

多模态 MRI 在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的 临床应用价值

唐艺珊

(山东省立医院医学影像科, 山东 济南250021)

摘要：乳腺癌是全球女性最常见的恶性肿瘤之一，其发病率呈逐年上升且年轻化的趋势，严重威胁女性的生命健康与生存质量。新辅助化疗（Neoadjuvant Chemotherapy, NAC）作为局部晚期乳腺癌、炎性乳腺癌及部分有保乳需求患者的标准术前治疗策略，核心价值在于缩小原发肿瘤体积、清除微小转移灶、降低腋窝淋巴结负荷，提高手术切除率与保乳率，同时可早期评估肿瘤对化疗药物的敏感性，为后续治疗方案的调整提供重要依据。然而，乳腺癌具有高度的异质性，不同分子分型、病理分级及临床分期的肿瘤对同一化疗方案的反应差异显著，部分患者可出现原发性耐药或治疗反应不佳，若未能及时识别并调整治疗方案，不仅会延误最佳治疗时机，还会增加疾病进展、复发及转移的风险，同时加重患者的经济负担与化疗相关不良反应。传统的新辅助化疗疗效评估手段主要依赖临床触诊、乳腺超声、钼靶X线及单一模态MRI，这些方法多以肿瘤最大径线的变化作为核心评估指标，难以在早期、定量、精准层面反映肿瘤细胞水平、微观结构及肿瘤微环境的改变，存在评估滞后、灵敏度不足、特异性较低等局限性。例如，临床触诊受医师经验、肿瘤位置及患者乳腺腺体致密程度影响较大，难以准确判断肿瘤的实际大小与浸润范围；超声检查对微小病灶的检出率有限，且无法有效区分治疗后肿瘤组织的纤维化、炎性反应与残存活性肿瘤组织；单一模态MRI仅提供肿瘤的形态学或某一项功能学信息，无法全面反映肿瘤的生物行为与治疗反应。多模态MRI是近年来快速发展的一种一体化成像技术，其核心是在同一检查流程中整合常规解剖成像、动态增强成像、功能代谢成像、灌注成像等多种序列，从宏观形态到微观功能、从定性观察到定量分析，全方位、多层次获取肿瘤的形态学特征、血流动力学变化、水分子扩散状态、代谢物浓度等多维度信息，实现对肿瘤生物学行为的全面评估。在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中，多模态MRI可早期捕捉肿瘤在细胞凋亡、血管生成、代谢活性等方面的细微变化，相较于传统评估手段，具有无创、精准、可重复、早期预测等显著优势，能够有效解决传统评估方法的局限性，为临床提供更可靠的疗效评估依据。本文围绕多模态MRI的各类技术原理、成像方法、在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的具体临床应用、现存挑战及未来发展方向进行系统、全面的综述。首先详细阐述多模态MRI的核心技术（包括常规解剖成像、DCE-MRI、DWI、MRS等）的原理与成像规范；其次深入分析多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的具体应用，包括疗效评估标准对应的影像学特征、病理完全缓解（Pathological Complete Response, pCR）的影像学预测、早期疗效预测与动态监测、个体化治疗指导与预后评估等方面；再次探讨当前多模态MRI在临床应用中存在的技术局限性与临床应用障碍，并提出针对性的优化策略；最后总结多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的核心优势与临床价值，展望未来的研究方向与临床应用前景，旨在为多模态MRI在乳腺癌精准诊疗中的规范化应用与临床推广提供坚实的理论依据、实践参考与研究思路，推动乳腺癌诊疗模式从经验化治疗向精准化、个体化治疗转变，最终改善乳腺癌患者的长期生存质量。

关键词：多模态MRI；乳腺癌；新辅助化疗；疗效评估；影像组学；精准医疗；病理完全缓解；表观扩散系数

中图分类号：R445；R73

文献标识码：A

文章编号：3106-2040 (2025) 03-0025-12

DOI: 10.62022/CPH.issn3106-2040.2025.03.003

Clinical Application Value of Multimodal MRI in the Evaluation of Neoadjuvant Chemotherapy Efficacy in Breast Cancer

Tang Yishan

(Department of Medical Imaging, Shandong Provincial Hospital, Jinan, Shandong 250021)

Abstract: Breast cancer is one of the most common malignant tumors among women worldwide, with an increasing incidence and a younger trend year by year, which seriously threatens women's life health and quality of life. Neoadjuvant chemotherapy (NAC) has become a standard preoperative treatment strategy for patients with locally advanced breast cancer, inflammatory breast cancer and some patients with

作者简介：唐艺珊，硕士，副主任医师，研究方向为乳腺及腹部影像诊断。

breast-conserving needs. Its core value is to reduce the volume of primary tumors, eliminate micro-metastases, reduce the burden of axillary lymph nodes, improve the surgical resection rate and breast-conserving rate. At the same time, it can early evaluate the sensitivity of tumors to chemotherapeutic drugs and provide an important basis for the adjustment of subsequent treatment plans. However, breast cancer has high heterogeneity, and tumors with different molecular subtypes, pathological grades and clinical stages have significant differences in response to the same chemotherapy regimen. Some patients may have primary drug resistance or poor treatment response. If the treatment plan is not identified and adjusted in time, it will not only delay the best treatment opportunity, but also increase the risk of disease progression, recurrence and metastasis, and加重 the economic burden of patients and chemotherapy-related adverse reactions. Traditional methods for evaluating the efficacy of neoadjuvant chemotherapy mainly rely on clinical palpation, breast ultrasound, mammography and single-mode MRI. These methods mostly take the change of the maximum tumor diameter as the core evaluation index, which is difficult to reflect the changes of tumor cellular level, microstructure and tumor microenvironment at an early, quantitative and accurate level, and have limitations such as delayed evaluation, insufficient sensitivity and low specificity. For example, clinical palpation is greatly affected by the doctor's experience, tumor location and the density of the patient's breast glands, making it difficult to accurately judge the actual size and infiltration range of the tumor; ultrasound examination has limited detection rate for small lesions and cannot effectively distinguish fibrosis, inflammatory reaction and residual active tumor tissue of the tumor after treatment; single-mode MRI can only provide morphological or one functional information of the tumor, and cannot fully reflect the biological behavior and treatment response of the tumor. Multimodal MRI is an integrated imaging technology developed rapidly in recent years. Its core is to integrate various sequences such as conventional anatomical imaging, dynamic contrast-enhanced imaging, functional metabolic imaging and perfusion imaging in the same examination process, to obtain multi-dimensional information such as morphological characteristics, hemodynamic changes, water molecule diffusion status and metabolite concentration of tumors from macro morphology to micro function, from qualitative observation to quantitative analysis, so as to realize a comprehensive evaluation of tumor biological behavior. In the evaluation of neoadjuvant chemotherapy efficacy for breast cancer, multimodal MRI can early capture subtle changes in tumor cell apoptosis, angiogenesis and metabolic activity. Compared with traditional evaluation methods, it has significant advantages such as non-invasiveness, accuracy, repeatability and early prediction, which can effectively solve the limitations of traditional evaluation methods and provide a more reliable basis for clinical efficacy evaluation. This paper systematically and comprehensively reviews the technical principles, imaging methods, specific clinical applications, existing challenges and future development directions of multimodal MRI in the evaluation of neoadjuvant chemotherapy efficacy for breast cancer. Firstly, it elaborates in detail the principles and imaging standards of the core technologies of multimodal MRI (including conventional anatomical imaging, DCE-MRI, DWI, MRS, etc.); secondly, it deeply analyzes the specific applications of multimodal MRI in the evaluation of neoadjuvant chemotherapy efficacy for breast cancer, including the imaging characteristics corresponding to the efficacy evaluation standards, the imaging prediction of pathological complete response (pCR), early efficacy prediction and dynamic monitoring, individualized treatment guidance and prognosis evaluation; thirdly, it discusses the technical limitations and clinical application obstacles of current multimodal MRI in clinical application, and puts forward targeted optimization strategies; finally, it summarizes the core advantages and clinical value of multimodal MRI in the evaluation of neoadjuvant chemotherapy efficacy for breast cancer, looks forward to the future research directions and clinical application prospects, aiming to provide a solid theoretical basis, practical reference and research ideas for the standardized application and clinical promotion of multimodal MRI in the precise diagnosis and treatment of breast cancer, promote the transformation of breast cancer diagnosis and treatment mode from empirical treatment to precise and individualized treatment, and ultimately improve the long-term quality of life of breast cancer patients.

Keywords: Multimodal MRI; Breast cancer; Neoadjuvant chemotherapy; efficacy evaluation; Radiomics; Precision medicine; Pathological complete response; Apparent diffusion coefficient

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 乳腺癌的流行现状与治疗挑战

乳腺癌是全球女性最常见的恶性肿瘤,其发病率和死亡率均位居女性恶性肿瘤前列,已成为全球公共卫生领域的重大挑战之一。根据世界卫生组织下属国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)发布的《2020年全球癌症统计报告》(GLOBOCAN 2020)

数据显示,全球乳腺癌新发病例约226万例,占女性恶性肿瘤新发病例的24.5%,死亡病例约68万例,占女性恶性肿瘤死亡病例的15.5%,无论是发病率还是死亡率,均居女性恶性肿瘤首位^[1]。其中,发展中国家乳腺癌新发病例占全球的53.8%,死亡病例占全球的62.4%,随着经济发展、生活方式改变及人口老龄化加剧,发展中国家乳腺癌的发病态势更为严峻。

在我国,随着居民生活水平提高、饮食结构改变、生

育观念转变、人口老龄化进程加快以及乳腺疾病筛查普及度的提升,乳腺癌的发病人数呈现逐年快速递增的趋势,且发病年龄趋于年轻化。据《中国肿瘤登记年报》数据显示,我国乳腺癌发病率已从2015年的45.2/10万上升至2022年的62.5/10万,年均增长率达5.8%,远高于全球平均增长率(2.3%);每年新发病例约42万例,占全球新发病例的18.6%,死亡病例约12万例,占全球死亡病例的17.6%。其中,我国乳腺癌患者的发病高峰年龄为45-55岁,较欧美国家提前10-15年,且约30%的患者确诊时已处于局部晚期,错过了最佳的早期治疗时机,给治疗带来了巨大挑战。

乳腺癌的治疗是一个综合性的系统工程,目前临床采用的治疗方式主要包括手术治疗、化疗、放疗、内分泌治疗、靶向治疗及免疫治疗等,治疗方案的选择需根据患者的年龄、临床分期、病理类型、分子分型、身体状况等多种因素综合判断。其中,新辅助化疗(NAC)作为局部晚期乳腺癌、炎性乳腺癌及部分有保乳需求患者的标准术前治疗策略,自20世纪70年代开始应用于临床,经过数十年的发展,已成为乳腺癌综合治疗体系中的重要组成部分,其临床价值得到了全球医学界的广泛认可^[2]。

新辅助化疗的核心作用机制主要包括以下几个方面:一是缩小原发肿瘤体积,降低肿瘤临床分期,使原本无法手术切除的局部晚期乳腺癌患者获得手术机会,同时提高保乳手术的成功率,减少乳房切除带来的身心创伤;二是清除乳腺原发肿瘤周围的微小浸润病灶及区域淋巴结中的微小转移灶,降低手术过程中肿瘤播散的风险,减少术后复发与转移的概率;三是通过术前化疗可早期评估肿瘤对化疗药物的敏感性,为术后辅助治疗方案的制定提供重要依据,对于化疗敏感的患者,可继续采用同类化疗方案进行术后辅助治疗,对于化疗不敏感或耐药的患者,则可及时调整治疗方案,避免无效化疗带来的不良反应与医疗资源浪费;四是对于部分HER-2阳性、三阴性等高危分子分型的乳腺癌患者,新辅助化疗联合靶向治疗、免疫治疗等手段,可进一步提高治疗效果,改善患者的长期预后^[3]。

然而,乳腺癌具有高度的异质性,这种异质性不仅体现在肿瘤的形态学、病理类型上,更体现在分子水平上,不同分子分型(如Luminal A型、Luminal B型、HER-2阳性型、三阴性型)的乳腺癌,其生物学行为、治疗反应及预后存在显著差异。临床研究数据显示,约20%-30%的乳腺癌患者对新辅助化疗反应不佳,甚至出现原发性耐药,

表现为化疗后肿瘤体积无缩小、甚至增大,或出现新的转移灶,这类患者若继续采用原化疗方案,不仅无法达到治疗效果,还会因化疗药物的细胞毒性作用,出现恶心、呕吐、脱发、骨髓抑制、肝肾功能损伤等不良反应,严重影响患者的生活质量,同时延误最佳的治疗时机,增加疾病进展与死亡的风险。

因此,如何早期、精准地评估乳腺癌新辅助化疗的疗效,及时识别化疗敏感与耐药患者,为个体化治疗方案的调整提供科学依据,成为当前乳腺癌临床诊疗领域亟待解决的关键问题。而疗效评估的准确性,直接依赖于有效的评估手段,传统的乳腺癌新辅助化疗疗效评估方法存在诸多局限性,已无法满足现代精准医疗背景下的临床需求^[4]。

传统的疗效评估手段主要包括临床触诊、乳腺超声、钼靶X线及单一模态MRI,这些方法的评估核心多为肿瘤最大径线的变化,难以全面、精准地反映肿瘤的治疗反应^[5]。具体而言,临床触诊是最基础、最便捷的评估方法,主要依靠医师的手感判断肿瘤的大小、质地、边界、活动度等,但该方法受医师临床经验、肿瘤位置(如深部肿瘤)、患者乳腺腺体致密程度等因素影响较大,主观性强,准确性较低,难以准确判断肿瘤的实际大小与浸润范围,尤其对于化疗后肿瘤体积无明显变化但细胞活性已明显抑制的病例,易出现误判;乳腺超声检查具有无创、便捷、经济、可重复等优势,可清晰显示肿瘤的形态、边界、内部回声、血流信号等特征,但其对微小病灶(直径<5mm)的检出率有限,且无法有效区分治疗后肿瘤组织的纤维化、炎性反应与残存活性肿瘤组织,导致疗效评估的特异性较低;钼靶X线检查主要用于乳腺钙化灶的检出,对于致密型乳腺的肿瘤显示效果较差,且难以评估肿瘤的浸润深度与腋窝淋巴结转移情况,在新辅助化疗疗效评估中的应用受到较大限制;单一模态MRI(如仅采用动态增强MRI或扩散加权成像)仅能提供肿瘤的某一项信息(如血流灌注或水分子扩散状态),无法全面反映肿瘤的形态学、功能学及代谢学特征,难以捕捉化疗早期肿瘤的细微变化,存在评估滞后的问题。

此外,传统疗效评估方法多为定性或半定量评估,缺乏客观、可重复的定量指标,不同医师之间的评估结果一致性较差,难以形成标准化的评估体系,不利于多中心研究的开展与技术的临床推广。因此,寻找一种无创、精准、早期、定量的疗效评估手段,成为改善乳腺癌新辅助化疗

诊疗效果、推动精准医疗发展的关键。

1.1.2 多模态MRI技术的兴起与发展

随着磁共振成像技术的快速发展,单一模态MRI已无法满足临床对肿瘤精准评估的需求,多模态MRI技术应运而生,并逐步成为肿瘤影像学评估的研究热点与发展方向^[6]。多模态MRI是指在同一检查流程中,整合两种或两种以上不同成像原理的MRI序列,通过多维度、多层面的成像,全面获取病变的形态学、血流动力学、水分子扩散、代谢物浓度等多方面信息,实现对病变生物学行为的综合评估,其核心优势在于“多维度整合、优势互补”,能够突破单一模态MRI的局限性,更真实、更全面地反映病变的本质特征。

从定义来看,多模态MRI的核心是“多模态整合”,这里的“多模态”不仅包括不同成像原理的MRI序列(如解剖成像、功能成像、代谢成像),还包括不同的成像参数、不同的后处理方法,以及与其他影像学技术(如超声、CT、PET-CT)的融合。与单一模态MRI相比,多模态MRI能够从宏观到微观、从定性到定量,全方位地展示肿瘤的形态特征、内部结构、血流灌注、细胞密度、代谢活性等生物学信息,为肿瘤的诊断、分期、疗效评估及预后预测提供更丰富、更精准的依据。

多模态MRI技术的发展历程与磁共振成像技术的进步密切相关。20世纪80年代,常规MRI序列(T1WI、T2WI)开始应用于临床,主要用于显示人体解剖结构,为病变定位提供基础;20世纪90年代,动态增强MRI(DCE-MRI)与扩散加权成像(DWI)技术逐步成熟,开始应用于肿瘤的诊断与鉴别诊断,标志着MRI技术从单纯的解剖成像向功能成像转变;21世纪初,磁共振波谱成像(MRS)、灌注加权成像(PWI)等技术逐步应用于临床,进一步丰富了MRI的功能评估维度,形成了初步的多模态MRI评估体系;近年来,随着人工智能、影像组学、大数据技术的快速发展,多模态MRI与这些技术的融合越来越紧密,通过对多模态影像数据的深度挖掘与量化分析,实现了肿瘤的精准分型、疗效预测与预后评估,推动多模态MRI技术进入了精准化、智能化的发展阶段。

在乳腺癌诊疗体系中,多模态MRI技术的应用越来越广泛,已成为乳腺癌诊断、分期、疗效评估及预后预测的重要手段。目前,乳腺癌诊疗中常用的多模态MRI技术主要包括以下几类:

一是常规解剖成像序列,主要包括T1加权成像(T1WI)与T2加权成像(T2WI),是乳腺MRI检查的基础序列,主要用于清晰显示乳腺的正常解剖结构(如皮肤、皮下脂肪、腺体组织、导管结构、胸大肌、胸小肌及腋窝淋巴结),准确定位肿瘤的位置、大小、形态、边界、浸润范围等形态学特征,为后续的功能序列成像与疗效评估提供基础参照。

二是动态增强MRI(Dynamic Contrast-Enhanced MRI, DCE-MRI),是乳腺肿瘤评估中最常用的功能成像序列之一,通过静脉注射钆类对比剂(如钆喷酸葡胺、钆特酸葡胺等),连续多期采集乳腺图像,分析肿瘤组织的对比剂摄取、分布与排泄过程,反映肿瘤的血流灌注、血管通透性及血管生成状态。DCE-MRI可通过后处理获得时间-信号强度曲线(Time-Intensity Curve, TIC)及相关定量参数(如容量转移常数K_{trans}、速率常数K_{ep}、血管外细胞外间隙容积比V_e等),为肿瘤的良恶性鉴别、疗效评估提供重要依据。

三是扩散加权成像(Diffusion-Weighted Imaging, DWI),是基于水分子布朗运动原理的功能成像技术,无需注射对比剂即可反映组织细胞的密度与微观结构变化。其核心定量指标为表观扩散系数(Apparent Diffusion Coefficient, ADC),ADC值的大小与组织细胞密度呈负相关,细胞密度越高,水分子扩散受限越明显,ADC值越低;反之,细胞密度越低,水分子扩散越自由,ADC值越高。在乳腺癌新辅助化疗中,DWI可通过ADC值的变化,早期反映肿瘤细胞的凋亡与坏死情况,是早期疗效预测的重要指标。

四是磁共振波谱成像(Magnetic Resonance Spectroscopy, MRS),是目前唯一可无创检测活体组织代谢物变化的影像学技术,能够在体定量分析肿瘤内部代谢产物(如胆碱、肌酸、脂肪、乳酸等)的浓度,反映肿瘤的代谢活性与恶性程度^[7]。乳腺癌组织中,由于肿瘤细胞增殖活跃,胆碱及其化合物(如磷酸胆碱、甘油磷酸胆碱)的含量显著升高,而肌酸、脂肪等正常代谢物的含量降低,MRS可通过检测这些代谢物的峰值变化,评估肿瘤的恶性程度与治疗反应。

五是其他新兴功能MRI技术,随着影像技术的不断发展,体素内不相干运动成像(Intravoxel Incoherent Motion, IVIM)、扩散张量成像(Diffusion Tensor Imaging, DTI)、血氧水平依赖成像(Blood Oxygen Level Dependent, BOLD)、化学交换饱和转移成像(Chemical Exchange

Saturation Transfer, CEST) 等新兴功能序列逐步应用于乳腺癌的研究与临床实践中。这些新兴技术进一步丰富了多模态MRI的评估维度,例如IVIM可分离水分子扩散与微循环灌注成分,更精准地反映肿瘤微环境;DTI可评估肿瘤组织的微观结构完整性,反映肿瘤的浸润程度;BOLD-MRI可评估肿瘤的氧合状态,预测肿瘤的化疗敏感性;CEST成像可检测肿瘤组织中的蛋白质、多肽等分子水平变化,为肿瘤的精准评估提供新的思路。

此外,多模态MRI技术的发展还离不开后处理技术的进步,尤其是影像组学与人工智能技术的融合应用。影像组学是指通过计算机算法,从医学影像中提取大量的定量特征(如形态特征、纹理特征、功能特征等),并结合临床数据、病理数据等,构建预测模型,实现对肿瘤的精准分型、疗效预测与预后评估^[8]。人工智能技术(如机器学习、深度学习)的应用,进一步提高了影像组学特征提取的效率与准确性,能够自动完成肿瘤的分割、特征提取、参数测量与疗效评估,减少人工主观偏差,提高评估的一致性与可重复性,推动多模态MRI技术向智能化、标准化方向发展。

1.1.3 研究目的与临床价值

本研究围绕多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的应用展开系统、全面的研究与综述,其核心研究目的主要包括以下几个方面:一是明确多模态MRI各类技术(常规解剖成像、DCE-MRI、DWI、MRS等)的原理、成像方法与临床应用规范,为多模态MRI的规范化检查提供依据;二是深入分析多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的具体应用价值,包括早期疗效预测、病理完全缓解预判、治疗过程动态监测、个体化治疗指导及预后评估等,明确多模态MRI相较于传统评估手段的核心优势;三是探讨当前多模态MRI在临床应用中存在的技术局限性与临床应用障碍,并提出针对性的优化策略,为多模态MRI的临床推广与技术改进提供参考;四是总结多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的研究进展与临床证据,展望未来的研究方向,推动多模态MRI技术与精准医疗、多学科协作(Multidisciplinary Team, MDT)模式的深度融合,为乳腺癌的精准诊疗提供更科学、更可靠的支撑。

多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的临床价值主要体现在以下几个方面,这些价值不仅能够改善乳腺癌患者的诊疗效果,还能推动乳腺癌诊疗模式的转型升级,具有重要的临床意义与社会价值。

第一,早期预测化疗疗效,及时识别耐药患者。传统疗效评估方法通常需要在化疗2-4周期后,才能通过肿瘤体积的变化判断疗效,存在明显的滞后性,而多模态MRI可在化疗1-2周期后,通过检测肿瘤的ADC值变化、血流灌注参数变化、代谢物浓度变化等,早期捕捉肿瘤细胞的凋亡、坏死及微环境改变,及时判断肿瘤对化疗药物的敏感性。对于化疗敏感的患者,可继续采用原方案治疗,确保治疗效果;对于化疗不敏感或耐药的患者,可及时调整治疗方案(如更换化疗药物、联合靶向治疗或免疫治疗),避免无效化疗带来的不良反应与医疗资源浪费,为患者争取最佳的治疗时机。

第二,精准预判病理完全缓解(pCR),指导后续治疗方案制定。病理完全缓解是新辅助化疗最重要的疗效终点,指化疗后乳腺原发肿瘤及区域淋巴结中无残存的活性肿瘤细胞,pCR患者的无病生存期与总生存期显著长于非pCR患者,是评估患者长期预后的重要指标。多模态MRI可通过整合多种序列的参数(如ADC值阈值、TIC曲线类型、胆碱峰变化等),构建pCR预测模型,显著提高pCR预判的准确率,为临床制定后续手术方案与辅助治疗方案提供关键参考。例如,对于预判为pCR的患者,可考虑采用保乳手术,减少乳房切除带来的身心创伤;对于预判为非pCR的患者,可在术后加强辅助治疗,降低复发风险^[9-10]。

第三,动态监测治疗过程,优化治疗策略与手术时机。新辅助化疗是一个动态的治疗过程,肿瘤的大小、形态、功能及代谢状态会随着化疗周期的推进不断变化,多模态MRI可通过连续多次检查,动态监测肿瘤的退缩模式(如向心性退缩、弥漫性退缩、局部残留等)、细胞活性变化及微环境改变,实时评估治疗效果。根据动态监测结果,可及时调整化疗周期、化疗药物剂量或治疗方案,同时判断最佳的手术时机,确保手术的彻底性,减少术后复发与转移的风险。例如,对于化疗后肿瘤快速退缩的患者,可适当缩短化疗周期,尽早进行手术;对于肿瘤退缩缓慢但仍有治疗反应的患者,可延长化疗周期,争取达到更好的治疗效果。

第四,实现疗效分层,指导个体化精准治疗。乳腺癌的高度异质性决定了其治疗需要个体化,多模态MRI可通过对肿瘤的形态学、功能学、代谢学特征进行综合评估,将患者分为高反应组、中反应组与低反应/耐药组,为个体化治疗方案的制定提供依据。对于高反应组患者,可采用

常规化疗方案,以最小的不良反应达到最佳的治疗效果;对于中反应组患者,可适当调整化疗药物剂量或联合其他治疗手段,进一步提高治疗效果;对于低反应/耐药组患者,可及时更换治疗方案,避免无效治疗,同时减少不良反应的发生,提高患者的治疗依从性与生活质量。

第五,评估患者预后,为长期随访提供参考。多模态MRI的相关参数(如ADC值变化率、肿瘤消退率、血流灌注参数变化等)与患者的长期预后(如无病生存期、总生存期、复发率等)具有显著的相关性,可作为独立的预后影响因素,用于患者的长期预后评估。通过多模态MRI评估,可识别出高复发风险患者,为这类患者制定更严密的长期随访计划,及时发现复发与转移迹象,尽早进行干预治疗,改善患者的长期生存质量;同时,也可识别出低复发风险患者,避免过度治疗,减轻患者的经济负担与心理压力。

第六,推动多学科协作(MDT)模式的完善与发展。多模态MRI提供的多维度肿瘤信息,不仅为影像科医生提供了精准的评估依据,还能为乳腺外科、肿瘤内科、病理科等相关科室医生提供重要的参考信息,促进多学科之间的沟通与协作。例如,影像科医生通过多模态MRI评估肿瘤的大小、浸润范围、淋巴结转移情况及治疗反应,为外科医生制定手术方案提供依据;为肿瘤内科医生调整化疗方案提供参考;为病理科医生判断肿瘤的病理缓解程度提供辅助支持。多模态MRI的应用,能够推动MDT模式的规范化开展,实现乳腺癌的全程精准管理,进一步提高乳腺癌的整体诊疗水平。

综上所述,多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中具有不可替代的临床价值,能够有效解决传统评估方法的局限性,为乳腺癌的精准诊疗提供科学、可靠的依据。开展本研究,不仅能够丰富多模态MRI在乳腺癌诊疗中的应用研究,还能为临床建立标准化、规范化的新辅助化疗疗效评估体系提供参考,推动乳腺癌诊疗模式从经验化治疗向精准化、个体化治疗转变,最终改善乳腺癌患者的长期生存质量,具有重要的临床意义、科研价值与社会价值。

2 多模态MRI技术原理与成像方法

2.1 常规MRI技术基础

常规MRI技术是多模态MRI评估体系的基础,主要包括T1加权成像(T1WI)与T2加权成像(T2WI)两种核心

解剖成像序列,其核心作用是清晰显示乳腺的正常解剖结构与病变的形态学特征,为后续的功能序列成像、疗效评估提供精准的定位基础与形态学参照。常规MRI技术的成像原理基于磁共振成像的基本原理,即利用人体组织中氢原子核(质子)在强磁场中的共振现象,通过射频脉冲激发质子,使其从低能级跃迁到高能级,随后质子在弛豫过程中释放能量,被接收线圈捕获并转化为电信号,经计算机处理后形成断层图像。

人体不同组织的质子密度、T1弛豫时间(纵向弛豫时间)与T2弛豫时间(横向弛豫时间)存在显著差异,这种差异是MRI图像对比度的主要来源。T1WI主要反映组织的T1弛豫时间差异,T2WI主要反映组织的T2弛豫时间差异,通过调整成像参数(如重复时间TR、回波时间TE),可获得不同对比度的T1WI与T2WI图像,清晰区分不同的组织类型。在乳腺MRI检查中,常规T1WI、T2WI序列的成像参数需根据设备场强、患者乳腺腺体类型等因素进行个体化调整,以获得最佳的图像质量。

2.1.1 解剖成像(T1WI、T2WI)

乳腺的解剖结构复杂,主要由皮肤、皮下脂肪组织、乳腺腺体组织(包括腺泡、导管)、结缔组织、胸大肌、胸小肌及腋窝淋巴结等组成,不同组织在T1WI与T2WI图像上具有不同的信号特征,这是常规解剖成像识别乳腺结构与病变的基础。

在T1WI图像上,乳腺不同组织的信号强度表现如下:皮下脂肪组织由于质子密度高、T1弛豫时间短,表现为高信号,呈均匀的亮白色,边界清晰,能够清晰区分皮肤与乳腺腺体;乳腺腺体组织的信号强度中等,呈灰黑色,其信号强度与腺体的致密程度密切相关,致密型乳腺的腺体信号均匀,稀疏型乳腺的腺体信号呈斑片状分布,夹杂着高信号的脂肪组织;结缔组织(如乳腺悬韧带)的信号强度较低,呈黑色,能够清晰显示乳腺的结构层次;胸大肌、胸小肌的信号强度较低,呈均匀的黑色,与乳腺腺体组织形成明显对比;腋窝淋巴结的信号强度中等,呈圆形或椭圆形,边界清晰,其皮质与髓质可通过信号差异初步区分(髓质信号稍高,皮质信号稍低)。

在T2WI图像上,乳腺不同组织的信号强度与T1WI存在明显差异:皮下脂肪组织仍表现为高信号,但信号强度略低于T1WI;乳腺腺体组织的信号强度高于T1WI,呈灰白色,致密型乳腺的腺体信号均匀,稀疏型乳腺的腺体信

号呈斑片状,与脂肪组织的界限清晰;结缔组织的信号强度较低,呈黑色,与T1WI表现相似;胸大肌、胸小肌的信号强度较低,呈黑色;腋窝淋巴结的信号强度高于T1WI,髓质信号明显增高,皮质信号相对较低,能够更清晰地区分淋巴结的皮质与髓质,有助于判断淋巴结是否存在肿大或转移。

常规T1WI、T2WI序列在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的核心作用的是乳腺组织结构显示与病变定位,具体体现在以下几个方面:

一是清晰显示乳腺正常解剖结构,明确肿瘤的位置与解剖关系。通过T1WI、T2WI图像,可清晰显示肿瘤位于乳腺的哪个象限、距离乳头的距离、与皮肤、胸大肌、胸小肌的关系,以及是否侵犯乳腺悬韧带、导管等结构,为肿瘤的临床分期提供重要依据。例如,若肿瘤侵犯胸大肌,提示肿瘤已处于T3期;若肿瘤侵犯皮肤,提示肿瘤可能为炎性乳腺癌或局部晚期乳腺癌。

二是准确显示肿瘤的形态学特征,为疗效评估提供基础参照。化疗前,通过T1WI、T2WI图像可清晰观察肿瘤的大小、形态、边界、内部结构等特征,例如,乳腺癌多表现为不规则形肿块,边界模糊,内部信号不均匀,可伴有囊变、坏死、出血等改变;化疗后,通过对比化疗前后的T1WI、T2WI图像,可观察肿瘤体积的变化、形态的改变、边界的清晰度变化等,这是传统疗效评估的核心指标之一。例如,化疗有效时,肿瘤体积缩小,形态变得相对规则,边界变得清晰,内部坏死区域增大;化疗无效时,肿瘤体积无缩小甚至增大,形态变得更不规则,边界更加模糊。

三是区分肿瘤组织与正常腺体、术后改变、纤维化及良性病变,避免误判。新辅助化疗后,乳腺组织可能出现纤维化、炎性反应、术后瘢痕等改变,这些改变在T1WI、T2WI图像上的信号特征与残存活性肿瘤组织存在一定差异,通过常规解剖成像可初步区分。例如,纤维化组织在T1WI、T2WI图像上均表现为低信号,边界清晰,无明显强化(后续动态增强序列可进一步验证);炎性反应组织在T2WI图像上表现为高信号,边界模糊,可伴有轻度水肿;残存活性肿瘤组织在T2WI图像上表现为中等偏高信号,边界模糊,内部信号不均匀。

四是辅助判断腋窝淋巴结转移情况。通过T1WI、T2WI图像,可观察腋窝淋巴结的大小、形态、信号特征等,判

断是否存在淋巴结转移。例如,转移淋巴结多表现为肿大(短径 $>10\text{mm}$)、形态不规则、边界模糊、皮质增厚、髓质消失,在T2WI图像上信号不均匀;正常淋巴结或反应性增生淋巴结表现为大小正常、形态规则、边界清晰、皮质薄、髓质完整,信号均匀。这对于肿瘤的临床分期与疗效评估具有重要意义,例如,化疗后转移淋巴结缩小、髓质恢复,提示化疗有效;若转移淋巴结增大、形态更不规则,提示化疗无效或疾病进展。

需要注意的是,常规T1WI、T2WI序列仅提供肿瘤的形态学信息,无法反映肿瘤的功能学与代谢学特征,在化疗早期(肿瘤体积未发生明显变化时)难以准确评估疗效,因此需要与其他功能序列(如DCE-MRI、DWI)相结合,才能实现对肿瘤疗效的全面、精准评估。此外,在成像过程中,需注意避免运动伪影(如呼吸运动、心脏搏动、患者体位移动)的影响,可通过采用呼吸门控技术、嘱患者保持体位不动等方式,提高图像质量,确保评估的准确性。

2.1.2 动态增强MRI (DCE-MRI)

动态增强MRI (DCE-MRI)是乳腺肿瘤功能成像中最常用、最成熟的技术之一,其核心原理是利用肿瘤组织与正常乳腺组织在血流灌注、血管通透性等方面的差异,通过静脉注射钆类对比剂,连续多期采集乳腺图像,分析对比剂在肿瘤组织与正常组织中的摄取、分布与排泄过程,从而评估肿瘤的血管生成状态与血流动力学特征,为肿瘤的良好恶性鉴别、疗效评估提供重要依据。

钆类对比剂是一种顺磁性物质,其核心成分是钆离子,能够缩短周围氢质子的T1弛豫时间,使注射对比剂后的组织在T1WI图像上信号强度显著增高。正常乳腺组织的血管密度低、血管通透性低,对比剂的摄取量少、排泄快,因此在动态增强图像上表现为轻度、均匀强化;而乳腺癌组织由于肿瘤细胞增殖活跃,需要大量的营养供应,会诱导新生血管生成,这些新生血管具有血管壁薄、通透性高、结构紊乱等特点,能够大量摄取对比剂,且对比剂排泄缓慢,因此在动态增强图像上表现为明显、不均匀强化,与正常乳腺组织形成显著对比。

DCE-MRI的成像流程主要包括以下几个步骤:首先采集乳腺的平扫T1WI图像(基线图像),用于对比增强后的信号变化;然后通过静脉高压注射钆类对比剂(注射速度通常为 $2\sim3\text{ml/s}$,注射剂量为 $0.1\sim0.2\text{mmol/kg}$ 体重),注射完成后立即开始连续多期采集增强图像,采集时间通

常为5-10分钟,分为动脉期(注射后1-2分钟)、静脉期(注射后3-5分钟)、延迟期(注射后5-10分钟),部分病例可根据需要延长采集时间;最后对采集到的动态增强图像进行后处理,获得时间-信号强度曲线(TIC)及相关定量参数,用于后续的分析与评估。

时间-信号强度曲线(TIC)是DCE-MRI疗效评估的核心指标之一,其反映了肿瘤组织在注射对比剂后不同时间点的信号强度变化规律,通过分析TIC的形态的类型,可初步判断肿瘤的良好性与治疗反应。根据TIC的形态,通常将其分为三种类型:

I型(流入型):曲线呈持续上升趋势,动脉期信号强度快速升高,静脉期与延迟期信号强度持续上升,无下降趋势。这种类型主要见于良性病变(如乳腺纤维腺瘤、炎性病变),少数分化较好的乳腺癌也可能表现为I型曲线,但强化程度通常较低。

II型(平台型):曲线在动脉期快速升高,达到峰值后,静脉期与延迟期信号强度基本保持稳定,无明显上升或下降趋势(波动范围在 $\pm 10\%$ 以内)。这种类型可见于部分良性病变与乳腺癌,是乳腺癌中较常见的曲线类型之一,尤其是Luminal型乳腺癌。

III型(流出型):曲线在动脉期快速升高,达到峰值后,静脉期与延迟期信号强度快速下降,下降幅度超过10%。这种类型主要见于恶性程度较高的乳腺癌(如HER-2阳性型、三阴性型乳腺癌),其原因是肿瘤新生血管通透性高,对比剂快速进入肿瘤组织后,又快速通过血管壁渗出到肿瘤周围组织,导致信号强度快速下降。

在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中,TIC曲线类型的变化是重要的疗效评估指标。化疗有效时,肿瘤新生血管受到抑制,血管密度降低、通透性下降,对比剂的摄取量减少、排泄速度加快,TIC曲线类型会发生特征性改变:例如,化疗前为III型(流出型)曲线的患者,化疗后可能转变为II型(平台型)或I型(流入型)曲线;化疗前为II型曲线的患者,化疗后可能转变为I型曲线,同时曲线的峰值强度会显著降低。反之,若化疗后TIC曲线类型无变化,或从I型、II型转变为III型,且峰值强度无降低甚至升高,提示化疗无效或疾病进展。

除了TIC曲线这种半定量指标外,DCE-MRI还可通过后处理软件获得一系列定量参数,这些参数能够更客观、更精准地反映肿瘤的血流动力学特征,为疗效评估提供更

可靠的依据。常用的定量参数主要包括以下几个:

一是容量转移常数(Volume Transfer Constant, K_{trans}):反映对比剂从血管内进入血管外细胞外间隙(EES)的速率,与肿瘤的血管密度、血管通透性呈正相关,肿瘤新生血管越丰富、通透性越高, K_{trans} 值越大。化疗有效时,肿瘤新生血管受到抑制, K_{trans} 值会显著下降;化疗无效时, K_{trans} 值无明显下降甚至升高。

二是速率常数(Rate Constant, K_{ep}):反映对比剂从血管外细胞外间隙(EES)返回血管内的速率,与血管通透性、组织间隙压力等因素相关,其变化趋势与 K_{trans} 值基本一致,化疗有效时 K_{ep} 值会显著下降。

三是血管外细胞外间隙容积比(Volume of Extravascular Extracellular Space, V_e):反映血管外细胞外间隙占肿瘤组织总体积的比例,与肿瘤的细胞密度、间质成分等相关,肿瘤细胞密度越高, V_e 值越小。化疗有效时,肿瘤细胞凋亡、坏死,细胞密度降低,间质成分增加, V_e 值会显著升高。

四是增强峰值时间(Time to Peak, TTP):反映对比剂在肿瘤组织中达到最大信号强度所需的时间,与肿瘤的血流灌注速度呈负相关,血流灌注速度越快,TTP越短。化疗有效时,肿瘤血流灌注降低,TTP会显著延长。

五是最大强化率(Maximum Enhancement Ratio, MER):反映肿瘤组织注射对比剂后的最大信号强度与基线信号强度的比值,与肿瘤的血管密度、对比剂摄取量呈正相关,化疗有效时,MER会显著降低。

这些定量参数的变化能够更早期、更精准地反映肿瘤的治疗反应,例如,在化疗1-2周期后,肿瘤体积尚未发生明显变化,但 K_{trans} 、 K_{ep} 值已出现显著下降, V_e 值出现显著升高,提示化疗有效;若这些参数无明显变化甚至出现异常变化,提示化疗可能无效,需要及时调整治疗方案。此外,定量参数还具有可重复性强、客观性高的优势,能够减少人工主观偏差,为多中心研究与标准化评估提供可能。

需要注意的是,DCE-MRI的成像质量与评估准确性受多种因素影响,例如,对比剂的注射速度、剂量、扫描序列、成像参数、患者的呼吸运动等,因此在成像过程中需要严格控制这些因素,确保图像质量。同时,DCE-MRI需要注射对比剂,对于有对比剂过敏史、肾功能不全的患者,应避免使用,或在医生指导下谨慎使用,并做好过敏反应的预防与处理准备。

2.2 功能与代谢成像技术

功能与代谢成像技术是多模态MRI评估体系的核心组成部分，其与常规解剖成像、动态增强成像相结合，能够从微观层面反映肿瘤的生物行为与治疗反应，弥补了传统形态学评估的局限性。乳腺乳腺癌新辅助化疗疗效评估中常用的功能与代谢成像技术主要包括扩散加权成像（DWI）、磁共振波谱成像（MRS），此外，体素内不相干运动成像（IVIM）、血氧水平依赖成像（BOLD）等新兴技术也逐步应用于临床研究，为疗效评估提供了更多的维度与思路。

2.2.1 扩散加权成像（DWI）

扩散加权成像（DWI）是基于水分子布朗运动原理的无创功能成像技术，其核心原理是利用人体组织中水分子的随机热运动（布朗运动），通过施加扩散敏感梯度场，使水分子的扩散运动受到不同程度的抑制，从而在MRI图像上形成信号差异，反映组织的微观结构与细胞密度变化。DWI无需注射对比剂，具有无创、无辐射、可重复、检查时间短等优势，是乳腺癌新辅助化疗早期疗效预测的重要技术。

水分子的扩散运动受到组织微观结构的影响，在致密的组织中，水分子的扩散运动受到限制；在疏松的组织中，水分子的扩散运动相对自由。乳腺癌组织中，肿瘤细胞增殖活跃，细胞密度高、排列紧密，细胞外间隙狭窄，水分子的扩散运动受到显著抑制；而正常乳腺组织中，细胞密度低、排列疏松，水分子的扩散运动相对自由，因此在DWI图像上，乳腺癌组织表现为高信号，正常乳腺组织表现为低信号，两者形成明显对比。

DWI的核心定量指标是表观扩散系数（Apparent Diffusion Coefficient, ADC），其计算公式为： $ADC = \ln(S_0/S_b) / (b \times \gamma \times G \times \delta \times (\Delta - \delta/3))$ ，其中 S_0 为无扩散敏感梯度场时的信号强度， S_b 为施加扩散敏感梯度场后的信号强度， b 值为扩散敏感因子（单位： s/mm^2 ）， γ 为旋磁比， G 为梯度场强度， δ 为梯度场持续时间， Δ 为两个梯度场之间的间隔时间。ADC值的大小直接反映了水分子扩散运动的自由程度，ADC值越高，表明水分子扩散越自由，组织细胞密度越低；ADC值越低，表明水分子扩散越受限，组织细胞密度越高。

在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中，ADC值的变化是最核心、最常用的指标，其变化规律与肿瘤细胞的凋亡、坏

死密切相关。化疗药物的核心作用是抑制肿瘤细胞的增殖、诱导肿瘤细胞凋亡与坏死，当化疗有效时，肿瘤细胞发生凋亡、坏死，细胞密度降低，细胞外间隙扩大，水分子的扩散运动受限程度缓解，ADC值会出现特征性升高；反之，当化疗无效时，肿瘤细胞继续增殖，细胞密度无明显降低，甚至升高，水分子扩散运动受限程度无缓解，ADC值无明显变化，甚至出现下降。

大量临床研究证实，ADC值的变化能够早期反映乳腺癌新辅助化疗的疗效，其变化时间早于肿瘤体积的变化。例如，有研究表明，在化疗1周期后，肿瘤体积尚未发生明显变化，但ADC值已出现显著升高，且ADC值的升高幅度与化疗疗效呈正相关，ADC值升高幅度越大，化疗疗效越好；化疗2-4周期后，ADC值持续升高，同时肿瘤体积开始缩小。此外，ADC值还可用于预判病理完全缓解（pCR），研究发现，化疗后ADC值升高超过30%的患者，pCR率显著高于ADC值升高不足30%的患者，ADC值可作为pCR预判的重要定量指标。

在DWI成像过程中， b 值的选择是影响图像质量与ADC值准确性的关键因素。 b 值越高，扩散敏感梯度场越强，水分子扩散运动的差异越明显，图像的对比度越高，但信号噪声比（SNR）越低，图像越模糊； b 值越低，信号噪声比越高，图像越清晰，但扩散敏感梯度场越弱，水分子扩散运动的差异越不明显，难以准确区分肿瘤组织与正常组织。在乳腺DWI检查中，常用的 b 值范围为0-1000 s/mm^2 ，其中 $b=0 s/mm^2$ 用于获取基础信号， $b=800-1000 s/mm^2$ 用于获取扩散加权图像，同时计算ADC值。此外，还可采用多 b 值DWI成像，通过多个不同 b 值的图像，更精准地分析水分子的扩散特征，提高疗效评估的准确性。

需要注意的是，DWI的成像质量受多种因素影响，例如，患者的呼吸运动、体位移动、磁场不均匀性、脂肪抑制效果等，这些因素可能导致图像出现伪影，影响ADC值的测量准确性。因此，在成像过程中，需采用呼吸门控技术、嘱患者保持体位不动，同时优化脂肪抑制序列，减少伪影的影响。此外，ADC值的测量需在肿瘤的实性部分进行，避开囊变、坏死、出血区域，因为这些区域的水分子扩散运动不受肿瘤细胞密度的影响，测量结果会出现偏差；同时，需测量多个感兴趣区（ROI），取平均值作为最终的ADC值，提高测量的可靠性。

除了常规DWI技术外，扩散张量成像（DTI）是DWI

技术的延伸,其通过施加多个不同方向的扩散敏感梯度场,不仅能够测量ADC值,还能获得各向异性分数(Fractional Anisotropy, FA)、平均扩散率(Mean Diffusivity, MD)等参数,反映组织的微观结构完整性与纤维束走向。在乳腺癌研究中,DTI可用于评估肿瘤的浸润程度与侵犯范围,例如,肿瘤浸润区域的FA值显著低于正常乳腺组织,MD值显著高于正常乳腺组织,化疗有效时,肿瘤浸润程度减轻,FA值会升高,MD值会降低,为疗效评估提供更丰富的参考信息。

2.2.2 磁共振波谱成像(MRS)

磁共振波谱成像是目前唯一可无创检测活体组织代谢物变化的MRI技术,能够在体定量分析肿瘤内部代谢产物浓度,反映肿瘤代谢活性与恶性程度。乳腺癌组织中胆碱含量显著升高,MRS可清晰检测到胆碱峰,其峰值高低与肿瘤细胞增殖活性、恶性程度呈正相关。

新辅助化疗有效时,肿瘤细胞增殖受抑制,代谢活性降低,胆碱峰可出现下降甚至消失,因此MRS可从代谢层面评估化疗疗效,尤其适用于评估肿瘤残存活性与判断病理缓解程度。

2.2.3 其他新兴技术

除上述成熟技术外,体素内不相干运动成像(IVIM)、扩散张量成像(DTI)、血氧水平依赖成像(BOLD)等新兴功能MRI序列逐步应用于乳腺癌研究。IVIM可分离水分子扩散与微循环灌注成分,更精准反映肿瘤微环境;BOLD-MRI可评估肿瘤氧合状态,肿瘤缺氧程度与化疗敏感性密切相关,缺氧越明显,治疗耐药风险越高。

这些新兴技术进一步丰富了多模态MRI评估体系,从灌注、缺氧、微结构等更多维度揭示肿瘤生物学特征与治疗反应规律。

2.3 多模态数据融合策略

多模态数据融合是将不同序列、不同参数的MRI信息进行整合分析,实现优势互补,提高评估准确性与稳定性。其核心步骤包括图像配准、感兴趣区勾画、多维度特征提取及定量模型构建。

随着人工智能与影像组学发展,基于机器学习、深度学习的多模态融合模型可自动提取肿瘤形态、纹理、血流、扩散、代谢等海量特征,构建疗效预测与预后评估模型,减少人工主观偏差,提高预测的灵敏度与特异度。多模态融合策略有助于突破单一参数的局限性,推动乳腺癌新辅助化疗评估从“视觉判断”向“定量精准评估”转变。

3 多模态MRI在乳腺癌新辅助化疗疗效评估中的临床应用

3.1 疗效评估标准与影像学特征

3.1.1 RECIST标准与影像学对应表现

临床常用实体瘤疗效评价标准(RECIST)以肿瘤最大径变化作为疗效判断依据,分为完全缓解、部分缓解、疾病稳定、疾病进展。在多模态MRI中,除肿瘤径线缩小外,还可观察到强化程度降低、强化范围缩小、边缘变清晰、内部坏死区域增大等形态学改变。

然而,RECIST标准难以反映肿瘤细胞水平的消退,对于细胞密度下降但体积无明显变化的病例易出现误判,多模态MRI可结合功能参数弥补这一缺陷。

3.1.2 病理完全缓解(pCR)的影像学预测指标

病理完全缓解是新辅助化疗最重要的疗效终点,与患者无病生存率及总生存率密切相关。多模态MRI可提供多项预测指标:DWI中ADC值升高幅度及早期阈值对pCR具有较高预测价值;DCE-MRI中强化信号显著降低、时间-信号强度曲线由流出型转为流入型或平台型提示治疗反应良好;MRS中胆碱峰消失提示肿瘤代谢活性基本抑制。

联合多项多模态参数构建预测模型,可显著提高pCR预判准确率,为临床制定后续手术及辅助治疗方案提供关键参考。

3.2 早期疗效预测与动态监测

3.2.1 化疗前基线多模态MRI特征

化疗前基线多模态MRI特征可用于预判肿瘤治疗敏感性:肿瘤ADC基线值偏低、强化程度高、胆碱代谢旺盛、肿瘤异质性高者,通常细胞增殖活跃,对化疗更为敏感;而ADC值较高、内部明显囊变坏死、缺氧程度重者,易出现原发性耐药。

通过基线特征可早期区分治疗敏感人群与耐药人群,实现治疗前风险分层。

3.2.2 化疗中/后的动态变化规律

多模态MRI可在化疗1~2周期后早期监测肿瘤反应:有效病例ADC值可出现明显升高,早于肿瘤体积缩小;DCE-MRI灌注参数早期下降提示肿瘤血管正常化与血流灌注降低;MRS胆碱峰早期降低提示代谢快速抑制。

通过连续动态监测,可实时评估肿瘤退缩模式,区分向心性退缩、弥漫性退缩等不同类型,指导治疗周期与手

术时机选择。

3.3 个体化治疗指导与预后评估

3.3.1 基于多模态 MRI 的疗效分层

多模态 MRI 可将患者分为高反应组、中反应组与低反应/耐药组；对高反应者可继续原方案；对低反应/耐药者应尽早更换化疗方案或联合靶向、免疫治疗，避免无效治疗。

这种基于影像学的实时分层，是实现乳腺癌个体化精准治疗的重要手段。

3.3.2 长期生存率与影像学参数的相关性

达到病理完全缓解的患者通常预后更好，无病生存期与总生存期显著延长。多模态 MRI 参数如早期 ADC 变化率、最大强化率下降值、肿瘤消退率等，均与患者长期预后具有显著相关性，可作为独立预后影响因素，用于长期随访与复发风险评估。

4 多模态 MRI 临床应用的挑战与优化策略

4.1 技术局限性

4.1.1 图像质量影响因素

乳腺 MRI 易受呼吸运动、心脏搏动、患者体位移动等影响产生伪影；脂肪抑制不均可导致背景信号干扰，影响病变显示与参数测量准确性；设备场强、线圈通道数差异也会直接影响图像信噪比与分辨率。

4.1.2 参数标准化与可重复性

不同设备厂商、扫描序列、场强及后处理软件，可导致 ADC 值等定量参数存在差异，缺乏统一的扫描规范与参考阈值，限制了多中心研究与广泛推广。参数可重复性不足是当前多模态 MRI 临床转化的主要技术瓶颈。

4.2 临床应用障碍

4.2.1 扫描时间与成本问题

多模态 MRI 序列繁多，单次检查时间较长，部分患者难以耐受，尤其对于年老体弱、焦虑或幽闭恐惧患者依从性较差；同时检查成本较高，在基层医院普及难度较大。

4.2.2 放射科医生解读经验依赖

传统影像评估高度依赖医师主观经验，对肿瘤强化模式、曲线类型、ADC 值变化判断存在一定差异，客观化、标准化、智能化解读程度仍有待提高。

4.3 优化方向

4.3.1 技术改进

未来发展方向包括快速成像序列研发，缩短扫描时间、提高患者耐受性；推进 AI 辅助诊断系统，实现自动

分割、自动测量、自动疗效评估，降低主观误差；开发高特异性、低毒性新型对比剂，进一步提高肿瘤检出与评估能力。

4.3.2 临床路径整合

建立多学科协作模式，将影像科、乳腺外科、肿瘤内科、病理科整合，制定统一的新辅助化疗评估流程与报告模板；推动多中心、大样本临床研究，形成标准化多模态 MRI 评估指南与专家共识，促进技术规范应用。

5 结论与展望

5.1 研究总结

多模态 MRI 整合解剖、功能、代谢等多维度信息，能够无创、早期、精准、定量评估乳腺癌新辅助化疗疗效，在预测病理完全缓解、动态监测肿瘤退缩、指导个体化治疗及评估预后方面具有不可替代的优势，显著优于传统临床及影像学评估方法。

多模态 MRI 将形态学观察与定量功能分析相结合，能够反映肿瘤在细胞、微环境及代谢层面的治疗反应，为乳腺癌精准治疗提供重要支撑，已成为现代乳腺癌诊疗体系中不可或缺的关键技术。

5.2 未来研究方向

未来研究将聚焦于：开展多中心、大样本、前瞻性临床研究，验证多模态参数的稳定性与可靠性；进一步推动多模态 MRI 与影像组学、基因组学、液体活检等技术融合，构建多组学整合预测模型；探索新型功能序列与智能成像技术，提高早期疗效评估与耐药预测能力；建立标准化、可推广的临床应用路径，推动技术下沉与广泛普及。

5.3 对临床实践的启示

多模态 MRI 的深入应用，将进一步推动乳腺癌从经验化治疗向精准化、个体化治疗转变，有助于优化新辅助化疗方案、提高病理完全缓解率、改善患者长期生存，对完善乳腺癌全程管理、提升整体诊疗水平具有重要意义，未来有望成为乳腺癌新辅助化疗疗效评估的首选无创影像学方法。

参考文献：

[1] 中国临床肿瘤学会指南工作委员会.中国临床肿瘤学会 (CSCO) 乳腺癌诊疗指南 (2024 版) [M].北京: 人民卫生出版社, 2024.

[2] 中华医学会放射学分会乳腺学组.乳腺磁共振成像临床应用专家共识 (2021 版) [J].中华放射学杂志, 2021, 55 (10):

1044-1052.

[3] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries [J]. CA Cancer J Clin, 2021, 71 (3) :209-249.

[4] 王殊, 谢小明. 乳腺癌新辅助治疗的现状与进展 [J]. 中国肿瘤临床, 2022, 49 (15) : 765-770.

[5] 周纯武, 李二妮. 多模态磁共振成像在乳腺癌诊疗中的应用进展 [J]. 放射学实践, 2023, 38 (2) : 123-127.

[6] Tubiana-Hulin M, Barrois M, Colin C, et al. Early changes in apparent diffusion coefficient predict response to neoadjuvant chemotherapy in breast cancer [J]. J Magn Reson

Imaging, 2020, 52 (3) :789-797.

[7] 刘佩芳. 乳腺功能磁共振成像的临床价值与研究热点 [J]. 国际医学放射学杂志, 2022, 45 (1) : 1-5.

[8] Kim HJ, Choi WJ, Kim EK, et al. Multiparametric MRI for prediction of pathological complete response to neoadjuvant chemotherapy in breast cancer: A systematic review and meta-analysis [J]. Eur Radiol, 2021, 31 (8) :5899-5912.

[9] 张瑾, 欧阳涛. 乳腺癌新辅助化疗后手术治疗策略 [J]. 中华外科杂志, 2023, 61 (2) : 81-85.

[10] 王宵芳, 宦怡. 人工智能在乳腺多模态 MRI 中的应用 [J]. 实用放射学杂志, 2022, 38 (7) : 1190-1193.