

# MRI影像组学在膝骨关节炎中的应用

王鸿轩, 姬明, 李荣荣, 高春愿, 袁慧, 陈海洋\*

联勤保障部队临潼康复疗养中心医学影像科, 陕西 西安

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月5日; 发布日期: 2026年6月16日

## 摘要

膝关节骨关节炎(Knee Osteoarthritis, KOA)是临床常见的慢性退行性关节疾病, 传统影像学检查对早期病变敏感性不足, 易造成诊断延迟。MRI影像组学可高通量提取医学影像定量特征, 结合机器学习算法构建评估模型, 客观量化关节组织微观异质性, 在KOA早期诊断、病情进展预测、疗效评估及风险分层中展现出重要的应用价值。本文围绕MRI影像组学的基础理论、技术流程、在KOA诊疗中的应用现状、现存挑战及发展前景进行综述, 为该技术的临床转化与规范化应用提供参考。

## 关键词

膝关节, 骨关节炎, 磁共振, 影像组学, 早期诊断

# Application of MRI-Based Radiomics in Knee Osteoarthritis

Hongxuan Wang, Ming Ji, Rongrong Li, Chunyuan Gao, Hui Yuan, Haiyang Chen\*

Department of Medical Imaging, Lintong Rehabilitation and Sanatorium Center, PLA Joint Logistics Support Force, Xi'an Shaanxi

Received: May 11, 2026; accepted: June 5, 2026; published: June 16, 2026

## Abstract

Knee osteoarthritis (KOA) is a prevalent chronic degenerative joint disorder in clinical practice. Conventional imaging modalities show inadequate sensitivity for detecting subtle early lesions, which frequently leads to delayed diagnosis and intervention. Magnetic resonance imaging (MRI)-based radiomics enables high-throughput extraction of quantitative features from medical images and allows the construction of predictive models using machine learning algorithms, thereby objectively quantifying the microscopic heterogeneity of articular tissues. This technique has demonstrated significant

\*通讯作者。

文章引用: 王鸿轩, 姬明, 李荣荣, 高春愿, 袁慧, 陈海洋. MRI影像组学在膝骨关节炎中的应用[J]. 临床医学进展, 2026, 16(6): 1043-1048. DOI: 10.12677/acm.2026.1662309

clinical value in early diagnosis, disease progression prediction, treatment efficacy evaluation, and risk stratification of KOA. The present article systematically reviews the fundamental principles, technical workflows, current application status, existing challenges, and future prospects of MRI-based radiomics in the management of KOA, with the aim of providing theoretical references for the clinical translation and standardized implementation of this technology.

## Keywords

Knee Joint, Osteoarthritis, Magnetic Resonance Imaging, Radiomics, Early Diagnosis

Copyright © 2026 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. 膝骨关节炎的流行病学与病理机制

膝骨关节炎(Knee Osteoarthritis, KOA)是全球高发的慢性退行性关节疾病,全球受累人群超5亿,我国KOA患病率随人口老龄化进程呈逐年上升趋势[1]。KOA的病理核心是关节软骨细胞外基质的进行性破坏,早期表现为胶原纤维网络紊乱、蛋白多糖丢失及自由水异常浸润,后期逐渐出现软骨缺损、关节间隙狭窄、骨赘形成,最终导致关节疼痛与功能障碍[2]-[4]。影像学诊断手段中,X线仅能识别KOA中晚期形态学改变,对关节软骨、半月板的早期生化及微观结构变化敏感性较低,存在诊断延迟[5]。MRI影像组学作为新兴的定量影像分析技术,可对膝关节退变进程量化评估,在KOA早期诊断及预后评估中具有显著优势。伴随人工智能与自动化图像分析技术的持续发展,该技术的临床应用前景将进一步拓展。

## 2. KOA 中 MRI 影像组学的基本原理与技术进展

影像组学通过高通量提取医学影像中的纹理、灰度值等定量特征,经机器学习算法建模分析,最终实现疾病的精准评估,主要流程包括图像分割与预处理、特征提取与筛选及模型构建等,通过捕捉人眼无法辨识的组织微观异质性,突破传统MRI定性或半定量评估的主观性局限。

如今,膝关节图像的感兴趣区自动化分割日渐成熟,相比手动分割操作的耗时费力,且主观因素影响大,以U-Net、nnU-Net为代表的自动化分割技术,可快速、精准地完成膝关节核心结构分割,显著提升特征提取的效率与准确性[6]。

传统机器学习算法包括支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、逻辑回归(LR)等,在疾病诊断、预后预测和分级等任务中均表现出较高可靠性[7]-[9],但其性能依赖人工特征的设计与筛选。卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)、图卷积神经网络(GCN)等深度学习算法,可实现端到端的自主特征学习,在处理高维复杂影像数据时更具优势,在KOA诊断与进展预测中潜力巨大。但深度学习模型存在“黑箱”特性,决策过程难以解释,而逻辑回归等传统算法的特征权重清晰,可解释性更强[10]。

除算法优化外,新型MRI成像技术为影像组学提供了新的数据源与分析维度。合成MRI、超短回波时间(UTE)MRI、PET/MRI融合技术与影像组学联合应用,可有效识别早期KOA、检测软骨钙化并全面评估KOA病理进程[11][12]。而多序列图像,影像与临床数据、生物标志物的多模态数据融合能够提供更全面的信息,提高组学模型的性能[8][13][14]。

## 3. MRI 影像组学在膝骨关节炎中的应用

MRI影像组学可通过定量分析捕捉细微病理改变,为KOA的诊断、预后及疗效评估提供关键依据。

在目标结构上, KOA 相关的 MRI 影像组学分析主要围绕软骨、软骨下骨、半月板及滑膜等关节内关键结构开展[7] [15]。

临床常用于 KOA 评估的 MRI 核心序列包括 T1 加权像(T1WI)、T2 加权像(T2WI)、质子密度加权像(PDWI)及弥散加权成像(DWI)等, 不同序列的影像组学特征对应不同的生物学意义。其中, T1WI 主要用于评估骨结构与软组织形态, 其纹理特征与软骨下骨重塑、软骨下骨囊肿形成密切相关[16] [17]。T2WI 和 PDWI 对软骨损伤、退变敏感, 其纹理特征能够反映软骨退变的程度[7] [18]。

### 3.1. 诊断(早期识别与分级)

基于 MRI 的影像组学分析凭借高分辨率软组织成像优势, 在检测软骨损伤、骨髓水肿、滑膜炎等早期病变中表现突出, 研究表明, 基于软骨或软骨下骨纹理特征的模型能有效区分早期 KOA 患者与健康人群, 可在临床症状出现前识别 KOA 高危人群, 为预防性干预提供窗口[15] [19] [20]。而结合负重组织影像组学特征和生化标志物以及整合 MRI 影像组学和神经网络, 均可进一步提升 KOA 进展预测的准确性[9] [14]。

近期研究发现多种组学的联合分析如基因组学和放射组学技术的结合在早期骨关节炎诊断中表现出良好的效能[21], 这种方法同样适用于 KOA 的研究, 可通过解析疾病复杂分子网络, 为精准医疗提供理论与技术支撑。

### 3.2. 预后(进展预测与风险分层)

KOA 预后评估的核心内容包括风险分层与疾病进展预测, MRI 影像组学在该领域的应用可有效提升评估效能。其中, 整合 MRI 影像特征与临床变量的负重组织影像组学模型(LBTC-RM), 可在 KOA 发病早期有效识别高风险患者[9], 而基于软骨和软骨下骨的 MRI 影像组学特征开发级联机器学习模型在 KOA 的进展分层方面也表现良好(AUC > 0.8) [22]。

将 MRI 影像特征与血液生物标志物联合应用, 同样可提高 KOA 影像学进展的预测效能[23]。这种多模态的诊断方法不仅提高了预测的准确性, 还为个性化治疗策略的制定提供了依据。融合 MRI 影像组学与生化标志物模型与基于影像组学的列线图在关节间隙变窄与疼痛进展评估方面, 具有良好的预测效能和准确性[14] [24]。

### 3.3. 疗效评估

目前, KOA 疗效预测相关研究仍较为匮乏, 一项基于多模态 MRI 影像组学模型的研究证实, 该多模态组学模型可对关节镜下半月板摘除术患者的术后预后进行分层预测, 测试集 AUC > 0.9 [25], 提示 MRI 影像组学在疗效预测中也具有一定潜力。

## 4. MRI 影像组学在膝骨关节炎中应用的挑战与展望

尽管 MRI 影像组学在膝骨关节炎(KOA)早期诊断、预后预测及疗效评估中已展现出显著的应用潜力, 但其从基础研究向临床实践转化的过程中仍面临诸多核心瓶颈, 主要体现为研究可重复性与标准化缺失、生物学可解释性不足、模型泛化能力与临床验证体系不完善三方面。

### 4.1. 研究可重复性与标准化问题

标准化体系缺失是制约 MRI 影像组学在 KOA 领域规模化应用、实现研究结果互认的关键问题, 该问题贯穿图像采集、特征提取、模型构建全流程, 直接影响研究的可重复性与横向可比性。图像采集环节的标准化不足, 表现为不同 MRI 设备、扫描序列参数及扫描协议的差异可造成图像质量与信号特征的

异质性, 进而干扰影像组学特征提取的精准性[26]。特征提取与筛选环节同样缺乏统一规范, 分割方式、特征提取软件及特征筛选算法的不同, 会导致提取的影像组学特征存在显著偏差[27]。模型构建与验证阶段的标准化缺失表现为机器学习算法选择、训练数据集构成及模型验证方法的差异, 以上均会造成模型预测性能的波动[10] [28]。

当前已有部分研究在逐步推进影像组学标准化建设, 为解决上述问题提供了可行性。例如骨关节炎研究计划(Osteoarthritis Initiative, OAI)构建了标准化膝关节 MRI 数据集, 国际影像组学标准化倡议(IBSI)发布的影像组学指南为特征提取流程规范化提供了重要指导, 经标准化处理与流程优化后的影像组学模型, 其预测性能可得到显著提升[27]。

#### 4.2. 生物学可解释性不足

生物学可解释性匮乏是 MRI 影像组学应用于 KOA 临床诊疗的另一关键难题。现阶段多数 MRI 影像组学研究以优化模型预测效能为核心目标, 虽可高通量提取海量影像特征实现 KOA 的诊断与进展预测, 但多数特征对应的病理生理学意义尚未明确, 存在典型的“黑箱”问题。相关研究表明, 影像组学模型的生物学解释性是其落地临床的重要基础, 能够帮助临床医师明晰模型预测逻辑, 为个体化诊疗方案的制定提供可靠依据[29]。

目前已有研究尝试通过 Shapley 加法解释方法(SHAP)解析模型决策机制, 精准识别对 KOA 进展预测最具影响力的核心影像特征, 有效提升模型可解释性[22]。未来仍需深化影像组学与基因组学、转录组学的多组学融合研究, 深入挖掘影像特征背后的病理生物学内涵, 阐明影像表型与 KOA 病理进程的内在关联机制。

#### 4.3. 模型泛化能力与临床验证欠缺

模型泛化性能不足、临床验证体系不完善, 是限制 MRI 影像组学向 KOA 临床转化的重要因素。尽管目前已有多项研究成功构建出 KOA 的 MRI 影像组学预测模型, 但模型在跨中心、跨数据集的泛化能力, 以及真实临床场景下的适用性仍需进一步验证[9] [14]。部分模型仅在特定研究数据集内表现优良, 推广至更广泛的临床实践环境中时, 其预测准确性与稳定性易受外界因素干扰而下降[6]。因此, 未来研究亟需依托多中心、多种族的临床队列开展外部验证, 全面评估模型的普适性与临床实用价值, 为影像组学模型的临床落地提供坚实的数据支撑[9] [30]。

综上, MRI 影像组学在 KOA 的早期识别、风险分层、预后预测等方面具有广阔的应用前景, 但仍需攻克研究可重复性与标准化、生物学可解释性、模型泛化与临床验证三大核心挑战。未来通过完善影像组学全流程标准化体系、强化模型病理生物学解释、推进多中心临床验证, MRI 影像组学将进一步推动 KOA 诊疗向精准化、个体化方向发展。

### 基金项目

基于 MRI 的膝关节影像组学在诊断膝关节骨性关节炎中的研究(LLQC2025001)。

### 参考文献

- [1] 王明兴, 田向东, 王积翌, 等. 1990 年至 2021 年膝关节骨性关节炎全球疾病负担分析及至 2035 年的预测[J]. 国际骨科学杂志, 2026, 47(1): 64-72.
- [2] Yoshioka, N.K., Young, G.M., Khajuria, D.K., Karuppagounder, V., Pinamont, W.J., Fanburg-Smith, J.C., *et al.* (2022) Structural Changes in the Collagen Network of Joint Tissues in Late Stages of Murine OA. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 9159. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13062-y>
- [3] Onuora, S. (2015) Cartilage Matrix Stiffness Regulates Chondrocyte Metabolism and OA Pathogenesis. *Nature Reviews*

- Rheumatology*, **11**, Article No. 504. <https://doi.org/10.1038/nrrheum.2015.107>
- [4] Case, R., Thomas, E., Clarke, E. and Peat, G. (2015) Prodromal Symptoms in Knee Osteoarthritis: A Nested Case-Control Study Using Data from the Osteoarthritis Initiative. *Osteoarthritis and Cartilage*, **23**, 1083-1089. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2014.12.026>
- [5] Gelber, A.C. (2024) Knee Osteoarthritis. *Annals of Internal Medicine*, **177**, ITC129-ITC144. <https://doi.org/10.7326/annals-24-01249>
- [6] Lv, W., Peng, J., Hu, J., Lu, Y., Zhou, Z., Xu, H., et al. (2025) LMSST-GCN: Longitudinal MRI Sub-Structural Texture Guided Graph Convolution Network for Improved Progression Prediction of Knee Osteoarthritis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **261**, Article ID: 108600. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2025.108600>
- [7] Xue, Z., Wang, L., Sun, Q., Xu, J., Liu, Y., Ai, S., et al. (2022) Radiomics Analysis Using MR Imaging of Subchondral Bone for Identification of Knee Osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **17**, Article No. 414. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03314-y>
- [8] Li, W., Feng, J., Zhu, D., Xiao, Z., Liu, J., Fang, Y., et al. (2023) Nomogram Model Based on Radiomics Signatures and Age to Assist in the Diagnosis of Knee Osteoarthritis. *Experimental Gerontology*, **171**, Article ID: 112031. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2022.112031>
- [9] Chen, T., Chen, J., Liu, H., Liu, Z., Yu, B., Wang, Y., et al. (2025) Integration of Longitudinal Load-Bearing Tissue MRI Radiomics and Neural Network to Predict Knee Osteoarthritis Incidence. *Journal of Orthopaedic Translation*, **51**, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2025.01.007>
- [10] Cui, T., Liu, R., Jing, Y., Fu, J. and Chen, J. (2023) Development of Machine Learning Models Aiming at Knee Osteoarthritis Diagnosing: An MRI Radiomics Analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **18**, Article No. 375. <https://doi.org/10.1186/s13018-023-03837-y>
- [11] Wang, K., Liu, W.V., Yang, R., Li, L., Lu, X., Lei, H., et al. (2025) Super-Resolution Synthetic MRI Using Deep Learning Reconstruction for Accurate Diagnosis of Knee Osteoarthritis. *Insights into Imaging*, **16**, Article No. 44. <https://doi.org/10.1186/s13244-025-01911-z>
- [12] 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>
- [13] Hu, J., Peng, J., Zhou, Z., Zhao, T., Zhong, L., Yu, K., et al. (2024) Associating Knee Osteoarthritis Progression with Temporal-Regional Graph Convolutional Network Analysis on MR Images. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **61**, 378-391. <https://doi.org/10.1002/jmri.29412>
- [14] Wang, T., Liu, H., Zhao, W., Cao, P., Li, J., Chen, T., et al. (2025) Predicting Knee Osteoarthritis Progression Using Neural Network with Longitudinal MRI Radiomics, and Biochemical Biomarkers: A Modeling Study. *PLOS Medicine*, **22**, e1004665. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1004665>
- [15] Meena, R., Dwivedi, M., Haq, R.U. and Malik, R. (2025) Assessing the Clinical Utility of MRI in Knee Osteoarthritis: Bridging the Gap between Radiographic Findings and Patient Symptoms. *Indian Journal of Orthopaedics*, **59**, 1462-1468. <https://doi.org/10.1007/s43465-025-01464-9>
- [16] Murphy, L.A. and Scanzello, C.R. (2025) Cellular and Molecular Mechanisms Underlying Subchondral Bone Remodeling and Associated Pain in Osteoarthritis. *Connective Tissue Research*, **66**, 435-441. <https://doi.org/10.1080/03008207.2025.2540950>
- [17] Pishgar, F., Ashraf-ganjouei, A., Dolatshahi, M., Guermazi, A., Zikria, B., Cao, X., et al. (2022) Conventional MRI-Derived Subchondral Trabecular Biomarkers and Their Association with Knee Cartilage Volume Loss as Early as 1 Year: A Longitudinal Analysis from Osteoarthritis Initiative. *Skeletal Radiology*, **51**, 1959-1966. <https://doi.org/10.1007/s00256-022-04042-4>
- [18] Cao, G., Gao, S. and Xiong, B. (2023) Application of Quantitative T1, T2 and T2\* Mapping Magnetic Resonance Imaging in Cartilage Degeneration of the Shoulder Joint. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 4558. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31644-2>
- [19] Collins, J.E., Mesenbrink, P., Jin, R., Dam, E.B., Deveza, L.A., Eckstein, F., et al. (2025) Magnetic Resonance Imaging Biomarkers of Knee Osteoarthritis Progression. *ACR Open Rheumatology*, **7**, e70085. <https://doi.org/10.1002/acr2.70085>
- [20] Li, S., Cao, P., Li, J., Chen, T., Luo, P., Ruan, G., et al. (2024) Integrating Radiomics and Neural Networks for Knee Osteoarthritis Incidence Prediction. *Arthritis & Rheumatology*, **76**, 1377-1386. <https://doi.org/10.1002/art.42915>
- [21] Wei, Y., Qian, H., Zhang, X., Wang, J., Yan, H., Xiao, N., et al. (2025) Progress in Multi-Omics Studies of Osteoarthritis. *Biomarker Research*, **13**, Article No. 26. <https://doi.org/10.1186/s40364-025-00732-y>
- [22] Fu, J., Mu, L., Dong, D., Li, M., Miao, Z., Huai, X., et al. (2025) An MRI-Based Radiomics Framework for Early Identification and Progression Stratification in Knee Osteoarthritis: Data from the Osteoarthritis Initiative. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **26**, Article No. 1018. <https://doi.org/10.1186/s12891-025-09234-2>

- 
- [23] Attur, M., Krasnokutsky, S., Zhou, H., Samuels, J., Chang, G., Bencardino, J., *et al.* (2020) The Combination of an Inflammatory Peripheral Blood Gene Expression and Imaging Biomarkers Enhance Prediction of Radiographic Progression in Knee Osteoarthritis. *Arthritis Research & Therapy*, **22**, Article No. 208. <https://doi.org/10.1186/s13075-020-02298-6>
- [24] Lin, T., Peng, S., Lu, S., Fu, S., Zeng, D., Li, J., *et al.* (2023) Prediction of Knee Pain Improvement over Two Years for Knee Osteoarthritis Using a Dynamic Nomogram Based on MRI-Derived Radiomics: A Proof-of-Concept Study. *Osteoarthritis and Cartilage*, **31**, 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2022.10.014>
- [25] He, Y., Wei, J., Sun, Y., Bao, W., Huang, D., Fan, Y., *et al.* (2025) A Multimodal Deep Learning Radiomics Model for Predicting Degenerative Meniscus Tear after Arthroscopy. *PLOS One*, **20**, e0328299. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0328299>
- [26] Desai, A.D., Caliva, F., Iriondo, C., Mortazi, A., Jambawalikar, S., Bagci, U., *et al.* (2021) The International Workshop on Osteoarthritis Imaging Knee MRI Segmentation Challenge: A Multi-Institute Evaluation and Analysis Framework on a Standardized Dataset. *Radiology: Artificial Intelligence*, **3**, e200078. <https://doi.org/10.1148/ryai.2021200078>
- [27] Felfeliyan, B., Hareendranathan, A., Kuntze, G., Jaremko, J. and Ronsky, J. (2021) MRI Knee Domain Translation for Unsupervised Segmentation by CycleGAN (Data from Osteoarthritis Initiative (OAI)). 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Mexico, 1-5 November 2021, 4052-4055. <https://doi.org/10.1109/embc46164.2021.9629705>
- [28] Salamah, A.A.S., Láinez Ramos-Bossini, A.J., Khan, K.S. and Ruiz Santiago, F. (2024) Diagnostic Accuracy of Magnetic Resonance Imaging (MRI) for Symptomatic Knee Osteoarthritis: A Scoping Review. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 8001-8011. <https://doi.org/10.21037/qims-24-1544>
- [29] Humayun, A., Rehman, M. and Zainulabideen, M. (2026) Artificial Intelligence in Knee Osteoarthritis Imaging and Total Knee Arthroplasty: Advances, Challenges, and Segmentation Methods—A Review. *The Knee*, **60**, Article ID: 104327. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2026.104327>
- [30] Martel-Pelletier, J., Paiement, P. and Pelletier, J. (2023) Magnetic Resonance Imaging Assessments for Knee Segmentation and Their Use in Combination with Machine/Deep Learning as Predictors of Early Osteoarthritis Diagnosis and Prognosis. *Therapeutic Advances in Musculoskeletal Disease*, **15**, 1-39. <https://doi.org/10.1177/1759720x231165560>