

# MRI 诊断膝关节前交叉韧带损伤的研究进展

李娟

济南市第三人民医院, 山东省济南市, 250000;

**摘要:** 膝关节前交叉韧带 (ACL) 作为保持膝关节的前向和旋转稳定性的结构, 是运动损伤的好发部位, 中国现役集训运动员 ACL 损伤总体发病率已达 0.42%, 武术、体操等运动项目尤为高发, 早期诊断是治疗和预防的关键。磁共振成像 (MRI) 作为一种无创、对软组织分辨率高的手段, 是 ACL 损伤的常规检查项目。本文系统综述近年来 MRI 诊断 ACL 损伤的研究进展, 从解剖基础与损伤机制切入, 重点阐述常规 MRI 技术的优化策略、三维成像与功能成像等新技术的临床应用价值, 深入分析诊断效能的影响因素, 并展望人工智能辅助诊断等未来发展方向, 为临床提供诊断思路。

**关键词:** 膝关节; 前交叉韧带损伤; 磁共振成像; 诊断效能; 3D-SPACE; 弥散张量成像

**DOI:** 10.69979/3029-2808.25.11.064

膝关节前交叉韧带起自胫骨髁间隆突前方凹陷处及外侧半月板前角, 呈扇状止于股骨外髁内侧面后部, 由前内侧束与后外侧束组成, 分别在屈膝和伸膝时承担主要张力, 协同维持膝关节动态稳定<sup>[1]</sup>。ACL 损伤大多是由于暴力过伸或外展外旋小腿引发, 患者通常感到膝部撕裂痛剧, 难以忍受, 行动不便, 若未及时发现进一步发展则易导致骨性关节炎等。关节镜虽为诊断金标准, 但属有创操作, 不能作为常规检查用于筛查, MRI 通过对软组织显影, 可以观察 ACL 损伤直接征象与间接征象, 诊断结果可以指导关节镜检查, 并帮助制定 ACL 重建方案及评估预后效果<sup>[2]</sup>。随着 MRI 技术不断改良升级, 3D 序列、功能成像及多模态融合等多项新技术不断应用, 有效增加了 ACL 的诊断准确率及精细化程度。

## 1 ACL 损伤的解剖基础与 MRI 诊断原理

### 1.1 解剖特征与损伤机制

ACL 是无血管组织, 长度约为 38-40mm, 宽度约 12mm, 解剖走向决定了 MRI 扫描方式。研究表明, ACL 在正中矢状面的全长显示率仅约 81.64%, 斜冠状位显示率更高。其损伤发生与解剖学危险因素高度相关, 股骨髁间窝宽度指数越小, ACL 易垂直冠状位分布, 承受负荷大, 易发生损伤, 狭窄的髁间窝还可能与 ACL 发生撞击, 进一步提升损伤概率<sup>[3]</sup>。此外, 神经认知功能差异可能影响损伤风险, ACL 损伤患者反应及处理速度均较正常人慢。运动中损伤原因最多的是运动时膝关节发力过度伸展和外展外旋, 而女运动员由于解剖结构及神经肌肉支配的特点其损伤风险明显大于男运动员。

### 1.2 MRI 诊断基本原理

正常 ACL 主要由胶原纤维构成, 多肽形成的致密网架结构可固定氢原子, 故 MRI 各序列均表现为带状低信号区, 边界清晰且张力良好, 内可偶见脂肪及滑膜条纹影。ACL 损伤后, 胶原网架结构破坏, 水肿等病理改变导致韧带内出现异常高信号, 且随损伤程度加重可出现形态改变。MRI 诊断正是基于信号异常与形态学改变, 结合直接征象与间接征象综合判断, 其中直接征象反映 ACL 本身的病理变化, 间接征象则由损伤后胫骨前移等继发改变引发<sup>[4]</sup>。

## 2 常规 MRI 技术在 ACL 损伤诊断中的优化与应用

### 2.1 扫描方案的精准化改进

常规 MRI 多采取矢状面、冠状面与横断面联合扫描, 由于 ACL 解剖特点, 常规扫描结构很难完整显示, 经研究表明, 矢状面为 ACL 观察的基本方位, 但常规二维 MRI 层厚较厚, 易导致部分结构显示不全。新型斜矢状位扫描技术, 通过在股骨髁轴位图像上, 使定位线与股骨内外后髁最凸点连线垂直并内旋一定角度进行扫描, ACL 显示比例显著提高<sup>[5]</sup>。此外, 膝关节微屈曲 (17°) 状态下的倾斜矢状位扫描效果优于伸直位, 斜冠状薄层扫描对 ACL 显示具有增加显示效应的作用, 特别有助于伸直显示不理想的患者。

### 2.2 核心扫描序列的临床价值

自旋回波序列 (SE) T1 加权像 (T1WI) 因组织对比

良好、解剖结构清晰，是肌肉骨骼检查的基础序列，但时间较长，不能广泛应用于实际工作中。快速自旋回波序列（FSE/TSE）时间短，提高了肌肉骨骼检查效率，虽组织对比度略有下降，但具有磁场不均匀及沉积敏感等优势，适合检查 ACL。T2 加权像（T2WI）上，关节积液形成的高信号与正常 ACL 的低信号形成显著对比，韧带水肿、撕裂显著，是检查交叉韧带损伤的重要序列。临床工作中以矢状面为扫描主平面，辅以冠状面与横断面为扫描方位，结合 T1WI 与 T2WI 的优势互补，可提高诊断率<sup>[6]</sup>。

### 2.3 损伤分级与征象识别

ACL 损伤的 MRI 分级已形成标准化体系：1 级为韧带内损伤，无长度改变；2 级为韧带内损伤伴长度延长；3 级为完全性韧带撕裂，1、2 级表示部分损伤，3 级表示完全损伤。诊断要点为必须识别直接征象和间接征象，直接征象包括韧带不连续、方向异常（下垂征）、消失、撕脱骨折、假瘤形成及扭曲空虚等，一旦出现明确直接征象即可确诊损伤；间接征象虽不作为诊断依据，但是可以大大提升诊断提示性<sup>[7]</sup>。

## 3 MRI 新技术在 ACL 损伤诊断中的突破

### 3.1 三维 MRI 技术的应用进展

三维快速自旋回波序列（3D-SPACE）凭借薄层扫描与多层面重建（MPR）优势，能对 ACL 进行立体显示：一项纳入 92 例患者的研究显示，3D-MRI PDWI-SPAIR 序列诊断 ACL 损伤的灵敏度、特异度与准确度分别为 98.57%，81.82%，94.57%，与关节镜检查结果 Kappa 值为 0.840，在分级诊断损伤方面的总正确率也明显优于常规 MRI<sup>[8]</sup>。Meta 分析进一步证实，3D MRI 与 2D MRI 有相同的诊断效能，但 3.0T 扫描仪可使 3D MRI 的诊断比值比（DOR）显著提升 6.04 倍，提示高场强结合三维技术具有更优的诊断潜力<sup>[9]</sup>。

### 3.2 弥散张量成像（DTI）的功能评估价值

DTI 是通过观察组织内水分子弥散运动，定量分析 ACL 微观结构的完整程度，研究发现，ACL 损伤级别不同，其部分各向异性（FA）与表观弥散系数（ADC）值存在显著差异（ $P < 0.05$ ），能够客观评价伤害程度。DTI 检测 ACL 损伤的灵敏度为 85.00%，特异度为 96.00%，准确度为 73.00%，单独应用时其特异度不高，与 3D-SPACE 联合使用后，其诊断的灵敏度为 98.63%，阴性预

测值为 93.33%，Kappa 值 0.675，具有很好的联合诊断效能<sup>[10]</sup>。这种功能与形态学结合的诊断模式，为 ACL 损伤的精准评估开辟了新路径。

## 4 MRI 诊断效能的影响因素与提升策略

### 4.1 关键影响因素分析

磁场强度对 MRI 诊断效能的影响存在争议，虽有研究认为其对膝关节疾病诊断准确率无显著差异，但高场强（3.0T）能显著提升 3D 序列的诊断性能，已经得到了证实<sup>[11]</sup>。扫描参数的变化直接影响图像的质量，层厚过大容易导致部分容积效应，定位角度不准确容易漏阅 ACL 关键结构。阅片者的经验也是非常重要，由于早期或轻微损伤的信号改变不敏感，对于间接征象容易误判，造成误诊、漏诊，同时 ACL 损伤的慢性化，导致韧带信号形态复杂，例如陈旧性损伤可能出现韧带消失或扭曲，造成诊断困难。

### 4.2 诊断准确性的提升策略

针对以上问题，在临床中多方面做出改进：机器上选择 3.0T 扫描仪及 3D-SPACE、DMI 等系列仪器为第一选择，形态、功能信息同时采集；扫描技术上选择斜矢状位与斜冠状位的组合方案，辅以膝关节微屈曲体位的扫描方法，提高 ACL 全长显示率；诊断方面重视直接征象及间接征象，如内侧半月板后角撕裂及外侧半月板根部的损伤等作为直接征象提示 ACL 损伤；加强与影像科、运动医学等多学科合作，并结合患者相关外伤史、体征，降低诊断误差。

## 5 现存问题与未来展望

### 5.1 当前研究局限

虽然 MRI 技术已经发展得相对成熟，但其仍存在较多问题：三维序列扫描耗时较长，不适用于躁动不安患者；DTI 技术特异性不高，韧带黏液变性及早中期损伤仍难以鉴别<sup>[12]</sup>；ACL 部分撕裂分级诊断，尤其是 1、2 级损伤仍难以完全确定。MRI 对 ACL 损伤后神经肌肉功能评估较差，不能体现膝关节整体稳定水平。

### 5.2 未来发展方向

人工智能（AI）技术的融入将为 ACL 损伤诊断带来革命性突破，深度学习影像技术，将实现损伤征象的自动识别与分级，提高诊断准确性、可靠性<sup>[13]</sup>。高场强 MRI（7.0T）的研发与应用将实现 ACL 胶原纤维微观结

构的可视化。多模态成像融合技术,如MRI与生物力学分析的结合,将有助于更全面的从解剖角度评估损伤程度,为后期治疗提供全面的治疗方案。此外,针对慢性ACL损伤的特异性成像标志物研究以及患者术后韧带愈合过程的影像学跟踪也将成为我们后续研究的方向。

## 6 结论

MRI是ACL损伤最主要临床诊断手段,MRI技术的发展一直朝着精准、全面的方向前进,传统的MRI技术已通过扫描方案的调整,使诊断效能稳步提高。3D-SPACE、DTI技术的引入,打破形态学的评估方式,实现了损伤程度的量化与功能评估。临床实践中,结合高场强设备、优化扫描参数与综合征象解读的多维度策略,可显著提高诊断效能。随着AI技术与高场强成像技术的发展,MRI技术将在ACL损伤的早期诊断、损伤分级、预测预后等方面发挥重要作用,为临床诊疗提供更多依据。

## 参考文献

[1]郝凡房. MRI诊断膝关节前交叉韧带损伤的应用效果分析[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8(14): 163-165.

[2]李孟琦. MRI对膝关节前交叉韧带和半月板损伤的诊断价值[J]. 现代医学与健康研究(电子版), 2022, 6(16): 90-93.

[3]姜雨燕, 张育娟, 刘昌华. 不同角度屈位MRI检查对膝关节前交叉韧带断裂的诊断价值[J]. 医疗装备, 2024, 37(17): 34-36, 41.

[4]丁洁, 周理超, 陈峥嵘. 磁共振成像技术在膝关节前交叉韧带断裂诊断中的应用研究[J]. 婚育与健康, 2022, 28(2): 101-102.

[5]薛安晓, 杨灵芝. 17°微屈位及30°屈曲位膝关节磁共振成像对膝关节外伤患者前交叉韧带断裂的诊断价值[J]. 实用医学影像杂志, 2022, 23(4): 415-418.

[6]李建华, 宋杰, 刘栋. MR斜矢状位扫描于诊断膝关节前交叉韧带撕裂的临床价值对照分析[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(3): 77-78.

[7]张育娟, 姜雨燕, 刘昌华. MRI直接征象对前交叉韧带损伤的诊断价值[J]. 医疗装备, 2024, 37(21): 34-37.

[8]熊焕煜. 3D-MRI诊断膝关节前交叉韧带及半月板损伤的价值分析[J]. 哈尔滨医药, 2022, 42(2): 92-94.

[9]汪伟, 马玉佩, 李涛. MRI 3D-SPACE序列对膝关节交叉韧带及内侧半月板后根梳状结构的评估价值[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(14): 40-43.

[10]李培, 李金平, 杨荣丽, 等. 扩散张量成像在前交叉韧带损伤中的诊断价值[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(1): 115-120.

[11]陈冰, 谢海锋, 欧志林. 3.0T磁共振成像技术在膝关节前交叉韧带断裂诊断及术后康复中的应用价值[J]. 名医, 2022(14): 15-17.

[12]耿宽, 吴仁华, 王青青. MRI对前交叉韧带黏液样变性的诊断价值[J]. 医学影像学杂志, 2022, 32(3): 489-491.

[13]王梅. 基于膝关节磁共振图像的深度学习模型自动检测前交叉韧带损伤及预测未来行全膝关节置换术风险的研究[D]. 广东: 南方医科大学, 2024.