

前交叉韧带损伤与重建术后患者的足底压力及步态分析

李世浩¹, 李奇², 李震¹, 张媛媛², 刘苗苗¹, 欧阳懿¹, 徐卫国³

<https://doi.org/10.12307/2022.968>

投稿日期: 2022-02-01

采用日期: 2022-02-12

修回日期: 2022-02-25

在线日期: 2022-03-10

中图分类号:

R459.9; R318; R452

文章编号:

2095-4344(2023)04-00626-06

文献标识码: A

文章快速阅读: 足底压力在前交叉韧带损伤及重建术后步态分析中的应用

应用足底压力仪器进行步态分析

前交叉韧带损伤患者

减少足跟负重时长, 增加前足负重时长, 并且以健侧负重为主的步态模式

患侧全足、足跟负荷降低, 中足负荷增高, 患侧足部过度旋后

患侧压力中心在前后方向上转移受限

前交叉韧带重建后患者

术后早期患侧呈现出一种足跟触地快、前足离地快的步态模式

在术后早期观察到的患侧足跟负荷降低、前足负荷增高以及全足负荷的不对称性, 都随着时间的推移发生改善, 但发现患侧足部过度旋前

文题释义:

足底压力: 能够分析和衡量异常足底负荷分布, 随着足底压力仪器的变革, 它对运动系统疾病的病因分析、诊断、功能及疗效评定均有重要意义, 属于定量步态分析的一种。

步态分析: 利用力学原理、人体解剖学和生理学知识对人体行走状态进行对比分析的一种研究方法, 包括定性分析和定量分析。

摘要

背景: 目前研究普遍认为前交叉韧带损伤及重建术后患者下肢步态生物力学的异常改变是患者膝关节关节炎高发率的重要风险因素, 足底压力分析作为定量步态分析的一种, 对于早期识别出步态的异常变化并及时纠正具有非常重要的临床价值。

目的: 综述足底压力在前交叉韧带损伤及重建术后步态分析中的应用, 拟从足底压力角度阐述当前患者存在的异常步态特征, 了解目前研究现状与不足, 为康复方案的制定和今后的研究设计提供一些思路。

方法: 检索中国知网、维普、万方和PubMed数据库, 以“前交叉韧带、足底压力、步态分析”为中文检索词, 以“anterior cruciate ligament, plantar pressure, gait analysis”为英文检索词, 按照纳入和排除标准最终纳入41篇文献。

结果与结论: ①足底压力能够评估前交叉韧带损伤及重建术后患者的步态模式, 这将提供有关患者行走过程中尽量避免疼痛和膝关节不稳定的信息。②前交叉韧带损伤患者足部负荷大小、对称性以及支撑相时相特征对称性在术后1年以上均得到显著改善, 但术后观察到的患侧足部过度旋前可能与前交叉韧带损伤有关。③因此, 基于足底压力下的步态分析能够帮助研究者们更好地理解患者步态特征, 指导术后康复的进行, 有助于降低术后患者二次损伤以及膝关节关节炎的发生。

关键词: 足底压力; 步态分析; 前交叉韧带重建术; 前交叉韧带损伤; 膝关节; 生物力学; 综述

Plantar pressure and gait analysis in patients with anterior cruciate ligament injury and reconstruction

Li Shihao¹, Li Qi², Li Zhen¹, Zhang Yuanyuan², Liu Miaomiao¹, Ouyang Yi¹, Xu Weiguo³

¹Department of Sports Rehabilitation, Tianjin University of Sport, Tianjin 301617, China; ²Department of Rehabilitation Medicine; ³Department of Traumatology, Tianjin Hospital, Tianjin 300211, China

Li Shihao, Master candidate, Department of Sports Rehabilitation, Tianjin University of Sport, Tianjin 301617, China

Corresponding author: Xu Weiguo, PhD, Chief physician, Department of Traumatology, Tianjin Hospital, Tianjin 300211, China

Abstract

BACKGROUND: Current research generally believes that the abnormal changes of lower limb gait biomechanics in patients with anterior cruciate ligament injury and reconstruction are an important risk factor for the high incidence of knee osteoarthritis in patients. As a kind of quantitative gait analysis, plantar pressure analysis has a very important clinical value for early identification of abnormal changes in gait and timely correction.

OBJECTIVE: To review the application of plantar pressure in gait analysis after anterior cruciate ligament injury and reconstruction, to describe the abnormal gait characteristics of current patients from the aspect of plantar pressure, to understand the current research status and deficiencies so as to provide some ideas for the formulation of rehabilitation programs and research design in future research.

METHODS: CNKI, VIP, Wanfang and PubMed databases were searched using “anterior cruciate ligament, plantar pressure, gait analysis” as Chinese and English search terms. Finally, 41 articles were included according to the inclusion and exclusion criteria.

¹天津体育学院运动康复学专业, 天津市 301617; 天津市天津医院, ²康复医学科, ³创伤骨科, 天津市 300211

第一作者: 李世浩, 男, 1996年生, 河北省邯郸市人, 汉族, 天津体育学院在读硕士, 主要从事运动损伤的预防和康复研究。

通讯作者: 徐卫国, 博士, 主任医师, 天津市天津医院, 天津市 300211

<https://orcid.org/0000-0002-4695-9378> (李世浩)

基金资助: 天津市科技计划项目(课题)(17ZXHLSY00140), 项目负责人: 徐卫国

引用本文: 李世浩, 李奇, 李震, 张媛媛, 刘苗苗, 欧阳懿, 徐卫国. 前交叉韧带损伤与重建术后患者的足底压力及步态分析 [J].

中国组织工程研究, 2023, 27(4):626-631.



RESULTS AND CONCLUSION: (1) Plantar pressure can evaluate the gait pattern of patients with anterior cruciate ligament injury and reconstruction, which will provide information about avoiding pain and knee instability during walking. (2) The size and symmetry of foot load and the symmetry of support phase characteristics in patients with anterior cruciate ligament injury were significantly improved more than 1 year after operation. However, the excessive pronation of the affected foot observed after operation may be related to anterior cruciate ligament injury. (3) Therefore, gait analysis based on plantar pressure can help researchers better understand the gait characteristics of patients and guide the progress of postoperative rehabilitation, which may help to reduce the occurrence of secondary injury and knee osteoarthritis.

Key words: plantar pressure; gait analysis; anterior cruciate ligament reconstruction; anterior cruciate ligament injury; knee joint; biomechanics; review

Funding: Tianjin Science and Technology Plan Program (Project), No. 17ZXHLSY00140 (to XWG)

How to cite this article: LI SH, LI Q, LI Z, ZHANG YY, LIU MM, OUYANG Y, XU WG. Plantar pressure and gait analysis in patients with anterior cruciate ligament injury and reconstruction. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2023;27(4):626-631.

0 引言 Introduction

步行是人类最重要和最基础的功能活动，正常行走过程中髋关节、膝关节和踝关节协调运动，任何环节出现问题均会影响足部受力。前交叉韧带是膝关节重要的静力性稳定结构，前交叉韧带起于胫骨髁间隆突前外方及外侧半月板前角，止于股骨外髁内侧面，其主要功能是防止胫骨过度前移，对胫骨的内旋、外旋也有限制能力^[1]。前交叉韧带表面具有机械感受器，通过神经负反馈机制对关节周围肌群进行调节，并且还能通过本体感受器向大脑传递膝关节动态信息，这些信息能够帮助维持膝关节的稳定性。而前交叉韧带损伤后，本体感觉的缺失和反射弧的改变导致周围肌群发生代偿性变化，进而导致步态的异常。无论患者是否接受手术治疗，患者步态的生物力学指标均会发生改变^[2]。

目前认为下肢步态生物力学的改变是增加患者再损伤率以及膝关节炎发病率的重要风险因素^[3]，在临床生物力学研究中，步态分析已经成为诊断疾病及评价康复的重要手段，迅速、客观且无侵入式的足底压力分析作为定量步态分析的重要环节^[4]，已被证明能够量化下肢生物力学负荷特性^[5]。了解前交叉韧带损伤及重建术后患者步行时足底压力异常特征，找出患者异常步态的原因，可以有针对性地实施康复训练，纠正异常步态。

文章分析总结了足底压力在前交叉韧带损伤及重建术后步态分析中的应用，拟从足底压力角度阐述当前患者存在的异常步态特征，了解目前研究现状与不足，为康复方案的制定和今后的研究设计提供一些思路。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 由第一作者于2021年10月进行检索。

1.1.2 检索文献时限 1999年1月至2021年10月。

1.1.3 检索数据库 中国知网、维普、万方和PubMed数据库。

1.1.4 检索词 中文检索词为“前交叉韧带、足底压力、步态分析”，英文检索词为“anterior cruciate ligament, plantar pressure, gait analysis”。中文检索式：(前交叉韧带 AND 足底压力) OR (前交叉韧带 AND 步态分析)；英文检索式：(anterior cruciate ligament AND plantar pressure) OR (anterior cruciate ligament AND gait analysis)。

1.1.5 检索文献类型 期刊论文研究原著及综述。

1.1.6 手工检索情况 无。

1.1.7 检索策略 中英文数据库检索策略，见图1。

1.2 入组标准

1.2.1 纳入标准 ①论点、论据可靠且发表在权威、专业的杂志文献；②文献内容是基于足底压力下的前交叉韧带损伤及重建术后患者的步态分析研究。

1.2.2 排除标准 ①重复性研究；②应用足底压力仪器进行评估，但不是步态分析的研究。

PubMed 数据库	中国知网数据库
#1 anterior cruciate ligament [Title/Abstract]	#1 前交叉韧带 in 篇名
#2 plantar pressure [Title/Abstract]	#2 足底压力 in 篇名
#3 gait analysis [Title/Abstract]	#3 步态分析 in 篇名
#4 #1 AND #2	#4 #2 OR #3
#5 #1 AND #3	#5 #1 AND #4
	#6 前交叉韧带 in 摘要
	#7 足底压力 in 摘要
	#8 步态分析 in 摘要
	#9 #7 OR #8
	#10 #6 AND #9
	#11 #1 AND #9
	#12 #6 AND #4

图1 | 中英文数据库检索策略

1.3 文献筛选流程 共检索出相关文献484篇，其中中文文献327篇，英文文献157篇。阅读检索文献的标题、摘要、结论进行初步筛选，最终对其中的41篇文献进行归纳总结。见图2。

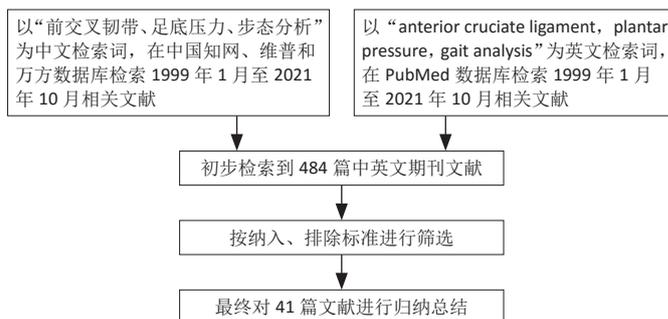


图2 | 文献筛选流程图

2 结果 Results

2.1 足底压力与步态分析 步行是人类基本的功能活动方式之一，是在保证支撑稳定性的同时，利用一系列复杂的肢体运动使身体向前移动。步态周期是行走时一侧足跟着地到该侧足跟再次着地的过程，常分为支撑相和摆动相。步态分析是利用力学原理、人体解剖学和生理学知识对人体行走状态进行对比分析的一种研究方法。步态分析包括定性分析和定量分析，定量分析目前主要有3种技术：计算机视觉技术、压力传感技术(足底压力系统)和可穿戴技术(可穿戴式传感器系统)，见图3。

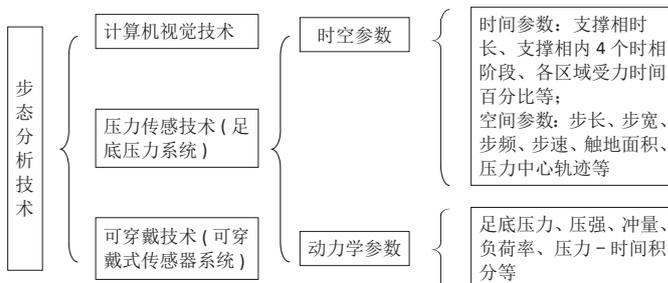


图3 | 步态分析常用技术及足底压力参数

足底压力分析是步态定量分析的研究重点^[6]。据报道, 1882年, 有研究首次对足底压力进行了研究, 到了20世纪50年代, 足底压力技术才应用于临床。足底压力数据承载着重要的行走信息, 随着足底压力仪器的变革, 告别了原始的足印法, 以压力传感器为核心的压力测试仪器大量涌入, 目前足底压力系统主要分为平板系统和鞋垫/鞋内系统, 平板系统分析压力时外界干扰较小, 但测量面积小且每次测量只能有限地分析一两个步态, 而鞋垫/鞋内系统能连续测试步态并实时监测, 但分析压力时外界干扰较大, 美国 Tekscan 公司的 F-scan 系统和比利时 Footscan 公司的平板系统以及德国 Novel 公司的 Emed 平板系统和 Pedar 鞋垫系统应用较为广泛。足底压力测量系统的优缺点, 见表 1。

表 1 | 足底压力测量系统的优缺点

测量系统	优点	缺点
鞋垫/鞋内系统	(1) 连续测定足底压力及时间等参数, 并可以进行实时监测和反馈; (2) 室内及室外均可进行测量; (3) 可以测量转弯、旋转等运动	(1) 足与鞋界面之间的受力分析较难以界定, 受到外界干扰较大; (2) 与平板系统相比, 传感器分辨率较低
平板系统	(1) 力的分析干扰小; (2) 传感器分辨率高	(1) 面积较小, 每次只能有限的分析一两个步态; (2) 多数情况下只能在室内进行测量; (3) 对于转弯、旋转等运动无法测量

随着测量技术不断的发展成熟, 临床上对于足底的分区方法多达数十种, 目前较常见的分区是将足底分为 10 个区域^[7]: 第 1 趾骨 (Toe 1, T₁), 第 2-5 趾骨 (Toe 2-5, T₂₋₅), 第 1 跖骨 (Meta 1, M1), 第 2 跖骨 (Meta 2, M2), 第 3 跖骨 (Meta 3, M3), 第 4 跖骨 (Meta 4, M4), 第 5 跖骨 (Meta 5, M5), 中足 (Midfoot), 足跟内侧 (Heel Medial, HM), 足跟外侧 (Heel Lateral, HL)。另外将步态周期的支撑相分为 5 个时刻 (足跟触地、前足触地、前后足支撑、足跟离地和足尖离地) 和 4 个时相阶段: 足跟触地阶段 (initial contact phase, ICP)、前足触地阶段 (forefoot contact phase, FFCP)、全足支撑阶段 ((foot flat phase, FFP) 和前足蹬离阶段 (forefoot push off phase, FFPOP)^[8]。足底压力分析的测试参数有: 压力、压强、接触面积、压力-时间积分、支撑相时长、足底压力中心轨迹等, 国内外研究较多的足底压力参数包括峰值压力和压力中心轨迹^[9]。

足底压力测量系统一般由压力传感器、数据线和系统自带分析软件组成, 鞋垫/鞋内系统要求受试者穿戴好测试仪器, 以平时的步态行走, 数据同步传输到分析软件中。平板系统要求受试者脱去鞋袜, 同样以平时的步态走过力板, 数据同步传输到分析软件中。

目前利用足底压力仪器对患者进行步态分析的研究主要针对的受试者人群是糖尿病足和扁平足等病理足患者^[10-11]。人体正常步行是消耗能量最小的节律性、平滑的移动, 正常行走过程中下肢协调运动, 在重力的作用下, 足会受到地面在垂直方向上的反作用力, 当人体结构或状态发生变化时, 足底压力分布也会随之变化。所以膝关节损伤后步态的改变同样能从足底压力分析中反映, 目前采用足底压力仪器进行步态分析的膝关节疾病主要包括前交叉韧带损伤^[7, 12]、前交叉韧带重建术后以及膝骨关节炎^[13-16]。

2.2 足底压力仪器在前交叉韧带损伤患者步态分析中的应用

2.2.1 足底压力时相特征方面 相关研究发现单侧前交叉韧带断裂患者步行时的足底压力时相特征出现异常^[7, 12, 17]。

与健侧相比, 患者患侧足跟触地阶段、全足支撑阶段和支

撑相总时长显著缩短, 而前足蹬离阶段显著延长^[7, 17]。患侧支撑相总时长显著缩短, 表明患者为了避免疼痛和膝不稳而代偿性采用以健侧负重为主的步态, 这在患者中经常能看到。杜天舒等^[7]发现与正常对照组相比, 前交叉韧带损伤患者双侧足足跟触地阶段、全足支撑阶段均显著缩短, 而前足触地阶段、前足蹬离阶段和支撑相总时长均显著延长。术后患者两侧肢体支撑相总时长均高于正常对照组, 这可能与术后患者步速降低有关, 因为步行速度较低可减少关节负荷, 并为主动控制膝关节运动提供更多时间。另外有研究认为健侧足底压力时相特征发现改变可能与患者在自选速度行走时都力求步态对称有关^[18], 因为该研究观察到患者两侧足底压力时相特征的改变一致。而 HUANG 等^[12]采用了不同于足底压力软件自带的步态时相特征, 同样发现与正常对照组相比, 患侧前足蹬离阶段和双侧足支撑相总时长显著延长, 而与健侧相比, 患侧前足蹬离阶段显著延长, 足支撑相总时长显著缩短。不同的是他们将前足接触阶段和全足支撑阶段合并为一个时相阶段, 并且发现与正常对照组相比, 这一时相阶段显著降低。另外, 足底压力时相特征方面的改变还与肌肉收缩能力下降以及避免前交叉韧带承受较大应力有关^[12, 19], 杜天舒等^[7]和黄红拾等^[14]认为在足跟触地阶段, 膝关节接近伸直位, 胫骨受到的剪切力主要是股四头肌收缩所提供的前向剪切力, 这会增加膝关节不稳, 而在全足支撑阶段, 黄红拾认为股股关节轴向压力的增加也会导致膝关节不稳, 所以患者为了减少患侧膝不稳而降低了这两个时相阶段。另外, HUANG 等^[12]认为在前足蹬离阶段由于髌腱和腓肠肌提供的前向剪切力几乎被地面反作用力的后向分量所平衡, 所以前交叉韧带受到的剪切力较小, 患者适应性地延长此阶段来弥补前几个时相阶段的降低。

2.2.2 足底负荷方面 除此之外, 相关研究还发现前交叉韧带损伤侧全足和足跟负荷显著降低^[7, 12, 20-21], 而中足负荷显著增高^[12, 21]。

文章发现患者患侧全足负荷显著降低, 这与以往发现的前交叉韧带损伤患者患侧垂直地面反作用力峰值降低一致^[22], 步速与足底压力负荷呈正相关^[23], 所以全足负荷的显著降低与前交叉韧带损伤患者步速变慢有关。TSUBOYAMA 等^[24]发现膝关节伸肌无力导致患者支撑相早期足后跟负荷降低, 这可能是导致足跟负荷降低的原因。有研究发现足跟负荷的降低与观察到的足底压力时相特征改变相一致, 患者通过缩短足跟触地阶段而减少了足跟的负重, 但患者前足蹬离阶段的延长却并没有发现前足负荷相应增高, 这可能与肌肉力量下降导致的蹬离阶段力量不足有关, 而中足负荷显著增高可能与患侧纵弓下降增加而致足扁平有关^[25]。除了观察整个支撑相内足底压力的变化, HUANG 等^[12]还计算了不同时相阶段的足部内外侧压力比, 发现与正常对照组相比, 患侧足跟触地阶段的足跟内外侧压力比显著降低, 这表明患侧足跟外侧压力增高, 即足部旋后增加。有趣的是, 以往研究已经表明前交叉韧带损伤可能与足部过度旋前有关^[26], 而患者在发生损伤后, 可能通过自身调整来避免再次损伤的发生。MITTLMEIER 等^[20]在研究了前足内外侧负荷比之后, 并未发现患侧与健侧有差异, 他们还发现患侧足部总冲量百分比 (占健侧的百分比) 与 60 (°)/s 等速测试下的股四头肌肌力缺陷百分比 (占健侧的百分比) 有显著相关性, 提示股四头肌肌力对称性对步态足部负荷对称性有预测作用, 考虑到肢体负荷不对称性与前交叉韧带重建术后膝骨关节炎发生有关^[27], 通过提高患侧股四头肌肌力而降低肢体间股四头肌的不对称性可能会降低膝骨关节炎的发生率。但最近一项研究并未发现股四头肌肌力对称性与步态生物力学对称性有相关性^[28], 文章认

为这可能与肌肉评估模式不同有关, 这项研究评估了股四头肌等长峰值力矩的对称性, 而肌肉在等速条件下的评估可能更能反映动态活动。

2.2.3 足底压力中心方面 SUGAWARA 等^[29]发现对于损伤侧属于优势侧肢体的患者来说, 前交叉韧带损伤组和正常对照组各项压力中心指标相比均无差异; 而对于损伤侧属于非优势侧肢体的患者来说, 前交叉韧带损伤组足底压力中心百分比、足底压力中心轨迹面积百分比和足底压力中心最大振幅值均显著低于正常对照组, 这表明优势侧肢体在损伤后更容易恢复, 但患者的非优势侧损伤更多, 压力中心能够反映平衡能力, 对于前交叉韧带损伤侧属于非优势侧肢体的患者, 其压力中心转移能力即平衡能力要弱于正常人的非优势侧, 所以应该对非优势侧损伤患者进行更进一步的平衡训练。另有学者计算了不同时相阶段的足底压力中心, 发现患侧/健侧与正常对照组相比, 压力中心在前后方向上均有差异, 而在中外方向上无显著差异^[12], 进一步表明患者压力中心向前转移存在缺陷, 这与观察到的降低足跟负重时间, 将负重快速转移到前足有关。虽然足底压力分析能够直观且迅速地得到患者步态相关数据, 但如果面对大量的足底压力数据时, 同样会带来较大的工作量和难度, 所以一些学者考虑应用数学模型对足底压力数据进行分析处理, 目前涉及的参数主要是足底压力中心参数。李晓理等^[30]采用极限学习机神经网络聚类算法对前交叉韧带损伤患者的足底压力中心数据进行聚类分析, 发现结果与临床诊断有比较好的一致性, 而从仿真结果来看, 使用 FCM 和 SVM 机器学习对足底压力中心数据进行聚类和分析的结果同样是可以接受的^[31]。另外, 还有学者建立了足底压力图像与前交叉韧带断裂的关系, 发现模型诊断前交叉韧带断裂的正确率超过 90%, 且诊断过程只需 3 s^[32]。应用数学模型具有时间短、效率高、操作简单的优点, 甚至不需要专业医务人员操作, 给诊断疾病提供了新的思路, 但目前只能作为临床上的辅助诊断, 未来研究如果能够将更多足底压力参数进行模型分析, 可能会进一步提高诊断疾病的准确性。

作者整理了足底压力仪器在前交叉韧带损伤患者步态分析中的主要研究成果, 见表 2。

2.3 足底压力仪器在前交叉韧带重建术后患者步态分析中的应用

2.3.1 足底压力时相特征方面 黄红拾等^[14]对比了术前 1 周和术后 6 个月患者的足底压力时相特征, 与术前相比, 术后患侧足跟触地阶段显著缩短, 健侧与患侧全足支撑阶段显著增高, 最重要的是发现了术后支撑相各阶段对称性均有改善, 但只有足跟触地阶段对称性有显著性差异。该研究观察到前交叉韧带重建术导致患侧足跟触地阶段显著降低, 该研究之前已经发现前交叉韧带损伤患者为了减少膝不稳而缩短足跟触地阶段, 这表明重建术并没有恢复患者正常的足底压力时相特征, 而观察到的足跟触地阶段对称性的显著改善意味着健侧足跟触地阶段也出现降低。虽然该研究不清楚这种术后改变最终对于患者是否有利, 但从肢体对称性方面来说这种改善是有利的, 因为术后早期膝关节炎的发生、发展与步态不对称有关^[27]。另外, 李玉周等^[13]研究了重建后 6-8 周患者的足底压力时相特征, 发现与健侧相比, 患侧全足支撑阶段显著增高, 前足蹬离阶段显著降低。而与正常对照组相比, 患侧足跟触地阶段和前足蹬离阶段显著降低, 支撑相总时长显著增高。健侧与正常对照组相比, 前足触地阶段和支撑相总时长显著增高。

前交叉韧带重建术还改变了患者患侧全足支撑阶段和前足蹬离阶段的时相特征, 与之前发现的前交叉韧带损伤患侧时相特征相反, 前交叉韧带重建术改善了患者的膝不稳, 这可能解

表 2 | 足底压力仪器在前交叉韧带损伤患者步态分析中的应用

第一作者	发表年份	结果	应用意义
MITTLMEIER ^[20]	1999	与健侧比: 足跟负荷 ↓, 前足内外侧负荷比无差异; 相关性分析: 股四头肌等速肌力对称性(占健侧的百分比)与患侧全足冲量对称性(占健侧的百分比)呈正相关	首次将足底压力系统应用到前交叉韧带损伤患者的步态分析, 发现该技术提供了关于恢复功能状态的附加信息
黄红拾 ^[17]	2015	与健侧比: ICP、FFP、支撑相总时长 ↓, FFPOP ↑	首次研究前交叉韧带损伤患者的足底压力时相特征, 并探讨了可能与时相特征改变相关的生物力学机制, 发现患侧时相特征发现异常改变
杜天舒 ^[7]	2016	与健侧比: ICP、FFP、支撑相总时长、全足负荷和足跟负荷 ↓, FFPOP ↑; 与正常人比: ICP、FFP、全足负荷和足跟负荷 ↓, FFPOP、FFPOP 和支撑相总时长 ↑; 健侧与正常人比: ICP、FFP ↓, FFPOP、FFPOP 和支撑相总时长 ↑	初步探讨了前交叉韧带损伤患者足底压力的动力学参数和时空参数与正常人的区别, 并且分析了其可能的生物力学机制。发现患者两侧时相特征均发生改变, 患侧动力学参数也发生改变
SUGAWARA ^[29]	2016	与正常人比: 损伤侧为非优势侧的患者, 压力中心百分比、压力中心轨迹面积百分比和压力中心最大振幅值 ↓; 损伤侧为优势侧的患者, 各个压力中心指标均无差异	前交叉韧带损伤侧属于非优势侧时, 压力中心向前转移能力明显受限, 而损伤侧属于优势侧则不会, 表明非优势侧肢体损伤后, 其平衡能力需要进一步加强
LI ^[31]	2016	用 FCM 和 SVM 机器学习对压力中心数据进行聚类和分析的仿真结果是可以接受的	首次将数学模型应用到前交叉韧带损伤患者足底压力数据的分析中, 从仿真结果看, 用模型诊断疾病的正确率尚可
HUANG ^[12]	2017	与健侧比: 支撑相总时长、足跟负荷、压力中心前后方向转移能力 ↓, FFPOP ↑; 与正常人比: FFPOP+FFP、足跟负荷、压力中心前后方向转移能力 ↓, FFPOP、支撑相总时长、中足负荷 ↑; 健侧与正常人比: 压力中心前后方向转移能力 ↓, 支撑相总时长 ↑	使用足底压力系统分析了前交叉韧带损伤患者的支撑相内不同时相阶段的压力中心轨迹, 进一步分析得出患者可能为了减少膝关节前剪切力而改变了步态模式
李晓理 ^[30]	2017	用极限学习机神经网络聚类算法对压力中心数据进行分析, 与临床诊断有较好的一致性	不仅此仿真结果可以接受, 与临床诊断也有较好的一致性
ETIN ^[21]	2017	与正常人比: 足跟负荷 ↓, 中足负荷 ↑	探讨了前交叉韧带损伤患者足底压力动力学参数改变的可能因素: 股四头肌无力和疼痛
黄红拾 ^[32]	2019	建立了足底压力图像与前交叉韧带断裂的关系, 发现模型诊断前交叉韧带断裂的正确率超过 90%, 且诊断过程只需 3 s	将足底压力图像建模来诊断疾病的正确率更高

表注: ICP 为足跟触地阶段; FFPOP 为前足触地阶段; FFP 为全足支撑阶段; FFPOP 为前足蹬离阶段

释了在术后患者中观察到的患侧前足蹬离阶段的显著降低, 但不幸的是, 研究发现患侧前足蹬离阶段与正常对照组相比, 仍有显著差异。从支撑相总时长来看, 研究发现术后两侧肢体仍高于正常对照组, 这与术后早期患者步速较慢有关, 同前交叉韧带损伤患者足底压力时相特征相一致, 不同的是患侧支撑相总时长与健侧支撑相总时长在术后显示无显著差异, 这表明前交叉韧带重建术改善了患侧承重能力, 患者两侧肢体负重时间一致。术后早期重建的组织和韧带需要愈合过程, 存在疼痛和本体感觉缺失现象, 随着组织的恢复、康复的进行以及其他韧带、肌肉和肌腱的代偿, 膝关节功能逐渐恢复, 这可能解释了在前交叉韧带重建术后 1 年患者中并未观察到患者两侧足底压力时相特征有显著差异的原因^[31], 见表 3。

表 3 | 足底压力仪器在前交叉韧带重建术后患者步态分析中的应用

第一作者	发表年份	研究结果	应用意义
MITTLMEIER ^[20]	1999	与健侧比: 术后 6 周足跟相对负荷(足跟负荷/全足负荷)↓, 前足相对负荷(足跟负荷/全足负荷)↑, 术后 12 周和 24 周足跟和前足相对负荷无差异, 所有时间点前足内外侧负荷比均无差异;	首次将足底压力系统用于前交叉韧带重建术后患者的步态评估, 发现随着时间的推移, 患者足底压力动力学参数发生改善, 足底压力动态分布的研究是临床监测和指导前交叉韧带重建术后康复过程的有效方法
黄红拾 ^[14]	2014	与术前比: 患侧 ICP ↓, 患侧 FFP、健侧 FFP 以及 ICP 对称性 ↑	初步探讨了前交叉韧带重建术对患者足底压力时相特征的影响, 发现改善了患者时相特征的对称性
ETIN ^[21]	2017	与术前比: 足跟负荷 ↑; 与正常人比: 足底负荷无差异	探讨了前交叉韧带重建术对患者足底压力动力学参数的影响, 发现术后 1 年患侧足底负荷与正常人无差异
冯馨元 ^[33]	2019	与健侧比: ICP、FFCP、FFP、FFPOP 均无差异	进一步发现术后 1 年患者足底压力时相特征对称性均较好
李玉周 ^[13]	2020	与健侧比: FFPOP、足跟外侧负荷 ↓, FFP、前足内侧负荷 ↑; 与正常人比: ICP、FFPOP、足跟负荷 ↓, 支撑相总时长 ↑; 健侧与正常人比: FFCP、支撑相总时长 ↑	全面分析了前交叉韧带重建术后早期患者足底压力动力学参数和时空参数的改变, 发现术后早期患者两侧时空参数均发生改变, 仅在患侧发现动力学参数发生改变

表注: ICP 为足跟触地阶段; FFCP 为前足触地阶段; FFP 为全足支撑阶段; FFPOP 为前足蹬离阶段

因此, 尽管术后早期改变没有向着正常人水平进展, 这可能与股四头肌无力、疼痛等有关, 但重要的是, 术后显著改善了肢体时相特征的对称性, 使步态更加协调。

2.3.2 足底负荷方面 MITTLMEIER 等^[20]在术后 6 周发现与健侧比, 患侧后足冲量显著降低, 前足冲量显著增高, 冲量是力与其作用时间的乘积, 这表明患侧负荷向前足转移增多, 这与李玉周等^[13]在术后 6-8 周的研究结果一致, 可能与患者股四头肌无力以及尽可能降低疼痛而做出的适应性改变有关^[24]。足跟触地阶段, 膝关节接近伸直位, 这时足部负荷直接上传递到膝关节, 而患者关节负荷吸收能力下降, 并且足跟触地阶段膝关节屈曲角度增大^[34], 这时关节负荷转移到不常受力的软骨区, 这可能是导致膝关节炎的诱因, 所以患者可能通过降低足跟负荷来缓解膝关节受损的负荷吸收能力, 因为该研究在膝关节炎患者行走过程中同样发现足跟负荷相对于前足出现降低^[35]。除此之外, 研究还发现与正常对照组相比, 患侧足跟外侧压强显著降低^[13], 只观察到足外侧负荷降低表明足跟受力向内侧偏移, 表明足部旋前增加。考虑到足部过度旋前已被认为可能是前交叉韧带损伤的风险因素^[26], 所以这可能是前交叉韧带重建术后患者仍存在很高的二次损伤风险的原因^[36], 而 MITTLMEIER 等^[20]在术后患者中并未发现患侧与健侧的前足内外侧负荷比有差异。随着术后时间的推移和康复的进行, 发现足底负荷大小以及对称性都有显著改善, 在术后 6 周发现的患侧与健侧负荷的差异, 在术后 12 周和 24 周并未观察到^[20]; 另外他们还发现与术后 6 周相比, 术后 12 周双足冲量不对称性显著改善, 另有学者发现重建术后 14.5 个月患侧足跟负荷较术前显著增加^[21], 且与正常对照组无差异。术后 1 年以上患者的两侧足部负荷并未发现差异, 这与术后 1 年以上患者观察到的两侧支撑相总时长无差异相一致^[33], 这些结果均表明术后 1 年以上患者步态对称性出现显著改善。异常负荷已被认为是前交叉韧带重建术后患者膝关节炎高发生率的重要风险因素^[37], 显著改善的足部

负荷可能有助于延缓膝骨关节炎的发生和发展。有研究还发现无论前交叉韧带损伤患者是否经历过重建手术, 患侧足部旋转与健侧相比均无差异^[20], 但这并不代表患侧足部旋转正常, 因为在步行过程中同样发现健侧生物力学发生异常改变, 并且与正常人相比, 已有研究观察到患侧足部旋转存在异常^[12-13], 这种足部旋转异常需要引起重视, 尤其在术后患者中发现的患侧足部过度旋前与前交叉韧带损伤有关。

3 总结与展望 Summary and prospects

3.1 既往他人该领域研究的贡献和存在的问题

(1) 前交叉韧带损伤患者: ①患者为了减轻疼痛和避免膝不稳而采取了一种减少足跟负重时长, 增加前足负重时长, 并且以健侧负重为主的步态; ②由于疼痛和股四头肌无力等因素, 前交叉韧带损伤侧全足和足跟负荷降低, 中足负荷增高, 而足部过度旋后可能与患者为了避免再次损伤有关; ③患侧压力中心在前后方向上转移能力差, 平衡能力变差, 基于压力中心的数学模型可作为临床诊断前交叉韧带损伤的辅助工具。

(2) 前交叉韧带重建术后患者: ①术后早期患者患侧呈现出一种足跟触地快、前足离地快的特点, 与术前相比, 足跟触地阶段和支撑相总时长对称性得到改善, 而术后 1 年患者所有时相特征对称性均较好, 但尚不清楚各时相阶段与正常人是否一致; ②在术后早期观察到的患侧足跟负荷降低、前足负荷增高以及全足负荷的不对称性, 在术后 1 年以上均发生显著改善, 这可能会降低膝骨关节炎的发生, 另外发现的患侧足部过度旋前可能与患者二次损伤有关。

3.2 作者综述区别于他人他篇的特点 不同于以往有关前交叉韧带损伤及重建术后患者步态分析的综述, 该综述重点分析足底压力仪器在前交叉韧带损伤及重建术后患者步态分析中的应用, 从足底压力角度找出患者步态的异常模式。

3.3 综述的局限性 目前应用足底压力设备对前交叉韧带损伤及重建术后患者进行步态分析的研究较少, 并且很多研究并未设立正常对照组, 所以文章无法将患侧与健侧/正常对照组分开进行比较, 考虑到前交叉韧带损伤后患者会存在中枢代偿机制^[38], 这可能导致健侧步态生物力学也会出现异常, 仅将患侧与健侧进行对比可能会掩盖患者的异常表现。

3.4 综述的重要意义 前交叉韧带损伤及重建术后患者的步态分析一直是研究的热点, 三维步态分析作为步态分析的“金标准”, 是定量步态分析最常用的方法, 但高昂的设备和测量分析工作量巨大等缺点限制了三维步态分析在临床上的应用。与其相比, 迅速、便捷且价格低廉的足底压力分析似乎更容易在临床上应用, 但目前临床应用较少。通过评估足底压力时相特征的变化, 将提供有关患者行走过程中尽量避免疼痛和膝关节不稳定的信息。

文章通过足底压力实时监测患者足部负荷的变化可能有助于预防患者膝骨关节炎的发生和发展。另外, 足底压力能够将足底进一步分区, 通过足部内外侧负荷比, 可以得到患者足部旋转情况, 因为前交叉韧带损伤与足部过度旋前有关, 及时了解前交叉韧带重建术后患者足部旋转可能会降低二次损伤的风险, 尤其是恢复活动的运动员。

3.5 课题组专家建议 目前关于前交叉韧带损伤及重建术后患者动态足底压力测试的研究主要评估动力学和时空参数, 而与表面肌电相结合可以得到肌电图数据, 能够挖掘更多运动异常的肌肉活动模式^[39], 更好地解释结果出现的原因。未来的研究有必要扩大受试者数量, 设立正常对照组, 以观察患者步行过程中两侧肢体的具体异常情况, 并且作者建议分析已发生二次损

伤与未发生二次损伤的前交叉韧带重建术后患者之间两侧足部内外侧负荷比的情况,这可能提供有关预防前交叉韧带重建术后患者二次损伤的更多信息。另外课题组专家建议进行长期随访,因为目前的相关研究主要是重建术后早期阶段,而之前的研究已经发现前交叉韧带重建术后不同时间段内步态生物力学变化不一致^[40-41],所以延长术后评估时间可以帮助研究者们更好地了解与患者足底压力相关的步态特征。

作者贡献: 第一作者负责综述构思设计、文章写作校对。第一、二作者参与文献收集、分析总结。通讯作者负责项目指导。全体作者都阅读并同意最终的文本。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 文章撰写遵守了《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA 声明);出版前经过专业反剽窃文献检测系统进行3次文字和图表查重;经小同行外审专家双盲审稿,同行评议认为符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- NOYES FR, JETTER AW, GROOM ES, et al. Anterior cruciate ligament function in providing rotational stability assessed by medial and lateral tibiofemoral compartment translations and subluxations. *Am J Sports Med.* 2015;43(3):683-692.
- SLATER LV, HART JM, KELLY AR, et al. Progressive changes in walking kinematics and kinetics after anterior cruciate ligament injury and reconstruction: a review and meta-analysis. *J Athl Train.* 2017;52(9):847-860.
- SHI DL, WANG YB, AI ZS. Effect of anterior cruciate ligament reconstruction on biomechanical features of knee in level walking: a meta-analysis. *Chin Med J (Engl).* 2010;123(21):3137-3142.
- 王明鑫, 俞光荣. 正常人足底压力分析的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2006,14(22):1722-1724.
- DE COCK A, VANRENTERGHEM J, WILLEMS T, et al. The trajectory of the centre of pressure during barefoot running as a potential measure for foot function. *Gait Posture.* 2008;27(4):669-675.
- CHAU T. A review of analytical techniques for gait data. Part 1: Fuzzy, statistical and fractal methods. *Gait Posture.* 2001;13(1):49-66.
- 杜天舒, 成西侠, 张春礼, 等. 前交叉韧带损伤患者动态足底压力变化 [J]. *中国运动医学杂志*, 2016,35(6):520-526.
- 黄红拾, 敖英芳, 李松竹, 等. 健康女大学生步行时左右足支撑期时相特征比较 [J]. *中国运动医学杂志*, 2011,30(2):136-139.
- 杨洁, 倪朝民. 足底压力及其临床康复应用研究进展 [J]. *中国临床保健杂志*, 2014,17(3):329-331.
- ALAM U, RILEY DR, JUGDEY RS, et al. Diabetic neuropathy and gait: a review. *Diabetes Ther.* 2017;8(6):1253-1264.
- 韩艳坤, 霍洪峰. 扁平足患者足型及步态特征研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020,35(4):434-439.
- HUANG H, KEIJSERS N, HOREMANS H, et al. Anterior cruciate ligament rupture is associated with abnormal and asymmetrical lower limb loading during walking. *J Sci Med Sport.* 2017;20(5):432-437.
- 李玉周, 王婧怡, 胡英琪. 前交叉韧带重建术后短期足底压力分布及平衡特征研究 [J]. *体育科学*, 2020,40(5):52-59.
- 黄红拾, 敖英芳, 郭秦炜, 等. 前交叉韧带重建术影响步行时足底压力时相特征初步研究 [J]. *中国运动医学杂志*, 2014,33(3):189-192.
- 王欣, 罗文, 黄文泽, 等. 单侧膝骨关节炎临床分期与双足足底压力的相关性 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(27):4312-4317.
- ZHANG Z, WANG L, HU K, et al. Characteristics of plantar loads during walking in patients with knee osteoarthritis. *Med Sci Monit.* 2017;23:5714-5719.
- 黄红拾, 于媛媛, 郭秦炜, 等. 前交叉韧带断裂患者步行时足底压力时间特征 [J]. *中国运动医学杂志*, 2015,34(3):271-274.
- SELLES RW, BUSSMANN JB, KLIP LM, et al. Adaptations to mass perturbations in transtibial amputees: kinetic or kinematic invariance? *Arch Phys Med Rehabil.* 2004;85(12):2046-2052.
- REED-JONES RJ, VALLIS LA. Kinematics and muscular responses to a ramp descent in the ACL deficient knee. *Knee.* 2008;15(2):117-124.
- MITTLMEIER T, WEILER A, SÖHN T, et al. Novel award second prize paper. Functional monitoring during rehabilitation following anterior cruciate ligament reconstruction. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1999;14(8):576-584.
- ETIN E, DEVECI MA, SONGÜR M, et al. Evaluation of plantar pressure distributions in patients with anterior cruciate ligament deficiency: preoperative and postoperative changes. *Turk J Med Sci.* 2017;47(2):587-591.
- KHANDHA A, MANAL K, CAPIN J, et al. High muscle co-contraction does not result in high joint forces during gait in anterior cruciate ligament deficient knees. *J Orthop Res.* 2019;37(1):104-112.
- DE COCK A, WILLEMS T, WITVROUW E, et al. A functional foot type classification with cluster analysis based on plantar pressure distribution during jogging. *Gait Posture.* 2006;23(3):339-347.
- TSUBOYAMA T, WINDHAGER R, BOCHDANSKY T, et al. Gait after knee arthroplasty for femoral tumor. Foot pressure patterns recorded in 20 patients. *Acta Orthop Scand.* 1994;65(1):51-54.
- ALLEN MK, GLASOE WM. Metrecom measurement of navicular drop in subjects with anterior cruciate ligament injury. *J Athl Train.* 2000;35(4):403-406.
- BECKETT ME, MASSIE DL, BOWERS KD, et al. Incidence of Hyperpronation in the ACL Injured Knee: a Clinical Perspective. *J Athl Train.* 1992;27(1):58-62.
- ITO N, CAPIN JJ, ARHOS EK, et al. Sex and mechanism of injury influence knee joint loading symmetry during gait 6 months after ACLR. *J Orthop Res.* 2021;39(5):1123-1132.
- ARHOS EK, CAPIN JJ, BUCHANAN TS, et al. Quadriceps strength symmetry does not modify gait mechanics after anterior cruciate ligament reconstruction, rehabilitation, and return-to-sport training. *Am J Sports Med.* 2021;49(2):417-425.
- SUGAWARA K, OKADA K, SAITO I, et al. Foot Pressure pattern during walking in individuals with anterior cruciate ligament injury. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2016;106(3):201-206.
- 李晓理, 黄红拾, 王杰, 等. 前交叉韧带断裂后足底压力特征的聚类分析 [J]. *自动化学报*, 2017,43(3):418-429.
- LI X, HUANG H, WANG J, et al. The analysis of plantar pressure data based on multimodel method in patients with anterior cruciate ligament deficiency during walking. *Biomed Res Int.* 2016;2016:7891407.
- 黄红拾, 王政飞, 许国雄, 等. 基于步行时足底压力信息的前交叉韧带断裂辅助诊断方法 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2019,55(5):859-864.
- 冯馨元, 白伦浩. 保留前交叉韧带残端对膝关节稳定性的意义 [J]. *中国组织工程研究*, 2019,23(4):525-531.
- 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.
- KUL-PANZA E, BERKER N. Pedobarographic findings in patients with knee osteoarthritis. *Am J Phys Med Rehabil.* 2006;85(3):228-233.
- WIGGINS AJ, GRANDHI RK, SCHNEIDER D K, et al. Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2016;44(7):1861-1876.
- JOHNSTON CD, GOODWIN JS, SPANG JT, et al. Gait biomechanics in individuals with patellar tendon and hamstring tendon anterior cruciate ligament reconstruction grafts. *J Biomech.* 2019;82:103-108.
- DAUTY M, COLLON S, DUBOIS C. Change in posture control after recent knee anterior cruciate ligament reconstruction? *Clin Physiol Funct Imaging.* 2010;30(3):187-191.
- LAMONTAGNE M, BEAULIEU ML, VARIN D, et al. Gait and motion analysis of the lower extremity after total hip arthroplasty: what the orthopedic surgeon should know. *Orthop Clin North Am.* 2009;40(3):397-405.
- HART HF, CULVENOR AG, COLLINS NJ, et al. Knee kinematics and joint moments during gait following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2016;50(10):597-612.
- GOETSCHUIS J, HERTEL J, SALIBA SA, et al. Gait biomechanics in anterior cruciate ligament-reconstructed knees at different time frames postsurgery. *Med Sci Sports Exerc.* 2018;50(11):2209-2216.

(责任编辑: WJ, ZN, ZH)