

医学影像新技术在颞颌关节疾病诊断中的研究进展

张 瑜, 朱欣阳*, 郭长义, 王 苗, 黄瑞瑜, 韩 婷

陕西中医药大学第二附属医院影像中心, 陕西 西咸

收稿日期: 2025年11月18日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月22日

摘要

颞颌关节疾病种类复杂多样, 精准诊断是有效治疗的关键。传统影像技术存在局限, 新兴影像技术不断涌现为疾病诊断带来了新的契机。本文综述超高场强MRI、磁共振扩散张量成像、磁共振波谱分析、双能CT、能谱CT及分子影像学技术以及基于深度学习的CBCT-MRI图像自动配准技术、AI影像识别技术和颞下颌关节分割软件技术在颞颌关节疾病诊断中的应用, 探讨其原理、优势、临床价值与挑战, 为临床医生选择合适的影像诊断方法提供参考。

关键词

颞颌关节疾病, 医学影像新技术, 诊断进展

Research Progress of New Medical Imaging Technologies in the Diagnosis of Temporomandibular Joint Diseases

Yu Zhang, Xinyang Zhu*, Changyi Guo, Miao Wang, Ruiyu Huang, Ting Han

Imaging Center of the Second Affiliated Hospital of Shaanxi University of Traditional Chinese Medicine, Xixian Shaanxi

Received: November 18, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 22, 2025

Abstract

The types of temporomandibular joint diseases are complex and diverse, and accurate diagnosis is the key to effective treatment. Traditional imaging techniques have limitations, while emerging

*通讯作者。

imaging technologies continue to emerge, bringing new opportunities for disease diagnosis. This article reviews the application of ultra-high field MRI, magnetic resonance diffusion tensor imaging, magnetic resonance spectroscopy analysis, dual energy CT, spectral CT, and molecular imaging techniques, as well as deep learning based CBCT-MRI image automatic registration technology, AI image recognition technology, temporomandibular joint segmentation software technology, and AI panoramic automatic diagnostic reporting technology in the diagnosis of temporomandibular joint diseases. It explores their principles, advantages, clinical value, and challenges, providing a reference for clinical doctors to choose appropriate imaging diagnostic methods.

Keywords

Temporomandibular Joint Disease, New Medical Imaging Technologies, Diagnostic Progress

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

颞颌关节结构精细且功能复杂，由于其解剖结构的特殊性和频繁的活动度，易受多种因素影响而发病。颞颌关节疾病涵盖颞下颌关节紊乱病、脱位、强直、感染及肿瘤等多种类型，不仅会导致患者出现疼痛、关节弹响、张口受限等局部症状，严重时还会对口腔功能和生活质量造成显著影响，早期精准诊断是有效治疗的前提，但传统X线平片、关节造影、普通CT和MRI等检查存在各自的局限性，难以满足临床对疾病早期诊断和精准治疗的需求[1]。近年来，医学影像新技术发展迅速，一系列新技术不断涌现，为颞颌关节疾病诊断带来突破，提供更全面、准确的信息，助力临床治疗决策[2]。因此，深入了解和研究这些医学影像新技术在颞颌关节疾病诊断中的应用具有重要的临床意义。

2. 医学影像新技术在颞颌关节疾病诊断中的应用

2.1. 超高场强MRI

超高场强MRI一般指场强3.0T及以上设备，其原理基于高磁场强度，根据拉莫尔方程，磁场强度增加会使质子的进动频率加快，从而显著提高图像的信噪比(SNR)。同时，配合薄扫描层厚和大矩阵，进一步提高图像的空间分辨率，能够更清晰地显示颞颌关节的细微结构，如关节盘的形态、厚度、位置以及关节软骨的分层结构等[3]。

在颞颌关节疾病诊断中，超高场强MRI具有明显优势。在颞下颌关节疾病(TMD)的诊断中，能精准检测关节盘移位、穿孔及关节软骨早期损伤[4]。研究表明，对于关节盘的轻度移位，3.0T MRI的诊断准确率明显高于1.5T MRI[5]。在显示关节软骨损伤方面，超高场强MRI可以清晰地分辨出软骨的不同层次，有助于早期发现软骨的退变和磨损，为TMD的早期诊断和治疗提供重要依据[2]。此外，对于颞颌关节肿瘤的诊断，超高场强MRI能够更清楚地显示肿瘤的边界、范围以及与周围组织的关系，有助于肿瘤的定性诊断和分期，为制定手术方案提供详细信息[6]。

然而，超高场强MRI也存在一些问题。高场强会导致一些伪影的增加，如磁敏感伪影和化学位移伪影，这些伪影可能会干扰图像的判读，影响诊断的准确性[3]。解决方案方面，据最新研究显示，深度学习重建(DL)算法可以有效地抑制噪声与伪影，GE的AIR Recon DL技术应用于3.0T MRI的颞颌关节扫描，能够缩短49.2%扫描时间的同时，显著提高SNR和CNR，且在关节盘形态、位置、诊断上与传统的

MRI 具有诊断互换性[5]。其次，超高场强 MRI 设备价格昂贵，检查费用较高，限制了其在临床上的广泛应用[6]。目前的研究方向主要开发小型化、低成本高场强 MRI 核心部件，以及通过区域影像资源共享模式提高设备利用率[2]。关于高场强对人体的生物效应争议，需开展长期队列研究，结合多中心数据明确其安全性阈值，同时优化扫描参数以降低潜在风险[3]。

2.2. 磁共振扩散张量成像(DTI)

DTI 基于水分子各向异性扩散特性，在多个方向施加扩散敏感梯度测量扩散系数，生成 FA (部分各向异性分数)、MD (平均扩散系数)等参数图反映组织微观结构完整性[7]。在颞颌关节，主要用于评估关节盘、韧带微观结构变化[8]。TMD 患者中，可检测到关节盘和韧带 FA 值降低、MD 值升高，反映纤维结构破坏和水分子扩散自由度增高，还能通过术后参数变化评估修复情况[9]。

DTI 的局限性主要包括图像采集与后处理复杂、对设备和人员要求高、参数临床意义未完全明确，且受颞颌关节复杂解剖结构和周围组织干扰[7]。针对这些问题，当前研究重点包括开发针对 TMJ 区的运动伪影校准 DTI 序列，通过动态追踪下颌运动轨迹减少扫描过程中位移干扰[10]；建立标准化后处理流程，结合 AI 辅助分析工具(如基于 Transformer 架构的特征提取模型)简化操作，提高参数测量一致性[11]；开展大样本多中心研究，明确不同类型 TMD 患者 FA、MD 值的正常参考范围与病理阈值，揭示参数变化与临床症状的相关性[8]。

2.3. 磁共振波谱分析(MRS)

MRS 利用磁共振现象和化学位移原理，对体内生化代谢化合物定量分析[9]。通过测量 NAA (N-乙酰天门冬氨酸)、Cho (胆碱)、Cr (肌酸)等代谢产物共振频率和峰面积，反映组织代谢状态[7]。TMD 患者中，病变关节 NAA 降低、Cho 升高，提示代谢异常和细胞损伤，且可通过治疗前后代谢参数变化监测治疗效果[10]。对颞颌关节肿瘤，能依据代谢产物谱的特征性进行鉴别诊断[5]。

MRS 主要挑战在于信号弱，易受周围组织干扰，对磁场均匀性要求高，目前研究样本量小，结果存在差异[9]，解决方案包括优化扫描序列以提高信号强度，如采用高分辨率定位技术减少容积效应，结合匀场技术提升磁场均匀性；扩大多中心研究样本量，建立不同疾病类型的代谢谱数据库，明确标准化诊断阈值[10]；此外，结合 DTI 与 MRS 的多参数联合分析，可实现从微观结构到代谢功能的全方位评估，提升诊断特异性[11]。

2.4. 双能 CT (DECT)

DECT 利用两个不同能量 X 射线源同时扫描，依据组织在不同能量下衰减差异，实现骨组织、软组织和钙化灶精准区分，并可定量测量骨密度[5]。在颞颌关节骨关节病中，可清晰显示骨质细微破坏，骨赘形成等变化，评估疾病进展程度，可鉴别关节内钙化灶与软组织病变，避免漏诊[5]；还能通过骨密度定量评估骨折愈合情况[12]。

DECT 的局限性表现为设备和检查费用高、患者辐射剂量相对较大、图像后处理复杂[12]。针对辐射剂量问题，可采用迭代重建算法(如 Siemens Safire 技术)降低 60% 左右的辐射剂量，同时保持图像质量[5]；结合自动管电流调节、无效辐射屏蔽技术(如 X-CARE)，进一步减少敏感器官辐射暴露[12]。通过基层医院与三甲医院的远程影像协作，共享后处理资源，促进技术下沉[2]。设备成本方面，推动国产 DECT 设备研发，通过技术迭代降低制造成本，提高基层医院可及性[12]。

2.5. 能谱 CT

能谱 CT 基于单源瞬时双能技术，短时间内完成高低能量切换扫描，通过分析衰减数据获得物质能

谱曲线定性定量分析[12]。其具有高空间和密度分辨率,可清晰显示关节盘、韧带等软组织,定量分析关节软骨退变,依据能谱特征鉴别颞颌关节肿瘤良恶性,并通过治疗前后能谱参数变化评估治疗。不过,能谱 CT 图像后处理复杂,辐射剂量较高,临床研究较少,应用价值和扫描方案有待探索验证[6]。

能谱 CT 的不足包括图像后处理复杂、辐射剂量较高、临床研究较少[12]。解决方案方面,优化扫描方案,采用低剂量能谱扫描模式,结合迭代重建技术降低辐射剂量[5];开发针对 TMJ 的专用能谱分析模块,自动生成软骨退变评分、骨质密度定量报告,简化后处理流程[8]。加强临床研究,开展能谱参数与病理结果的对照研究,明确不同疾病的能谱特征[10];此外,探索能谱 CT 与 MRI 的多模态融合技术,整合骨质结构与软组织功能信息,提升复杂病例诊断准确性。

2.6. 分子影像学技术

分子影像学技术融合影像学与分子生物学、生物化学等多学科,利用特异性分子探针标记生物分子或细胞,通过 PET/CT、PET/MRI 等实现可视化和定量分析[7]。TMD 早期,可检测关节软骨细胞代谢异常、炎性因子表达等分子水平改变,实现早期诊断[10];对颞颌关节肿瘤,能特异性标记肿瘤细胞表面靶点,清晰显示肿瘤位置、大小、范围和活性,为鉴别诊断、分期及复发转移监测提供依据[12]。

目前分子影像技术的主要局限在于探针存在特异性、稳定性和靶向性的不足,检查设备和费用高昂,图像解读缺乏统一标准[7],当前研究重点包括开发针对 TMJ 早期软骨退变的特异性分子探针,如靶向 Cx43 半通道(关节软骨退变关键分子)的探针,实现软骨退化过程的特异性标记[10];优化探针设计,提高靶向结合效率与体内稳定性,降低非特异性结合干扰[11]。针对设备成本问题,推动 PET/MRI 一体化设备的小型化研发,探索低成本分子探针制备技术[11]。图像解读方面,建立分子影像学诊断标准,结合 AI 辅助分析工具量化探针摄取水平,提高诊断一致性。此外,开展分子影像学与病理活检的对照研究,验证技术的临床可靠性[5]。

2.7. 基于深度学习的影像技术

2.7.1. CBCT-MRI 图像自动配准技术

该技术通过深度学习算法实现 CBCT(骨质结构清晰)与 MRI(软组织显示优良)图像的精准融合,整合两种模态优势,为诊断提供全面信息[11]。其原理是利用神经网络学习 TMJ 区域解剖特征,实现图像的自动定位、粗配准与精细配准[9]。临床应用中,可同时清晰显示骨质破坏与软组织病变(如关节盘移位合并骨赘形成),为手术方案制定提供精准解剖参考[5]。

技术挑战主要在于配准精度易受解剖结构复杂性、图像采集差异影响[9]。解决方案包括优化多步骤配准流程,先通过 Torch Reg 实现全局粗配准,再经 Elastix 可变形配准进行精细调整,结合自动 TMJ 区域裁剪技术减少无关组织干扰[7];扩大训练数据集,纳入不同疾病类型、不同扫描参数的图像,提高算法鲁棒性[10];开发定量评估指标,如配准误差、组织重叠率等,确保配准精度[11]。

2.7.2. AI 影像识别与分割技术

AI 影像识别技术基于卷积神经网络(CNN)、Transformer 等架构,自动识别 TMJ 病变特征(如关节盘移位、软骨损伤、骨质破坏)[8];颞下颌关节分割软件技术则通过深度学习算法实现关节盘、软骨、骨质等解剖结构的自动化分割,为定量分析提供基础[9]。临床应用中,可提高病变检出效率,减少人为漏诊,为大规模筛查提供可能[5]。

局限性包括算法对少见病、复杂病变的识别准确率较低,分割结果受图像质量影响较大[7]。研究方向包括采用知识增强分类模块,结合医学知识图谱提升小样本病变识别能力[10];通过生成对抗网络(GAN)增强低质量图像,提高分割鲁棒性[11];开发可解释性 AI 系统,通过热力图显示病变识别依据,

增强临床医生信任度[8]。此外,开展多中心算法验证,结合《颞下颌关节常规MRI检查规范及诊断标准》优化模型,提高诊断一致性[4]。

综上,超高场强MRI、DTI、MRS、双能CT、能谱CT、分子影像学技术及基于深度学习的影像融合与AI识别技术,分别从解剖结构、微观功能、分子代谢等多维度突破了传统影像技术的局限,为颞颌关节疾病的早期诊断、精准分型及疗效监测提供了更丰富的支撑。各技术在诊断价值、辐射风险及成本方面各具特征,其核心差异与应用要点汇总如下表1。

Table 1. Comparison of new imaging technologies for diagnosing temporomandibular joint diseases
表1. 颞颌关节疾病诊断影像新技术对比

技术类型	物理原理	主要诊断目的	优势	局限性	辐射风险	成本
超高场强MRI	高磁场强度提高质子进动频率,提升SNR与空间分辨率	软骨:早期损伤、分层结构显示;关节盘:移位、穿孔;骨质:肿瘤侵犯范围;炎性肿瘤:定性与分期	软组织分辨率高,无辐射,细微结构显示清晰	伪影干扰,设备与检查费用高,生物效应不明确	无	高
磁共振扩散张量成像(DTI)	基于水分子各向异性扩散,通过FA、MD等参数反映微观结构	软骨:无直接诊断价值;关节盘:纤维结构破坏;韧带:微观损伤与修复;炎性肿瘤:无直接诊断价值	评估组织微观结构,无创监测修复过程	采集与后处理复杂,参数意义不明确,易受干扰	无	中-高
磁共振波谱分析(MRS)	利用化学位移定量分析代谢产物(NAA、Cho等)	软骨:代谢异常;关节盘:代谢损伤;炎性肿瘤:代谢特征鉴别	分子水平评估,监测治疗效果	信号弱,易受干扰,样本量小,诊断标准不统一	无	高
双能CT(DECT)	双能量X射线源扫描,依据衰减差异区分组织类型	软骨:无直接诊断价值;关节盘:无直接诊断价值;骨质:细微破坏、骨密度测量;炎性肿瘤:钙化灶鉴别	骨质显示清晰,定量分析准确	设备与检查费用高,辐射剂量较大,后处理复杂	中	高
能谱CT	单源瞬时双能扫描,获取物质能谱曲线	软骨:退变定量分析;关节盘:形态显示;骨质:细微变化;炎性肿瘤:良恶性鉴别	高分辨率,定性定量结合	后处理复杂,辐射剂量较高,临床研究少	中	高
分子影像学技术	分子探针标记生物分子,PET/CT/MRI可视化	软骨:早期代谢异常;关节盘:无直接诊断价值;炎性肿瘤:靶点标记、分期与复发监测	超早期诊断,特异性强	探针性能不足,设备费用高,诊断标准缺乏	有(PET/CT)/无(PET/MRI)	极高
CBCT-MRI自动配准技术	深度学习算法融合两种模态图像	软骨:形态与功能结合评估;关节盘:移位合并骨质变化;骨质:破坏范围;炎性肿瘤:综合鉴别	整合结构与功能信息,配准精度高	受图像质量影响,算法鲁棒性需提升	低(CBCT)+无(MRI)	中-高
AI影像识别与分割技术	基于CNN/Transformer架构识别病变与分割结构	软骨:损伤分级;关节盘:移位、穿孔识别;骨质:破坏检测;炎性肿瘤:良恶性筛查	效率高,减少漏诊,定量分析	少见病识别率低,依赖大数据训练	中无(基于MRI)/有(基于CT)	中

3. 总结与展望

医学影像新技术为颞颌关节疾病诊断带来革命性突破，从传统的解剖结构显示迈向微观结构、代谢功能及分子水平的多维度评估，显著提升早期诊断准确性和临床实用性[1]。然而，该类技术目前仍存在设备成本高、操作复杂、图像后处理难度大、诊断标准不统一等有待解决的关键问题，制约了其在临床的规模化应用[2]。具体技术还存在各自的特殊挑战，如 DTI 参数解读、分子探针靶向性等[2]。

未来的研究应聚焦于以下具体可操作的方向：1. 开发针对 TMJ 区成像序列，如伪影校准的 DTI 序列、低剂量高分辨率能谱 CT 扫描方案，优化技术适用性[4]；2. 优化分子探针设计，探索靶向 Cx43 半通道、软骨退变特异性标志物的探针，明确其标记 TMJ 早期软骨退变的生化机制[7]；3. 建立多中心、大样本数据库，制定超高场强 MRI、MRS 等技术的标准化诊断阈值，结合《颞下颌关节常规 MRI 检查规范》统一诊断标准[4]；4. 推进 AI 与多模态影像融合技术，开发集 CBCT-MRI 配准、病变识别、定量分析、报告生成于一体的智能化诊断系统，简化操作流程[11]；5. 开展低成本技术研发，包括国产 DECT 设备、小型化高场强 MRI 核心部件、低成本分子探针，提高技术可及性[3]；6. 探索影像参数与临床疗效的关联，建立基于影像特征的治疗效果预测模型，实现精准治疗指导[8]。

通过上述研究方向的深入探索，有望进一步突破瓶颈，推动颞颌关节疾病诊断向更精准、高效、普惠的方向发展，为患者提供更精准医疗服务[6]。

基金项目

陕西省教育厅，自然科学专项，21JK0593。

参考文献

- [1] 傅开元. 颞下颌关节紊乱病影像学检查的必要性以及存在的问题[J]. 中华口腔医学杂志, 2019, 58(8): 505-509.
- [2] 魏丽丽, 李波, 程勇. 颞下颌关节紊乱病的 MRI 临床应用进展[J]. 口腔医学, 2024, 44(1): 11-15.
- [3] 柳新华, 张敏, 王强, 等. 应用不同线圈的颞下颌关节磁共振图像比较[J]. 中华口腔医学杂志, 2025, 59(7): 489-494.
- [4] 傅开元, 胡敏, 余强, 等. 颞下颌关节常规 MRI 检查规范及关节盘移位诊断标准的专家共识[J]. 中华口腔医学杂志, 2020, 55(9): 577-580.
- [5] 闫森, 乔永明, 段亮伟. 37 例颞下颌关节盘不可复性前移位患者自然转归的临床及磁共振成像特征分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2024, 42(1): 82-88.
- [6] 郭春丰. 颞颌关节疾病的核磁共振诊断[J]. 大家健康(中旬版), 2016, 10(13): 60-61.
- [7] 钟毅, 刘欣, 肖云丹, 等. 医学影像纹理分析在骨肌系统疾病中的研究进展[J]. 磁共振成像, 2023, 14(8): 156-160.
- [8] Liu, M.Q., Zhang, X.W., Fan, W.P., et al. (2023) Functional Changes of the Lateral Pterygoid Muscle in Patients with Temporomandibular Joint Disc Displacement. *Journal of Craniofacial Surgery*, 34, e189-e192.
- [9] 刘菲涤, 杜芳, 程海泉. 基于 MRI 图像纹理分析的应用及研究进展[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2018, 24(5): 426-429.
- [10] Yura, S., Harada, S. and Kobayashi, K. (2015) Diagnostic Accuracy on Magnetic Resonance Imaging for the Diagnosis of Osteoarthritis of the Temporomandibular Joint. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 9, ZC95-ZC97. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2015/12302.6260>
- [11] Schiffman, E., Ohrbach, R., Truelove, E., Look, J., Anderson, G., Goulet, J., et al. (2014) Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD) for Clinical and Research Applications: Recommendations of the International RDC/TMD Consortium Network* and Orofacial Pain Special Interest Group. *Journal of Oral & Facial Pain and Headache*, 28, 6-27. <https://doi.org/10.11607/jop.1151>
- [12] 武攻, 陈志晔. 评估颞下颌关节盘前移位患者髁突骨质的纹理特征改变: 基于 MRI 灰度共生矩阵技术[J]. 分子影像学杂志, 2025, 48(1): 70-75.