

· 综述 ·

前交叉韧带损伤的步态分析研究进展[△]

代 菁, 卢 斌, 马剑雄, 马信龙*

(天津市天津医院骨科研究所, 天津 300050)

摘要: 前交叉韧带损伤 (anterior cruciate ligament injury) 是临床上常见的膝关节运动性损伤之一。损伤病因多种多样, 给临床早期及时的诊断治疗带来了巨大的挑战。步态分析通过提供客观准确的运动学和动力学数据, 及时反映肢体的功能变化。本文系统性回顾前交叉韧带损伤步态分析的相关研究, 阐述了正常步态的特征, 同时从前交叉韧带损伤诊断、治疗方式、手术重建后康复指导等各个方面, 对前交叉韧带损伤患者步态的特征进行综述, 为前交叉韧带损伤的步态研究提供可靠依据。

关键词: 步态分析, 正常步态, 前交叉韧带损伤

中图分类号: R686.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 14-1295-04

Research progress in gait analysis of anterior cruciate ligament injury // DAI Jing, LU Bin, MA Jian-xiong, MA Xin-long. Tianjin Institute of Orthopedics, Tianjin Hospital, Tianjin 300050, China

Abstract: Anterior cruciate ligament injury is one of the common sports injuries of the knee joint. There are numerous reasons of anterior cruciate ligament injury, which brings great challenges to early clinical diagnosis and treatment. Gait analysis provides objective and accurate kinematic and kinetic data to reflect functional changes of limbs in a timely manner. This literature systematically reviews the relevant research on gait analysis of anterior cruciate ligament injury, reveals the characteristics of normal gait, the diagnosis and treatment of anterior cruciate ligament injury, in order to provide reference for the gait study of anterior cruciate ligament injury.

Key words: gait analysis, normal gait, anterior cruciate ligament injury

前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 起自胫骨平台髁间棘前方, 终止于股骨外侧髁内侧面后部, 主要限制胫骨的前移和内旋。前交叉韧带损伤是目前膝关节外伤最常见的韧带损伤之一^[1]。美国每年发生前交叉韧带损伤大约是 25 万人^[2], 其中约 70% 属于非接触性损伤^[3]; 在国内现役运动员中总发病率占 0.5%^[4]。已有研究表明, 前交叉韧带损伤后会加速关节软骨退化^[5], 即使经过及时的保守治疗或韧带重建, 依然不能恢复膝关节正常的运动学和动力学功能, 同时不能阻止长时间后期创伤后骨关节炎的发生^[6, 7]。三维步态分析作为对人体步态进行科学研究的分析方法, 通过分析人体运动学和动力学参数, 客观反映机体功能。本文总结了近年来, 前交叉韧带损伤在步态分析方面的研究, 为前交叉韧带损伤的临床和研究提供参考。

1 步态分析

步态分析 (Gait analysis) 是指对于人类在自然行走状态运用力学原理、解剖学原理、生理学原理进行对观察者步态的运动学、动力学等指标进行定量研究的生物力学研究方法。步态分析起源于 17 世纪的欧洲, 意大利生理学家 Borelli 首次提出应用力学和几何学原理研究骨骼肌肉系统的规律^[8]。后来随着 20 世纪 60 年代影像学的出现, 以及之后如运动捕捉技术进步, 三维步态分析技术的发展, 相较于临床测量观察, 以其准确性、客观性等优势已经在国内外临床诊断、康复评定等领域逐渐得到了广泛的应用, 并不断促进完善个性化诊断治疗的方案。

1.1 步态周期

步态周期指的是行走时一侧足跟着地至该足跟再次着地的过程。根据步行时足部是否位于地面分为支撑相和摆动相。目前主要采用的两种步态周期划分是传统步态周期划分方法和美国加州 RLA 国家康复中心的 Perry 医生提出的 RLA 分期法, 其中 RLA 分期

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.14.10

[△]基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 11772226, 81871777, 81572154); 天津市科技计划项目 (编号: 18PTLCSY00070, 16ZXZNGX00130)

作者简介: 代菁, 硕士研究生, 研究方向: 膝内翻与步态分析, (电话) 15208174130, (电子信箱) daijing1232021@163.com

* 通信作者: 马信龙, (电话) 022-23197009, (电子信箱) maxinlong8686@sina.com

法较为常用，它是先将1个完整步态周期分2个部分：站立期和迈步期。又将站立相分为：首次着地、承重反应期、站立中期、站立末期、迈步前期；迈步期分为：迈步初期、迈步中期、迈步末期^[9]。

1.2 步态参数

步态分析利用不同角度的实验数据参数，描述步态差异，评价肢体的功能，对临床定性和定量的分析。目前步态分析所使用的主要参数大致分为以下几类：(1) 步态的时间距离参数包括步速、步频、步长、步幅、步宽、步态周期、站立期时相、迈步期时相等参数；其中步长、步频、步速是步态分析中最常用的三大要素；(2) 运动学参数：人体运动的测量往往是通过将肢体视为刚体的理想化实现的。其主要参数包括：不同时间段各个髋、膝、踝角度、各关节角速度和角加速度、骨盆前后倾斜等；(3) 动力学是针对人体运动中地面反作用力、关节力矩、足底受力强度、方向和时间的研究。主要参数包括：足底受力、力矩、地面反作用力等；(4) 表面肌电图主要是研究下肢肌肉在运动中的电活动，包括下肢肌肉收缩、神经电生理活动，揭示肌肉活动和下肢运动的关系，能够评价肌肉功能用以鉴别相关神经肌肉疾病。

2 正常步态

正常步态是指无任何疾病成年人在平地行走时消耗能量最少的自然行走状态^[10]。但是即使是健康成人，步态也会因为年龄、性别、负重等诸多因素的影响而有所不同，呈现个体化差异。

既往研究发现针对不同年龄的正常成人行走能力和年龄存在一定相关性^[11, 12]，随着年龄的增大，跨步长、步频、步速均呈下降趋势；跨步周期、站立相时间延长。与健康青年人相比，老年人在运动学和动力学上有明显差异，主要反映出老年人机能的下降^[13]。伍颢等^[14]研究报道，由于老年人身体机能的下降，下肢各个肌肉活动性也在下降，体现在步态各期在时间上的分配与青年人不同，老年人跟着地期短于青年人，站立中期长于青年人，加速期短于青年人。戴克戎^[15]对正常男女青年的运动学研究指出，仅在髋关节后伸时有显著性差异。

Mentiplay^[16]指出随着行走速度的增加，髋关节、膝关节和踝关节的峰值关节角度和角速度也随之增加，因此在做步态分析研究时，尽可能要求观察者的步态速度保持一致或相近。Taylor等^[17]对正常行走下前交叉韧带变化进行研究时，指出在正常行走过

程中膝关节屈曲和前交叉韧带长度呈负相关，且当膝关节在脚跟撞击前伸展时，会出现10%的局部峰值应变。因此正常行走时，前交叉韧带发挥着非常重要的作用，一旦前交叉韧带出现损伤，膝关节内部生物力学结构就会发生改变，步态也会发生相应的变化。

3 步态分析在前交叉韧带损伤中的应用

3.1 前交叉韧带损伤患者的下肢步态分析

由于膝关节周围肌肉能代偿性的阻止活动中的膝关节不稳定性，静止状态下的功能评定并不能全面的反映膝关节的真实情况，因此步态分析在动态行走状态下对前交叉韧带损伤的进行功能评定就尤为重要^[18]。Berchuck等^[19]针对前交叉韧带损伤后，周围肌肉活动尤其是股四头肌发生变化，代偿性改变行走方式的特异性步态称为“股四头肌逃避步态”。三维步态分析系统针对前交叉韧带损伤的特异性步态的识别，能够早期对疾病进行诊治，及时预防后期继发并发症。

前交叉韧带具有稳定膝关节，限制胫骨的前移和内旋后，前交叉韧带损伤后胫骨会产生异常的前移位的解剖特点。罗鸿等^[20]利用步态分析采集膝关节6个自由度步态数据，对前交叉韧带损伤的运动学分析诊断，发现相较于体格检查和磁共振检查，步态分析在前交叉韧带损伤早期诊断方面有助于排除其他检查的假阳性。

前交叉韧带损伤根据受伤时间的不同分类分为急性、亚急性、陈旧性(慢性)，其各自的步态特征相较于正常人各有不同。周敬滨等^[21]指出与健康人相比，慢性前交叉韧带损伤步频、步速显著减小，步态周期时间显著增加。从行走方式上体现为膝关节屈曲减小，而膝关节内旋或者外旋增加。Yu等^[22]分析急性和慢性前交叉韧带损伤的步态特征和肌肉力量后指出，在站立阶段，急性组的步态发生了较大的膝关节屈曲和髁下伸的变化。Yang等^[23]指出即使是没有不稳定性的慢性前交叉韧带缺失的患者，膝关节前后平移显著增加，膝关节接触路径也有明显异常。

前交叉韧带损伤后导致膝关节不稳，容易继发导致关节内其他软组织如关节软骨、半月板的伴随损伤，其中继发半月板损伤是最为常见的。有文献报道，半月板损伤率从急性期组、亚慢性期组、慢性期组有显著增加，其中内侧半月板损伤率更高^[24]。Granán等^[25]对3475例前交叉韧带损伤患者进行调查，47%患者存在半月板撕裂，15%患者同时存在软

骨和半月板病变。Ren等^[26]对前交叉韧带缺失有无伴内侧半月板后角撕裂进行步态分析时指出有内侧半月板后角撕裂组步行上表现为僵硬步态和枢轴转移步态模式的组合，而无半月板撕裂的患者仅表现为僵硬步态。Akpınar等^[27]研究表明，前交叉韧带损伤伴有内侧半月板损伤的患者术后2年胫骨前移大于单纯性前交叉韧带损伤。

3.2 步态分析在前交叉韧带损伤临床治疗的应用

Thomas^[28]研究前交叉韧带损伤后下肢肌力的改变时，指出ACL损伤后呈现髌伸肌、内收肌和踝跖屈肌无力，术后受伤肢体比未受伤肢体有更大的膝伸肌和屈肌无力，后期康复训练时有必要加强对相应肌肉的训练。Li等^[29]指出在前交叉韧带损伤后1年，经保守治疗，伤侧部分本体感觉的恶化不会恢复，并且非伤侧的本体感觉和步态的稳定性也恶化，在下肢肌肉中股外侧肌恢复速度最为缓慢，认为股外侧肌的本体感觉训练是前交叉韧带损伤康复的重要环节，同时前交叉韧带的重建应在1年内完成。任爽^[30]研究发现前交叉韧带损伤患者慢跑时外源性屈曲力矩显著降低，与ACL断裂侧伸肌力量减弱和神经肌肉控制模式改变有关。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。

3.3 步态分析在前交叉韧带损伤重建术后的应用

韧带重建是目前临床治疗前交叉韧带损伤主要的治疗方式，据统计在美国每年有大约35万人进行前交叉韧带重建术^[31]，全球每年约有100万人进行前交叉韧带重建^[32]。重建前交叉韧带有助于抑制胫骨前平移，恢复正常的关节运动学，恢复膝关节稳定性，防止过度的扭转载荷，从而减轻疼痛，恢复功能，降低并发症发生率^[33]。但是手术重建后也并不能完全恢复膝关节正常的运动学和动力学，Risberg^[34]对前交叉韧带重建术后的患者进行20年的随访，发现胫股和髌股骨关节炎患病率分别是42%和21%，合并其他损伤的患者术后骨关节炎的患病率更高。因此如何预防ACL重建后前交叉韧带的再次损伤以及短期、长期并发症成为了维持膝关节健康和患者整体生活质量的关键。

Hledik^[35]发现在前交叉韧带重建后患者的第一和第二峰值伸展力矩、内旋力矩、内收力矩的减少和膝关节屈曲力矩峰值的增加。Armitano^[36]指出前交叉韧带重建导致两腿之间协调稳定性下降，表明两腿之间的耦合强度降低。可能会导致进行过这种重建手术的个体的再损伤和变性率增加。Mantashloo^[37]指出

单侧ACL重建术后，在步态周期的不同阶段造成垂直地面反作用力和肌肉活动的不对称。在步态制动期肌肉活动对称性方面，股直肌活动有显著性差异。在步态推进阶段，腓肠肌内侧肌和股二头肌活动有显著差异。

姚望等^[38]利用膝关节六自由度评价保留胫骨残端重建前交叉韧带术后的膝关节功能，非保残组膝关节术后3个月仍存在5个自由度范围低于对照组，包括内外翻、内外旋、屈伸、上下位移、内外位移范围，但保残组相对应仅有内外旋、屈伸范围与健康人有差别。保留胫骨残端重建ACL患者膝关节功能在运动学特征上更接近于正常人，术后康复更有优势。Lee等^[39]指出胫骨残体保存的越完整，本体感觉功能的保存越好，影响手术预后。周鹏等^[40]也认为急性前交叉韧带损伤保残重建更有利于患者运动功能的恢复。

4 小 结

目前三维步态分析系统作为一种客观量化前交叉韧带损伤患者的膝关节功能的研究方法，为前交叉韧带损伤早期诊断、治疗方式选择以及术后康复锻炼提供了更为科学的临床参考依据。但是由于三维步态分析采集运动学和动力学等数据过于抽象和庞大，难以直接有效地反映临床信息；同时目前步态分析在各种骨科疾病中尚无权威的标准定论。但相信随着步态分析在前交叉韧带损伤等骨科领域更加广泛深入的研究和便携式步态技术的发展，三维步态分析系统会成为个体化诊疗的有效工具。

参考文献

- [1] Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, et al. Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2016, 44 (7): 1861-1876.
- [2] Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, et al. Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries - a review of the Hunt Valley II Meeting, January 2005 [J]. *Am J Sports Med*, 2006, 34 (9): 1512-1532.
- [3] Hernandez LM, Micheo WF, Amy E. Rehabilitation update for the anterior cruciate ligament injured patient: current concepts [J]. *Bol Asoc Med P R*, 2006, 98 (1): 62-72.
- [4] 敖英芳, 田得祥, 崔国庆, 等. 运动员前交叉韧带损伤的流行病学研究 [J]. *体育科学*, 2000, 20 (4): 47-48.
- [5] 张兴宇, 刘师学, 曹瑾瑾, 等. 不同交叉韧带断裂对大鼠运动能力与关节软骨结构的影响 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (14): 1311-1315.
- [6] Paschos NK. Anterior cruciate ligament reconstruction and knee osteoarthritis [J]. *World J Orthop*, 2017, 8 (3): 212.

- [7] 张洪志, 刘爱国, 冯宝华, 等. 前交叉韧带损伤的诊断与治疗[J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(2): 146-149.
- [8] 周萌, 黄强, 蒋协远, 等. 步态分析在骨科与物理康复领域的应用进展[J]. 骨科临床与研究杂志, 2021, 6(4): 243-249.
- [9] 周天健, 赵吉凤, 田心明. 临床实用步态分析学[M]. 北京: 北京出版社, 1993: 326.
- [10] Berek S. Effects of anthropometric parameters and stride frequency on estimation of energy cost of walking [J]. J Sports Med Phys Fitness, 2005, 45(2): 152-161.
- [11] 胡雪艳, 恽晓平, 郭忠武, 等. 正常成人步态特征研究[J]. 中国康复理论与实践, 2006, 12(10): 855-857.
- [12] Herssens N, Verbecque E, Hallemaans A, et al. Do spatiotemporal parameters and gait variability differ across the lifespan of healthy adults? A systematic review [J]. Gait Posture, 2018, 64: 181-190.
- [13] Hollman JH, McDade EM, Petersen RC. Normative spatiotemporal gait parameters in older adults [J]. Gait Posture, 2011, 34(1): 111-118.
- [14] 伍颢, 陆爱云, 庞军. 健康老年人常速行走的步态分析[J]. 上海体育学院学报, 2000, 24(2): 52-55.
- [15] 戴克戎, 汤荣光. 平地常速行走时的步态观察[J]. 中国生物医学工程学报, 1982, 1(1): 15-21.
- [16] Mentiplay BF, Banky M, Clark RA, et al. Lower limb angular velocity during walking at various speeds [J]. Gait Posture, 2018, 65: 190-196.
- [17] Taylor KA, Cutcliffe HC, Queen RM, et al. In vivo measurement of ACL length and relative strain during walking [J]. J Biomech, 2013, 46(3): 478-483.
- [18] 刘日许, 陈艺, 陈玉书, 等. 步态分析在膝关节疾病中的应用[J/JCD]. 中华关节外科杂志(电子版), 2018, 12(6): 806-813.
- [19] Berchuck M, Andriacchi TP, Bach BR, et al. Gait adaptations by patients who have a deficient anterior cruciate ligament [J]. J Bone Joint Surg Am, 1990, 72(6): 871-877.
- [20] 罗鸿, 刘方, 李顺华, 等. 步态分析应用在前交叉韧带损伤诊断中的意义[J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(31): 4969-4973.
- [21] 周敬滨, 李国平, 李方祥. 慢性膝关节前交叉韧带损伤患者步态的运动学分析[J]. 中国运动医学杂志, 2012, 31(10): 898-901.
- [22] Yu PA, Fan CH, Kuo LT, et al. Differences in gait and muscle strength of patients with acute and chronic anterior cruciate ligament injury [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2020, 80: 105161.
- [23] Yang C, Tashiro Y, Lynch A, et al. Kinematics and arthrokinematics in the chronic acl-deficient knee are altered even in the absence of instability symptoms [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2018, 26(5): 1406-1413.
- [24] 范宏斌, 张春礼, 李明全, 等. 前交叉韧带断裂后半月板和软骨损伤的临床研究[J]. 中华创伤杂志, 2004, 20(2): 12-15.
- [25] Granan LP, Bahr R, Lie SA, et al. Timing of anterior cruciate ligament reconstructive surgery and risk of cartilage lesions and meniscal tears: a cohort study based on the Norwegian National Knee Ligament Registry [J]. Am J Sports Med, 2009, 37(5): 955-961.
- [26] Ren S, Yu Y, Shi H, 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.
- [27] Akpınar B, Thorhauer E, Irrgang JJ, et al. Alteration of knee kinematics after anatomic anterior cruciate ligament reconstruction is dependent on associated meniscal injury [J]. Am J Sports Med, 2018, 46(5): 1158-1165.
- [28] Thomas AC, Villwock M, Wojtys EM, et al. Lower extremity muscle strength after anterior cruciate ligament injury and reconstruction [J]. J Athl Train, 2013, 48(5): 610-620.
- [29] Li W, Li Z, Qie S, et al. Biomechanical evaluation of preoperative rehabilitation in patients of anterior cruciate ligament injury [J]. Orthop Surg, 2020, 12(2): 421-428.
- [30] 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.
- [31] Sugimoto D, LeBlanc JC, Wooley SE, et al. The effectiveness of a functional knee brace on joint-position sense in anterior cruciate ligament-reconstructed individuals [J]. J Sport Rehabil, 2016, 25(2): 190-194.
- [32] Davies GJ, McCarty E, Provencher M, et al. ACL return to sport guidelines and criteria [J]. Curr Rev Musculoskelet Med, 2017, 10(3): 307-314.
- [33] Carbone A, Rodeo S. Review of current understanding of post-traumatic osteoarthritis resulting from sports injuries [J]. J Orthop Res, 2017, 35(3): 397-405.
- [34] Risberg MA, Oiestad BE, Gunderson R, et al. Changes in knee osteoarthritis, symptoms, and function after anterior cruciate ligament reconstruction: a 20-year prospective follow-up study [J]. Am J Sports Med, 2016, 44(5): 1215-1224.
- [35] Erhart-Hledik JC, Chu CR, Asay JL, et al. Longitudinal changes in knee gait mechanics between 2 and 8 years after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. J Orthop Res, 2018, 36(5): 1478-1486.
- [36] Armitano CN, Morrison S, Russell DM. Coordination stability between the legs is reduced after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2018, 58: 28-33.
- [37] Mantashloo Z, Letafatkar A, Moradi M. Vertical ground reaction force and knee muscle activation asymmetries in patients with ACL reconstruction compared to healthy individuals [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2020, 28(6): 2009-2014.
- [38] 姚望, 潘剑英, 曾春. 保残重建前交叉韧带对膝关节运动学特征的影响[J/JCD]. 中华关节外科杂志(电子版), 2020, 14(1): 24-32.
- [39] Lee BI, Kwon SW, Kim JB, et al. Comparison of clinical results according to amount of preserved remnant in arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction using quadrupled hamstring graft [J]. Arthroscopy, 2008, 24(5): 560-568.
- [40] 周鹏, 邵宏斌, 杨勤旭, 等. 前交叉韧带重建膝关节本体感觉的恢复[J]. 中国矫形外科杂志, 2019, 27(12): 1073-1077.

(收稿:2022-06-01 修回:2022-11-25)

(同行评议专家:付国建 王平 刘爱峰)

(本文编辑:宁桦)