

磁共振成像技术在膝关节损伤的研究进展

罗京安¹, 罗银灯^{2*}

¹重庆医科大学附属第二医院研究生院, 重庆

²重庆医科大学附属第二医院放射科, 重庆

收稿日期: 2025年10月14日; 录用日期: 2025年11月8日; 发布日期: 2025年11月19日

摘要

膝关节作为人体最大且最复杂的关节之一, 是连接大腿与小腿、实现屈伸及部分旋转运动的核心结构, 其功能正常与否直接影响人体运动能力与生活质量。磁共振成像(MRI)凭借高软组织分辨率, 已成为膝关节损伤诊断与评估的核心技术。本文综述膝关节损伤的磁共振扫描技术及MRI诊断的研究进展, 旨在为膝关节损伤的患者提供更高质量的图像与更准确的诊断并对更高场强的磁共振设备应用于膝关节损伤诊断的研究前景进行了展望。

关键词

膝关节, 磁共振成像, 前交叉韧带, 半月板

Research Progress of Magnetic Resonance Imaging in Knee Joint Injuries

Jing'an Luo¹, Yindeng Luo^{2*}

¹Graduate School, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

²Department of Radiology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: October 14, 2025; accepted: November 8, 2025; published: November 19, 2025

Abstract

The knee joint, as one of the largest and most complex joints in the human body, is a core structure connecting the thigh and the lower leg, enabling flexion, extension and partial rotation movements. Its normal function directly affects an individual's motor ability and quality of life. With its high soft tissue resolution, magnetic resonance imaging (MRI) has become a core technology for diagnosing and evaluating knee joint injuries. This article reviews the research progress of magnetic resonance

*通讯作者。

文章引用: 罗京安, 罗银灯. 磁共振成像技术在膝关节损伤的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(11): 1800-1805.
DOI: 10.12677/acm.2025.15113285

scanning techniques and MRI diagnosis for knee joint injuries, aiming to provide higher quality images and more accurate diagnoses for patients with knee joint injuries. It also looks forward to the application prospects of higher field strength magnetic resonance equipment in the diagnosis of knee joint injuries.

Keywords

Knee Joint, Magnetic Resonance Imaging, Anterior Cruciate Ligament, Meniscus

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

膝关节是人体最重要、最复杂的负重关节, 非常容易受损。研究[1]显示, 因交通事故原因损伤概率最高, 跌倒伤其次; 损伤以半月板(Meniscus)、前交叉韧带(ACL)、后交叉韧带(PCL)及关节周围骨折为主。由于其复杂的结构和巨大的负荷, 膝关节是运动损伤和退行性疾病的高发部位。陈梦等研究[2]发现, 28.3%的省级排球运动员存在膝关节损伤, 成年队膝关节损伤率高达 42.9%。磁共振成像(MRI)是诊断膝关节韧带损伤的主要辅助检查手段。本文综述膝关节损伤的磁共振扫描技术及 MRI 诊断的研究进展, 旨在为膝关节损伤的患者提供更高质量的图像与诊断。

2. 膝关节损伤的常见类型

膝关节是损伤和退行性病变的高发部位。膝关节损伤通常由急性创伤或慢性退行性变引起。其常见类型主要基于其解剖结构进行划分。韧带损伤中, 以前交叉韧带(ALC)撕裂最为常见。半月板损伤依据病因可分为急性创伤性撕裂和慢性退行性撕裂。软骨与骨损伤是骨关节炎的核心病变, 包括关节软骨缺损和隐匿性骨挫伤。磁共振成像因其卓越的软组织分辨能力成为无创评估这些关键结构的黄金标准[3]。

3. 形态学成像的进展

3.1. 从高场到超高场

相较于 1.5T, 3.0T MRI 在诊断早期膝关节软骨病变方面具有无可替代的优势。定量成像是 3.0T 最大的价值所在, 特别是 T2 mapping、T2* mapping 和 dGEMRIC, 能够超越传统 MRI 的形态学观察, 无创评估前交叉韧带重建术后的关节内变化。在评估移植成熟度时, T2* mapping 能有效追踪其“韧带化”过程[4]。在软骨评估方面, 定量 MRI 能敏感探测早期退变[5]。此外, 联合应用 dGEMRIC 与 T2 mapping, 可监测了再生软骨的成熟过程, 为评估软骨修复提供了重要方法论参考[6]。

尽管 3T 优势显著, 但 1.5T MRI 在全球范围内, 尤其是在资源有限的环境中, 依然不可或缺。在 1.5T 平台上应用 3D CUBE 结合压缩感知 HyperSense 序列, 能在保持与常规序列相当信噪比的同时, 凭借其各向同性无间隔的扫描特性, 显著提升对 ACL 全长结构的显示能力, 进一步有效弥补了传统 1.5T 在空间分辨率方面的局限[7]。

随着 MRI 技术的迭代, 5.0T 磁共振已可用于临床全身检查, 7.0T 磁共振则在超高分辨率成像领域展现出独特优势, 二者共同推动着医学影像诊断向更精准的方向发展。目前, 在 5.0T 场强设备针对于膝关节成像的探索与相关研究处于相对空白的阶段, 仍需要进一步挖掘。在 7.0T 场强设备方面, 在 7T 膝

关节 MRI 中联合使用 PD-FS 与 3D-DESS 序列, 可兼顾韧带、半月板的清晰显示与软骨-关节液对比及三维成像需求, 从而实现全面高效的关节结构评估[8]。该方案为超高场膝关节成像的临床优化提供了重要依据。

3.2. 功能与定量成像技术

在膝关节磁共振成像领域, 定量与功能成像技术逐渐成为精准评估韧带与软骨损伤的关键工具。弥散张量成像能通过参数各向异性分数和表观弥散系数定量反映前交叉韧带损伤程度, 且纤维示踪成像对损伤分级的诊断效能优于常规 MRI, 为 ACL 损伤的微观结构评估提供了新依据[9]。针对 DTI 采集时间过长, 采用同步多层采集技术的 RESOLVE-DTI 序列, 能在保持图像质量与诊断参数准确性的前提下, 将扫描时间缩短约 38.6%, 推动 DTI 在膝关节韧带与软骨急性损伤评估中的临床可行性[10], 该技术依赖 Philips 3.0T MR 及纤维示踪后处理工作站, 设备成本高, 基层医院难以普及。另外各医院的 DTI 参数不一致, 缺乏统一标准, 难以跨中心对比, 未来因进一步推进技术标准化。

同步多层采集技术为肌肉骨骼 MRI 明显缩短了扫描时间。与常规 TSE 序列相比, SMS-TSE 序列在腕、踝、膝关节成像中可缩短约 49% 的扫描时间, 同时保持可比的图像质量和较高的诊断准确性。该技术通过多层同步激发和 CAIPIRINHA 重建, 在保证图像质量的前提下大幅提升了成像效率, 展现出在肌肉骨骼快速成像领域的良好应用前景[11]。依赖于西门子 3.0T MAGNETOM Prisma 扫描仪及专用线圈(16 通道腕/踝线圈、15 通道膝线圈), 且需配套 CAIPIRINHA 并行采集技术, 基层医院多为中低场强 MR (1.5T), 设备兼容性差, 技术推广受限仍存在巨大改进空间。

超短回波时间(UTE)和零回波时间(ZTE)磁共振成像技术因能捕捉短 T2 组织信号, 在膝关节骨关节炎(OA)诊断中展现显著优势。UTE 序列可清晰成像半月板、韧带、钙化软骨等短 T2 组织, 3D 径向 UTE 序列对膝关节 T2 映射重复性良好, 扫描重测差异<8% [12]。而 ZTE 序列能生成类 CT 对比图像, 可精准检测骨赘等骨性结构, 或可替代 CT 评估 OA 骨性特征[13]。此外, acidoCEST-UTE MRI 技术可量化膝关节 pH 值, OA 患者软骨、半月板及关节液 pH 显著低于健康人群, 且 pH 值与膝关节功能评分(KOOS)呈强相关性[14]。新型 UTE-Cones-DESS 序列结合单点 Dixon 脂肪抑制技术, 能在 5 分钟内完成膝关节短 T2 组织高对比度成像, 有效显示骨软骨交界区、肌腱等结构, 提升 OA 病变检出效率[15]。虽然 UTE-Cones-DESS 需平衡 UTE 信号捕捉与 DESS 双回波分离, 且需离线 Matlab 重建(基于 NuFFT 算法), 临床医师需专业培训才能操作, 基层医院技术储备不足。但是这些技术为 OA 早期诊断、病情监测及疗效评估提供了新工具。

3D-PD 序列(如 3D CUBE)可清晰显示前外侧复合体(ALC)的前外侧韧带(ALL)和 Kaplan 纤维(KF), ALL 各部分可视化率超 90%, KF 超 92%, ALL 损伤检出率达 63.6%, 且观察者间一致性极佳[16]。而且 3D CUBE 诊断 ACL 损伤 III 级时准确度显著高于常规 MRI, 与关节镜一致性优于常规 MRI, 能为 ACL 损伤及伴发结构病变诊断提供更可靠的依据[17]。但是二者均未解决“微小损伤识别”问题: Guruprasad 的研究中 KF II/III 级损伤仅占 4.6%, 袁燕的研究中对 I 级损伤准确度(91.91%)虽高于常规 MRI, 但仍存在假阴性(因水肿信号掩盖细微撕裂)。

DPP-TSO-Sag-FS-PDWI 序列可通过薄层、零间距及沿 ACL 走行的双平面定位扫描, 显著提升 ACL 损伤及其分级(I~III 级)的诊断一致性与准确性, 尤其对 II 级部分撕裂的诊断价值突出[18]。将该序列与迁移学习相结合, 可开发出基于 EfficientNet-B0 的 AI 诊断模型, 在 I 级和 II 级损伤诊断中优于放射科医生, 显示出良好的临床应用潜力[19]。这些进展为 ACL 损伤的精准、无创诊断提供了新的影像与智能辅助手段。但是该技术扫描时间略长于常规 PDWI 与 SMS-TSE, 且需额外定位步骤, 操作更复杂, 对无法长时间配合的患者(如儿童、老年人)适用性差。

MRI 多序列联合应用可显著提升前交叉韧带损伤的诊断效能。3D-SPACE 序列结合 DTI 技术诊断 ACL 损伤有良好的诊断一致性[20]。许方彧等[21]进一步证实, 常规 MRI 序列联合 3D-SPACE 诊断 ACL 损伤的 Kappa 值高达 0.938, 灵敏度和准确度显著优于单一序列检查。因此 MRI 多序列联合策略能够弥补单一序列的局限性, 为 ACL 损伤的精准诊断提供更可靠的影像学依据。3D-SPACE 序列虽薄层无间隔扫描, 但层数多易受射频吸收率(SAR)、模糊效应影响, 可能导致细微损伤显示不清; 联合检查总时间较 SMS-TSE 等加速技术耗时更长, 易引发患者运动伪影。

3.3. 基于人工智能的自动化诊断

磁共振成像(MRI)是诊断 ACL 和半月板损伤的金标准, 但传统解读依赖医师经验, 存在主观性与效率问题。近年来, 深度学习技术凭借强大的图像分析能力, 在膝关节 MRI 诊断领域展现出巨大潜力, 相关研究成果丰硕。

在 ACL 损伤诊断方面, 多项研究验证了深度学习模型的高准确性。Chen 等构建的 3 个卷积神经网络(CNN)模型, 分别实现从完整 MRI 诊断 ACL 撕裂、从 ACL 撕裂病例中识别撕裂图像、区分完整与撕裂 ACL 图像, 且其诊断准确性显著高于低经验医师与医学生[22], 但是该研究只使用单一厂商的 1.5T MRI 设备且病例案例仅一例, 模型对多样病例的泛化能力尚未得到验证。基于 Xception 架构的 CNN 模型, 仅用单张膝关节 MRI 矢状位图像诊断 ACL 撕裂, 灵敏度 91.0%、特异度 86.0%、准确率 88.5%, 与经验丰富医师水平相当[23]。CNN 作为“黑箱”难以提供可解释的推理, 这在医学诊断中可能影响医生信任和采纳。

对于半月板损伤, 基于深度学习的 Keros@算法能够高精度检测半月板撕裂, 并且在临床实践中辅助医生显著提高了对内侧半月板撕裂的检测敏感性[24]。TripleMRNet 模型进一步揭示不同 MRI 平面的诊断价值, 并首次明确指出轴向平面对于深度学习模型准确识别半月板撕裂具有出乎意料的重要性[25]。但研究受限于数据集单一性与协议差异, 在可解释性上存在注意力误导与决策逻辑不透明的问题需要进一步改进。

在技术创新与临床应用拓展上, AI 合成脂肪抑制 MRI (AFSMRI)技术通过修改后的 U-Net 网络, 从非脂肪抑制 3D 质子密度(PD)序列生成合成图像, 使膝关节 MRI 扫描时间缩短 54.5%, 且对半月板、韧带撕裂等病变的检测灵敏度与特异度接近原始序列, CNR 值更优[26], 但是研究缺乏关节镜金标准对照。此外, 利用 DenseVNet 网络, 结合 T1、PD、PD 脂肪抑制及血管成像 4 种 3D 序列, 实现膝关节 13 个解剖结构的自动分割, ACL、半月板分割 Dice 相似系数分别达 0.964、0.955, 为术前 3D 建模与病理识别提供可能[27]。

尽管深度学习在膝关节 MRI 诊断中取得显著进展, 但仍存在局限性, 如多数研究样本量较小、多为单中心回顾性设计[23] [24], 模型泛化性需多中心大样本验证; 部分模型依赖特定 MRI 设备或序列[26] [27], 临床推广受限; 对部分撕裂等复杂病变的诊断准确性仍有提升空间[22]。未来, 需进一步优化模型架构、扩大数据集, 推动技术在临床实践中更广泛应用, 助力膝关节损伤的精准、高效诊断。

4. 小结

MRI 技术凭借其卓越的软组织分辨能力, 已成为膝关节损伤诊疗中不可或缺的基石。它不仅能够清晰显示韧带撕裂、半月板损伤等常见病变, 还能敏锐捕捉早期软骨退变和骨髓水肿等细微改变, 为临床制定个性化治疗方案提供了关键依据。当前该领域正同步经历着硬件革新与诊断模式智能化的双重变革: 超高场强如 5.0T 和 7.0T MRI 的应用使我们得以窥见软骨的微观结构, 为骨关节炎早期诊断开辟了新途径; 同时, 基于深度学习的人工智能模型在自动识别前交叉韧带损伤等方面已展现出与专科医师相当的

诊断能力, 这不仅有效提升了基层医疗的诊断水平, 也为专家阅片提供了高效辅助。未来膝关节 MRI 发展将更加注重多维度融合与临床实用性——通过整合超高场强影像与人工智能分析构建更全面的评估体系, 推动诊断能力从损伤识别向康复预后预测延伸, 并持续优化算法的可解释性与临床适用性, 使得膝关节诊疗迈向更精准、更个性化的新阶段。

参考文献

- [1] 李洪波, 皮美清, 廖新根, 等. 膝关节损伤 861 例流行病学调查[J]. 实用临床医学, 2020, 21(12): 87-90.
- [2] 陈梦, 胡杰, 张宇辰, 等. 高水平排球运动员膝关节损伤临床与 MRI 表现研究[J]. 体育科技, 2024, 45(6): 24-26, 29.
- [3] 钟锦建, 李梅红. MRI 在膝关节隐匿性骨折伴半月板及韧带损伤诊断价值[J]. 浙江创伤外科, 2023, 28(6): 1177-1180.
- [4] 范广涛, 施政良, 黄益龙, 等. MRT2*mapping 定量评估膝关节前交叉韧带重建术后移植物成熟度[J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(11): 1699-1703.
- [5] 王成立, 邓娜, 彭伟生, 等. 磁共振 T2-Mapping 对膝关节前交叉韧带重建术后软骨变性和移植物成熟度的评估研究[J]. 中国医疗器械信息, 2024, 30(16): 126-128.
- [6] 徐贤, 陈敏, 张君, 等. 磁共振 T2mapping 和 dGEMRIC 对膝关节再生软骨的纵向评估[J]. 中国医学影像学杂志, 2021, 29(5): 484-488.
- [7] 穆萌. 基于 3DCUBE 并压缩感知 HyperSense 序列在膝关节磁共振成像的应用中对前交叉韧带损伤诊断的价值[J]. 实用医技杂志, 2023, 30(10): 743-746.
- [8] Marth, T., Marth, A.A., Kajdi, G.W., Nickel, M.D., Paul, D., Sutter, R., *et al.* (2025) Evaluating Undersampling Schemes and Deep Learning Reconstructions for High-Resolution 3D Double Echo Steady State Knee Imaging at 7 T: A Comparison between GRAPPA, CAIPIRINHA, and Compressed Sensing. *Investigative Radiology*, **60**, 609-615. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000001168>
- [9] 毛光兰, 李培, 杨荣丽, 等. 膝关节前交叉韧带损伤的弥散张量成像观测[J]. 中国临床解剖学杂志, 2021, 39(1): 26-30, 36.
- [10] Liu, S., Zhang, Y., Liu, W., Yin, T., Yuan, J., Ran, J., *et al.* (2024) Simultaneous Multi-Slice Technique for Reducing Acquisition Times in Diffusion Tensor Imaging of the Knee: A Feasibility Study. *Skeletal Radiology*, **54**, 243-253. <https://doi.org/10.1007/s00256-024-04719-y>
- [11] Gao, F., Wen, Z., Dou, S., Kan, X., Wei, S. and Ge, Y. (2021) High-Resolution Simultaneous Multi-Slice Accelerated Turbo Spin-Echo Musculoskeletal Imaging: A Head-To-Head Comparison with Routine Turbo Spin-Echo Imaging. *Frontiers in Physiology*, **12**, Article 759888. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.759888>
- [12] Wu, Z., Zaylor, W., Sommer, S., Xie, D., Zhong, X., Liu, K., *et al.* (2023) Assessment of Ultrashort Echo Time (UTE) T2* Mapping at 3T for the Whole Knee: Repeatability, the Effects of Fat Suppression, and Knee Position. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **13**, 7893-7909. <https://doi.org/10.21037/qims-23-459>
- [13] Cheng, K.Y., Moazamian, D., Ma, Y., Jang, H., Jerban, S., Du, J., *et al.* (2023) Clinical Application of Ultrashort Echo Time (UTE) and Zero Echo Time (ZTE) Magnetic Resonance (MR) Imaging in the Evaluation of Osteoarthritis. *Skeletal Radiology*, **52**, 2149-2157. <https://doi.org/10.1007/s00256-022-04269-1>
- [14] Lombardi, A.F., Ma, Y., Jang, H., Jerban, S., Tang, Q., Searleman, A.C., *et al.* (2023) Correction: Lombardi *et al.* Acidocyst-Ute MRI Reveals an Acidic Microenvironment in Knee Osteoarthritis. *Int. J. Mol. Sci.* 2022, **23**, 4466. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article 12346. <https://doi.org/10.3390/ijms241512346>
- [15] Jang, H., Ma, Y., Carl, M., Jerban, S., Chang, E.Y. and Du, J. (2021) Ultrashort Echo Time Cones Double Echo Steady State (UTE-Cones-DESS) for Rapid Morphological Imaging of Short T₂ Tissues. *Magnetic Resonance in Medicine*, **86**, 881-892. <https://doi.org/10.1002/mrm.28769>
- [16] Guruprasad, A., Sinha, U., Kumar, S., Kumar, A., Ahmad, S., Kumar, P., *et al.* (2024) Utility of Three-Dimensional Proton Density-Weighted Sequence MRI in Knee for the Assessment of Anterolateral Complex in Anterior Cruciate Ligament Injury. *British Journal of Radiology*, **97**, 583-593. <https://doi.org/10.1093/bjr/tqae003>
- [17] 袁雁, 仇馨悦, 邓迎杰, 等. MR3DCUBE 与常规 MRI 在膝关节前交叉韧带损伤中的应用价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(09): 198-201.
- [18] Li, K., Jhonatan, F.Y., Yu, Z., Liu, J., Huang, L., Yang, H., *et al.* (2024) A New Modified MR Dual Precision Positioning of Thin-Slice Oblique Sagittal Fat Suppression Proton Density Weighted Imaging: Its Diagnostic Accuracy in Anterior

- Cruciate Ligament Injury. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 23109. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50909-4>
- [19] Chen, J., Li, K., Peng, X., Li, L., Yang, H., Huang, L., *et al.* (2023) A Transfer Learning Approach for Staging Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injury on a New Modified MR Dual Precision Positioning of Thin-Slice Oblique Sagittal FS-PDWI Sequence. *Japanese Journal of Radiology*, **41**, 637-647. <https://doi.org/10.1007/s11604-022-01385-9>
 - [20] 金嵌, 赵静, 房海燕, 等. MRI3D-SPACE 及 DTI 在膝关节前交叉韧带损伤中的诊断价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(04): 176-178.
 - [21] 许方戩, 刘彦荣, 曾果. 磁共振成像常规序列联合三维快速自旋回波序列对膝关节交叉韧带损伤的诊断价值分析[J]. 黑龙江医学, 2023, 47(24): 2989-2991.
 - [22] Chen, K., Yang, C., Wang, H., Ma, H. and Lee, O.K. (2022) Artificial Intelligence-assisted Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Tears from Magnetic Resonance Images: Algorithm Development and Validation Study. *JMIR AI*, **1**, e37508. <https://doi.org/10.2196/37508>
 - [23] Minamoto, Y., Akagi, R., Maki, S., Shiko, Y., Tozawa, R., Kimura, S., *et al.* (2022) Automated Detection of Anterior Cruciate Ligament Tears Using a Deep Convolutional Neural Network. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **23**, Article No. 577. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05524-1>
 - [24] Behr, J., Nich, C., D'Assignies, G., Zavastin, C., Zille, P., Herpe, G., *et al.* (2025) Deep Learning-Assisted Detection of Meniscus and Anterior Cruciate Ligament Combined Tears in Adult Knee Magnetic Resonance Imaging: A Crossover Study with Arthroscopy Correlation. *International Orthopaedics*, **49**, 1689-1697. <https://doi.org/10.1007/s00264-025-06531-2>
 - [25] Yang, G., Shi, Y. and Li, Q. (2025) A Comparative Analysis of Sagittal, Coronal, and Axial Magnetic Resonance Imaging Planes in Diagnosing Anterior Cruciate Ligament and Meniscal Tears via a Deep Learning Model: Emphasizing the Unexpected Importance of the Axial Plane. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **15**, 5811-5824. <https://doi.org/10.21037/qims-24-1808>
 - [26] Fayad, L.M., Parekh, V.S., de Castro Luna, R., Ko, C.C., Tank, D., Fritz, J., *et al.* (2020) A Deep Learning System for Synthetic Knee Magnetic Resonance Imaging. Is Artificial Intelligence-Based Fat-Suppressed Imaging Feasible? *Investigative Radiology*, **56**, 357-368. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000751>
 - [27] Kulseng, C.P.S., Nainamalai, V., Grøvik, E., Geitung, J., Årøen, A. and Gjesdal, K. (2023) Automatic Segmentation of Human Knee Anatomy by a Convolutional Neural Network Applying a 3D MRI Protocol. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **24**, Article No. 41. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06153-y>