

Progresses of deep learning in imaging research of knee osteoarthritis

HE Xue¹, QIAO Cui¹, XIANG Jiabao¹, WU Liang¹, ZHOU Sheng^{2*}

(1. The First Clinical Medical College of Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China;

2. Department of Radiology, Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, China)

[Abstract] Knee osteoarthritis (KOA) is a common degenerative joint disease, for which early diagnosis and accurate assessment are crucial to improve patients' life quality. Traditional imaging examinations for diagnosing and evaluating KOA faced challenges such as strong subjectivity and lack of unified diagnostic criteria. Deep learning (DL) has possibilities for automated diagnosis and assessment of KOA. The progresses in DL for X-ray and MRI research of diagnosis and evaluation of KOA, as well as in imaging assessment of total knee replacement for treating KOA were reviewed in this article.

[Keywords] osteoarthritis, knee; deep learning; diagnostic imaging

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.01.031

深度学习用于影像学研究膝骨关节炎进展

何雪¹, 乔翠¹, 项家宝¹, 吴亮¹, 周晟^{2*}

(1. 甘肃中医药大学第一临床学院, 甘肃兰州 730000; 2. 甘肃省人民医院放射科, 甘肃兰州 730000)

[摘要] 膝骨关节炎(KOA)是常见退行性关节疾病,早期诊断和精确诊疗对改善患者生活质量至关重要。传统影像学诊断和评估 KOA 存在主观性强、诊断标准不统一等问题。深度学习(DL)为自动化诊断和评估 KOA 提供了新的可能。本文围绕 DL 用于 X 线、MRI 诊断与评估 KOA,以及影像学评估以全膝关节置换术治疗 KOA 研究进展展开综述。

[关键词] 骨关节炎,膝;深度学习;诊断影像

[中图分类号] TP18; R445 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)01-0144-03

膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)是常见退行性骨关节疾病。KOA 早期以疼痛、关节僵硬及活动受限为主要临床表现,晚期关节完全受损、疼痛加重,带来较高致残率,严重影响患者生活质量;早期诊断与治疗 KOA 具有重要意义^[1]。传统影像学方法诊断 KOA 主观性强,且对早期病变敏感性不足,易致漏诊。近年来,人工智能(artificial intelligence, AI)技术,特别是深度学习(deep learning, DL)算法已广泛应用于图像分割、分类、检测及生成等分析医学影像任务,为自动化诊断和评估 KOA 提供了新的可能^[2]。本文围绕 DL 用于 X 线、MRI 诊断与评估 KOA,以及影像学评估以全膝关节置换术(total knee replacement, TKR)治疗晚期 KOA 研

究进展展开综述。

1 X 线评估 KOA

KOA 以关节软骨磨损、骨赘形成、软骨下骨硬化及滑膜炎症为主要病理特征。X 线为诊断和随访 KOA 的最常用影像学检查手段^[3],常通过人工采用 Kellgren-Lawrence(KL)分级^[4]系统判断 KOA 严重程度,将其分为 0 级(无 KOA)至 4 级(重度 KOA),但其评估准确性受医师主观经验影响较重。DL 能更为客观、准确地诊断 KOA^[5],现已广泛用于 X 线评估 KOA 分级等方面。

1.1 KOA 的 KL 分级 ANTONY 等^[6]对在 ImageNet 上经过预训练的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)进行微调,以之

[第一作者] 何雪(1993—),女,宁夏固原人,在读硕士,主治医师。研究方向:骨骼肌肉影像学。E-mail: 72771440@qq.com

[通信作者] 周晟,甘肃省人民医院放射科,730000。E-mail: lzzs@sina.com

[收稿日期] 2025-03-05 **[修回日期]** 2025-10-30

自动定量评估 X 线片所示 KOA KL 级别,其诊断 KL 0~4 级 KOA 的敏感度分别为 82.3%、29.7%、71.7% 及 78.1%,特异度分别为 68.1%、83.9%、97.4% 及 98.7%;该方法分级诊断 KOA 的准确性相比传统方法有所提高,但对轻度 KOA 的敏感度较低。NORMAN 等^[7]基于 DenseNet 神经网络架构的集合预测 KOA 严重程度,其对 KL 0~4 级 KOA 的敏感度分别为 83.7%、70.2%、68.9% 及 86.0%,特异度分别为 86.1%、83.8%、97.1% 及 99.1%;该方法对于轻度 KOA 的敏感度、无 KOA 的特异度有所提高,但对轻度 KOA 的特异度较低,且结果依赖人工标注。另有研究者^[8]开发了一个端到端、可解释、不需要人工预处理图像的模型用于评估 KOA 严重程度,提高了诊断效率与预测效能;但所用样本量较小,模型泛化能力较差。LITTLEFIELD 等^[9]基于 FastGAN 模型生成小样本图像用于对 KOA 进行 KL 分级的准确率为 72.7%,并可减少 DL 训练所需时间及资源,有助于提高诊断 KOA 的准确性和效率。SUBHA 等^[10]提出的 GAO-DCNN 系统用于 KOA 的敏感度、特异度分别达 98.25% 及 98.93%,分类准确率达 98.77%,提示开发混合 GAO-DCNN 用于 KOA 效果优于现有 DL 模型。

1.2 精准化测量

KOA 关节间隙狭窄是 KOA 进展的重要影像学标志。传统人工测量方法存在主观性强、观察者间变异度高等问题^[11]。DL 可通过自动定位股骨与胫骨关节面边缘而精确量化关节间隙宽度(joint space width, JSW)。ABDULLAH 等^[12]训练 Faster R-CNN 架构自动识别 X 线片中的 JSW,并通过提取特征实现高精度定位确定膝关节 JSW 最小区域,准确率达 98.52%,且用于分类 KOA 严重程度的总体准确率为 98.90%。GUO 等^[13]基于 DL 方法构建膝关节间隙分割模型,并建立预测关节间隙动态变化模型,可为早期干预提供量化依据。骨赘形成也是 KOA 特征性病理改变之一,定量评估骨赘对于疾病分期同样具有重要意义^[14]。

2 MRI 评估 KOA

MRI 能清晰显示膝关节软骨、半月板及韧带等软组织结构,是观察 KOA 早期改变的重要影像学方法。DL 用于 MRI 诊断与评估 KOA 展现出重要价值^[15],可于影像学数据中提取与疾病早期改变相关的细微特征,更加敏感地识别早期病变并预测风险。此外,DL 在挖掘疼痛相关影像学表征与进行相关客观评价方面也表现出潜力,能为精准分期 KOA、个体化治疗决策及评估疗效提供可靠的影像学依据与辅助工具。

DL 可提高诊断 KOA 精度,并为监测 KOA 病情提供有力支持。融合多模态影像学数据、临床变量(体质指数、疼痛指数等)及人口学信息可进一步提高预测 KOA 的准确性。SCHIRATTI 等^[16]以基于 MRI 和临床变量的 DL 分类模型预测 KOA 患者 12 个月内软骨退变情况,其曲线下面积(area under the curve, AUC)为 0.650,显著高于经过专业培训的放射科医师(0.587),而其预测 KOA 进展及进行疼痛评分的表现与经过训练的放射科医师相当。LEE 等^[17]利用 3D DenseNet 创建的预测 KOA 患者疼痛模型的 AUC 达 0.898;而基于 MRI 联合临床特征构建的联合模型预测疼痛进展的 AUC 为 0.794。PANWAR 等^[18]分别以 CNN、AlexNet、ResNet 34 及 ResNet-50 建立模型预测 KOA 严重程度,其准确率分别为 84.79%、85.66%、95.39% 及 95.73%。

3 DL 用于影像学评估以 TKR 治疗晚期 KOA

TKR 是目前治疗晚期 KOA 的主要方法,能有效缓解疼痛、重建关节功能。DL 用于评估 TKR 展现出巨大潜力,可提高诊断准确性、预测疼痛进展并辅助临床决策。

LEUNG 等^[19]基于 ResNet 34 建立的 DL 模型预测 TKR 治疗的 AUC 为 0.87,优于 KL 标准分级预测模型的 0.74,可为个体化治疗晚期 KOA 提供参考依据。TOLPADI 等^[20]基于 DenseNet-121 DL 利用 MRI、临床及人口学资料预测 TKR 效果的 AUC 为 0.834 ± 0.036 。JAMSHIDI 等^[21]利用 7 种 DL 方法构建预测 TKR 模型,其中以 Cox、DeepSurv 及线性支持向量机模型的准确性最高,AUC 均为 0.87,而 DeepSurv 仅通过 3 个特征(内侧髁骨髓病变、KL 等级及膝关节症状)即可获得相近预测效能,其 AUC 为 0.86。RAJAMOHAN 等^[22]采用 3D CNN 架构基于基线 MRI 建立 DL 模型,其预测 TKR 治疗效能高于基于基线临床风险因素的传统模型及基线膝关节 X 线片的 DL 模型。另有研究^[23]采用 Transformer 等先进架构、利用 ImageNet 预训练和三维空间相关性预测 KOA 进展至需接受 TKR 的效能良好。

4 小结与展望

DL 用于影像学评估 KOA 不仅能提高分级诊断的准确性和一致性、增进早期诊断效能,还可预测疾病进展、评估疼痛程度及 TKR 风险,为临床决策提供重要支持,有助于延缓疾病进展、减少潜在并发症及手术。

当前 DL 用于影像学评估 KOA 仍面临一些挑战,包括数据标签成本高、模型泛化能力差、依赖大量高质

量数据、模型解释性差及保障患者隐私和数据安全难度大等。未来需通过多中心、多人群、大样本、多模态融合研究建立标准化临床样本数据库,并以此为基础开发更加有效、可靠且具备可解释性的 DL 模型,促进 KOA 诊疗朝向个体化诊断和智能辅助决策方向发展。

综上,DL 用于影像学评估 KOA 前景广阔,但尚需克服技术、伦理及临床实践中的其他挑战。随着技术的不断进步和研究的深入,DL 将在诊断与治疗 KOA 中发挥越来越重要的作用。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:何雪查阅文献、撰写和修改文章;乔翠、项家宝和吴亮查阅文献;周晟审阅文章。

[参考文献]

- [1] WOJDASIEWICZ P, PONIATOWSKI Ł A, KOTELA A, et al. Comparative analysis of the occurrence and role of CX3CL1 (fractalkine) and its receptor CX3CR1 in hemophilic arthropathy and osteoarthritis[J]. *J Immunol Res*, 2020, 2020:2932696.
- [2] 李振鑫,金凤,郭欢萱,等.人工智能结合影像学用于全膝关节置换术研究现状与应用进展[J]. *中国医学影像技术*, 2025, 41(1): 152-155.
- [3] JANSEN M P, WELSING P M J, VINCKEN K L, et al. Performance of knee image digital analysis of radiographs of patients with end-stage knee osteoarthritis[J]. *Osteoarthritis Cartilage*, 2021, 29(11):1530-1539.
- [4] KELLGREN J H, LAWRENCE J S. Radiological assessment of osteo-arthrosis[J]. *Ann Rheum Dis*, 1957, 16(4):494-502.
- [5] PI S W, LEE B D, LEE M S, et al. Ensemble deep-learning networks for automated osteoarthritis grading in knee X-ray images[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1):22887.
- [6] ANTONY J, McGUINNESS K, O'CONNOR N E, et al. Quantifying radiographic knee osteoarthritis severity using deep convolutional neural networks [C]//2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR). NY: IEEE, 2016: 1195-1200.
- [7] NORMAN B, PEDOIA V, NOWOROLSKI A, et al. Applying densely connected convolutional neural networks for staging osteoarthritis severity from plain radiographs [J]. *J Digit Imaging*, 2019, 32(3):471-477.
- [8] THOMAS K A, KIDZINSKI Ł, HALILAJ E, et al. Automated classification of radiographic knee osteoarthritis severity using deep neural networks[J]. *Radiol Artif Intell*, 2020, 2(2):e190065.
- [9] LITTLEFIELD N, AMIRIAN S, BIEHL J, et al. Generative AI in orthopedics: An explainable deep few-shot image augmentation pipeline for plain knee radiographs and Kellgren-Lawrence grading[J]. *J Am Med Inform Assoc*, 2024, 31(11):2668-2678.
- [10] SUBHA B, JEYAKUMAR V, DEEPA S N. Gaussian Aquila optimizer based dual convolutional neural networks for identification and grading of osteoarthritis using knee joint images[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):7225.
- [11] ZHAO S, CAHILL D G, LI S, et al. Denoising of three-dimensional fast spin echo magnetic resonance images of knee joints using spatial-variant noise-relevant residual learning of convolution neural network[J]. *Comput Biol Med*, 2022, 151(Pt A):106295.
- [12] ABDULLAH S S, RAJASEKARAN M P. Automatic detection and classification of knee osteoarthritis using deep learning approach[J]. *Radiol Med*, 2022, 127(4):398-406.
- [13] GUO J, YAN P, LUO H, et al. Predicting joint space changes in knee osteoarthritis over 6 years: A combined model of TransUNet and XGBoost[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(2):1396-1410.
- [14] ZHANG D, DONG Y, XU Y, et al. Enhancing knee osteoarthritis diagnosis with DMS: A novel dense multi-scale convolutional neural network approach[J]. *J Orthop Surg Res*, 2024, 19(1):851.
- [15] 李健雄,张程,辛鹏飞,等.膝关节关节炎疼痛机制研究进展[J/CD]. *中华关节外科杂志(电子版)*, 2021, 15(5):596-600.
- [16] SCHIRATTI J B, DUBOIS R, HERENT P, et al. A deep learning method for predicting knee osteoarthritis radiographic progression from MRI[J]. *Arthritis Res Ther*, 2021, 23(1):262.
- [17] LEE J J, LIU F, MAJUMDAR S, et al. An ensemble clinical and MR-image deep learning model predicts 8-year knee pain trajectory: Data from the osteoarthritis initiative [J]. *Osteoarthritis Imaging*, 2021, 1:100003.
- [18] PANWAR P, CHAURASIA S, GANGRADE J, et al. Optimizing knee osteoarthritis severity prediction on MRI images using deep stacking ensemble technique[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1):26835.
- [19] LEUNG K, ZHANG B, TAN J, et al. Prediction of total knee replacement and diagnosis of osteoarthritis by using deep learning on knee radiographs: Data from the osteoarthritis initiative[J]. *Radiology*, 2020, 296(3):584-593.
- [20] TOLPADI A A, LEE J J, PEDOIA V, et al. Deep learning predicts total knee replacement from magnetic resonance images[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):6371.
- [21] JAMSHIDI A, PELLETIER J P, LABBE A, et al. Machine learning-based individualized survival prediction model for total knee replacement in osteoarthritis: Data from the osteoarthritis initiative[J]. *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2021, 73(10): 1518-1527.
- [22] RAJAMOHAN H R, WANG T, LEUNG K, et al. Prediction of total knee replacement using deep learning analysis of knee MRI[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1):6922.
- [23] ZHANG C, CHEN S, CIGDEM O, et al. MR-Transformer: A vision transformer-based deep learning model for total knee replacement prediction using MRI[J]. *Radiol Artif Intell*, 2025, 7(5):e240373.