动中, ACLD+MMPHT 膝关节会比 ACLDs 膝关节外旋不稳增加。本研究发现 ACLD+MMPHT 膝关节的外旋与 ACLDs 膝关节并无显著差异。然而,与健康膝关节相比只有 ACLD+MMPHT 膝关节表现出显著的外旋不稳,而 ACLDs 膝关节外旋与健康组并无显著差异(图2(e))。

3 讨论

与走路的结果不同,在跑步的支撑期,ACLDs 膝关节的三维跑步步态与健康膝关节相比并未出现显著差异。健康膝关节的平均屈曲角度为 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$,未出现伸直角度。ACL的主要作用是控制伸膝时的胫骨前移,因此步行时 ACLDs 侧伸膝不足的僵直步态在跑步中并未出现。与本研究结果相似,Fontenay 等^[15]综述 ACL 重建后的跑步步态研究,发现 ACL 重建后脚跟着地时刻的膝关节屈曲角度与健康关节并无显著差异。然而,Fontenay 等^[15]发现冲击力峰值时刻的膝关节屈曲角度在术后中期显著降低,而术后长期并无显著差异。本研究发现 ACL 损伤后跑步中膝关节角度与健康关节并无显著差异,因此既往学者研究发现术后中期的屈曲角度改变可能与术后功能恢复情况有关。

研究表明,跑步时股四头肌的激活程度与步行类似^[16],这些肌肉在承重时达到活动顶峰。但是跑步过程中,膝关节的外源性屈曲力矩(由内源性伸展力矩/伸肌力矩平衡)为走路时的2倍多,因此对股四头肌力量要求较高,外源性屈曲力矩由内源性伸肌力矩来平衡。ACLDs 和 ACLD+MMPHT 侧出现外源性屈曲力矩(伸肌力矩)减弱的现象,类似的,既往研究在 ACL 损伤人群中未发现伸肌力矩的降低^[17-18]。等速肌力分析表明,ACLDs 侧的股四头肌力量显著低于健康志愿者,而 ACLD+MMPHT 侧的股四头肌力量与健康志愿者并无显著差异。研究发现 ACL 断裂侧在慢跑时的外侧腘绳肌激活程度更高^[18]。因此,ACLDs 和 ACLD+MMPHT 侧出现伸肌力矩减弱的现象,不仅是由于股四头肌力量较弱,也与 ACL 断裂后的神经肌肉控制改变有关^[19]。有学者认为膝关节屈曲力矩的降低是 non-coper 的标志,且屈曲力矩不仅可以鉴别膝关节的不稳,且可以作为监测康复进程的有效指标^[18]。Perraton 等^[20]发现 ACL 重建后功能较差的患者膝关节的屈曲力矩显著更低,因此本研究发现 ACL 断裂后(ACLDs 与 ACLD+MMPHT)屈曲力矩降低可能也与关节功能减弱相关。

与走路类似,跑步的蹬地期 ACLD+MMPHT 膝

关节外旋显著高于健康膝关节,但是与 ACLDs 关节并未出现显著差异。既往的研究与本研究结果相似,Harato 等^[8]发现在 ACL 断裂合并不稳定半月板损伤的关节中出现了显著增加的胫骨旋转;Bohn 等^[21]发现在跑步中 ACL 断裂关节比健康关节出现显著的旋转不稳定性,该研究对象为 ACL 断裂且手术中半月板切除不超过 50% 的人群,这些人群中可能有存在不超过 50% 半月板损伤与合并半月板损伤的人群。而本研究更精细化研究人群,发现与健康关节相比,ACLDs 关节未出现显著的旋转稳定差异,而 ACLD+MMPHT 关节出现显著的旋转失稳。合并内侧半月板后角撕裂后不能抵抗圆周应力,并且控制旋转稳定性的能力减弱。旋转角度的改变会诱发膝关节软骨应力分布改变,是继发骨关节炎的风险因素,因此,在未来的研究应该关注 ACLD+MMPHT 关节的旋转不稳定性。

本研究虽然探索了 ACL 损伤后跑步步态的改变,但也存在一定的局限性。本研究对象仅纳入单纯前交叉韧带断裂及前交叉韧带断裂合并内侧半月板后角撕裂患者,未来研究将进一步纳入更多合并损伤类型的受试者的运动步态改变。此外,我们仅在步态实验室环境下研究了 ACL 损伤人群跑步的步态改变,进一步研究将在更为接近真实日常状态的情况下开展。

4 结论

慢跑时 ACL 断裂患者的膝关节主要表现为外源性屈曲力矩显著降低,这不仅与 ACL 断裂侧伸肌力量减弱有关,且与神经肌肉控制模式改变有关。ACLD+MMPHT 患者膝关节在慢跑时表现出显著的外旋不稳,可能与内侧半月板后角撕裂降低了对旋转稳定性的控制功能有关。本研究提示 ACL 断裂患者的康复训练方案应关注并参考其跑步步态的异常,加强屈伸肌及旋转稳定肌群的训练,结合神经肌肉训练,改善其跑步步态异常,降低继发损伤风险。

参考文献 (References)

- [1] 徐雁, 敖英芳. 前十字韧带断裂继发半月板损害的临床研究[J]. 中华骨科杂志, 2002, 22(4): 216-219.
- [2] Louboutin H, Debarge R, Richou J, et al. Osteoarthritis in patients with anterior cruciate ligament rupture: A review of risk factors[J]. *Knee*, 2009, 16(4): 239-244.
- [3] Wellsandt E, Gardinier E S, Manal K, et al. Decreased knee joint loading associated with early knee osteoarthritis after anterior cruciate ligament injury[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2016, 44(1): 143-151.
- [4] Shabani B, Bytyqi D, Lustig S, et al. Gait changes of the ACL-deficient knee 3D kinematic assessment[J]. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 2015, 23(11): 3259-3265.
- [5] 时会娟, 丁立, 任爽, 等. 前交叉韧带重建术后步行过程中的生物力学特征[J]. 科技导报, 2020, 38(6): 25-33.
- [6] Shi H J, Ren S, Miao X, et al. The effect of cognitive loading on the lower extremity movement coordination variability in patients with anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Gait & Posture*, 2021, 84: 141-147.
- [7] Ren S, Yu Y, Shi H J, et al. Three dimensional knee kinematics and kinetics in ACL-deficient patients with and without medial meniscus posterior horn tear during level walking[J]. *Gait & Posture*, 2018, 66: 26-31.
- [8] Harato K, Niki Y, Kudo Y, et al. Effect of unstable meniscal injury on three-dimensional knee kinematics during gait in anterior cruciate ligament-deficient patients[J]. *Knee*, 2015, 22(5): 395-399.
- [9] Zhang Y, Huang W, Yao Z, et al. Anterior cruciate ligament injuries alter the kinematics of knees with or without meniscal deficiency[J]. *American Journal of Sports Medicine*, 2016, 44(12): 3132-3139.
- [10] Ren S, Shi H J, Yu Y, et al. Dynamic between-leg differences while walking in anterior cruciate ligament-deficient patients with and without medial meniscal posterior horn tears[J]. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 2020, 8(5): 2325967120919058.
- [11] Hart H F, Culvenor A G, Collins N J, et al. Knee kinematics and joint moments during gait following anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review and meta-analysis[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2016, 50(10): 597-612.
- [12] Sigward S M, Lin P G, Pratt K. Knee loading asymmetries during gait and running in early rehabilitation fol-

- lowing anterior cruciate ligament reconstruction: A longitudinal study[J]. *Clinical Biomechanics*, 2016, 32: 249–254.
- [13] Kuenze C, Hertel J, Weltman A, et al. Jogging biomechanics after exercise in individuals with ACL-reconstructed knees[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2014, 46(6): 1067–1076.
- [14] 黄宗成. 百米技术——缓冲与后蹬[J]. *体育科学*, 1984, 4(2): 59–63.
- [15] Pairet-de-Fontenay B, Willy R W, Elias A R C, et al. Running biomechanics in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review[J]. *Sports Medicine*, 2019, 49(9): 1411–1424.
- [16] Montgomery W H, Pink M, Perry J. Electromyographic analysis of hip and knee musculature during running[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 1994, 22(2): 272–278.
- [17] Chmielewski T L, Rudolph K S, Fitzgerald G K, et al. Biomechanical evidence supporting a differential response to acute ACL injury[J]. *Clinical Biomechanics*, 2001, 16(7): 586–591.
- [18] Rudolph K S, Axe M J, Buchanan T S, et al. Dynamic stability in the anterior cruciate ligament deficient knee [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2001, 9(2): 62–71.
- [19] Miao X, Huang H, Hu X, et al. The characteristics of EEG power spectra changes after ACL rupture[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0170455.
- [20] Perraton L G, Hall M, Clark R A, et al. Poor knee function after ACL reconstruction is associated with attenuated landing force and knee flexion moment during running[J]. *Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy*, 2018, 26(2): 391–398.
- [21] Bohn M B, Petersen A K, Nielsen D B, et al. Three-dimensional kinematic and kinetic analysis of knee rotational stability in ACL-deficient patients during walking, running and pivoting[J]. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 2016, 3(1): 27.

Gait analysis characteristics and their guiding significance for knee cruciate ligament rupture during running

REN Shuang, YIN Yu, ZHANG Si, LIANG Zixuan, YU Yuanyuan, SHI Huijuan, MIAO Xin, LI Dai, HU Xiaoqing, HUANG Hongshi, AO Yingfang*

Department of Sports Medicine, Peking University Third Hospital. Institute of Sports Medicine of Peking University. Beijing Key Laboratory of Sports Injuries, Beijing 100191, China

Abstract This paper identifies the changes of the running gait after the ACL rupture and the further effects of the concomitant medial meniscus tear on the running gait changes after the ACL rupture. Based on the 3D motion capture analysis method, quantitative analyses are made for the changes of the running gait in the ACL-deficient patients (22 healthy controls, 8 isolated ACL-deficient patients, 8 ACL-deficient concomitant with medial meniscus tear patients). The results show that for the ACL-deficient knee joint, a significant decrease of the exogenous flexion moment is observed during jogging, which is not only related to the weakening of the extensor muscle strength of the ACL-deficient side, but also related to the change of the neuromuscular control mode. For the patients with ACL rupture combined with the medial meniscus tear, a significant external rotation instability of the knee is observed during jogging, which may be related to the reduced control of rotation stability caused by the medial meniscus posterior horn tear. It is suggested that in the rehabilitation training program for the ACL rupture patients, one should pay attention to their abnormal running gait and intensify the training of flexor and extensor muscles and rotational muscle group and the neuromuscular training to improve their abnormal running gait and reduce the risk of the secondary injury after the ACL rupture.

Keywords ACL rupture; gait analysis; biomechanics ●



(责任编辑 傅雪)