

多参数 MRI 在诊断 HER-2 阳性乳腺癌中的研究进展

王小芳¹, 钱丽霞^{2*}, 邢君³

1.山西医科大学医学影像学院, 山西 太原 030001; 2.山西白求恩医院 山西医学科学院放射科, 山西 太原 030032; 3.山西白求恩医院 山西医学科学院乳腺外科, 山西 太原 030032; *通信作者 钱丽霞 qianlixia@126.com

【基金项目】山西省医学重点科研项目 (2022XM01)

【摘要】人表皮生长因子受体 2 (HER-2) 阳性乳腺癌是乳腺癌的一种特殊亚型, 其生长速度较快, 侵袭性和复发率较高。MRI 是诊断和评估该类型乳腺癌的关键方法, 常规 MRI 检查可以观察肿瘤的形态特征及与周围组织的关系; 动态对比增强 MRI 可以反映乳腺病变的动力学特征、血管供应和渗透性; 近年来, 影像组学和深度学习等人工智能技术在医学影像领域中的广泛应用, 为 HER-2 阳性乳腺癌精准、高效的影像学评估做出重大贡献。本文对多参数 MRI 在 HER-2 阳性乳腺癌的应用进展进行综述。

【关键词】乳腺肿瘤; 磁共振成像; 受体, ErbB-2; 人工智能; 综述

【中图分类号】R445.2; R737.9; TP181 【DOI】10.3969/j.issn.1005-5185.2025.07.019

Advances in Multiparametric MRI Diagnosis of HER-2 Positive Breast Cancer

WANG Xiaofang¹, QIAN Lixia^{2*}, XING Jun³

Department of Radiology, Shanxi Bethune Hospital, Shanxi Academy of Medical Sciences, Taiyuan 030032, China; *Address Correspondence to: QIAN Lixia; E-mail: lixiaq@126.com

【Abstract】Human epidermal growth factor receptor 2 (HER-2) positive breast cancer is a special subtype of breast cancer, which grows faster and is characterized by higher invasiveness and recurrence rate. MRI is a key method for diagnosing and evaluating this type of breast cancer. Conventional MRI examination can observe the morphologic features of the tumor and its relationship with the surrounding tissues. DCE-MRI can reflect the kinetic features, vascular supply and permeability of the breast lesion. In recent years, the wide application of artificial intelligence technologies such as imaging histology and deep learning in the field of medical imaging has made a significant contribution to the accurate and efficient imaging assessment of HER-2 positive breast cancer. This article reviews the progress of multimodal multiparametric MRI in HER-2 positive breast cancer.

【Key words】Breast neoplasms; Magnetic resonance imaging; Receptor, ErbB-2; Artificial intelligence; Review

Chinese Journal of Medical Imaging, 2025, 33 (7): 791-795

乳腺癌居中国女性癌症死亡率第 2 位, 发病率逐年上升, 与风险因素增加和生活方式西方化有关^[1]。乳腺癌具有高度异质性, 根据基因表达模式分为 4 种分子亚型: 管腔 A 型 (Luminal A 型)、管腔 B 型 (Luminal B 型)、人表皮生长因子受体 2 (human epidermal growth factor receptor 2, HER-2) 过表达型及基底细胞样型 (包含三阴性乳腺癌)^[2]。雌激素受体或孕激素受体阳性为管腔型, 其中 Luminal B 型分为 2 个亚组: 雌激素受体或孕激素受体阳性, HER-2 阴性; 雌激素受体与 HER-2 均为阳性。激素受体阴性、HER-2 阳性为 HER-2 过表达型; 激素受体和 HER-2 均阴性为三阴性乳腺癌^[3]。HER-2 是一种跨膜酪氨酸激酶受体, 与乳腺癌中的过度表达、增殖、侵袭和转移有关, 临床侵袭性更强, 预后更差^[4]。临床上常使用超声、乳腺 X 线摄影和 MRI 等检查判断病情, 制订

个性化治疗方案, 改善患者的生存状况^[5-8]。MRI 是乳腺癌检查中最准确的影像学方法, 具有多参数、多序列以及多种功能成像的优势, 可以更清晰地显示病变情况。目前 MRI 在 HER-2 阳性乳腺癌诊断和鉴别诊断方面具有重要价值, 本文主要综述多参数 MRI 在 HER-2 阳性乳腺癌中的应用进展。

1 动态对比增强 MRI (DCE-MRI) 参数在 HER-2 阳性乳腺癌中的应用

1.1 形态学特征 DCE-MRI 形态学特征主要提供详细的乳腺组织结构图像, 包括大小、形态和强化方式等特征, 有助于及早发现乳腺癌, 及时采取治疗措施, 提高患者的治愈率。

1.1.1 肿块大小 Kim 等^[9]研究发现, 与 HER-2 阴性者相比, 富含 HER-2 亚型的乳腺癌患者肿瘤更大 (>2 cm)、组织学分级更高 (3 级)。Szep 等^[10]也得出 HER-2 过

表达亚型中肿瘤体积最大的结论。HER-2 阳性乳腺癌肿瘤体积较大可能是由于其生长速度快、侵袭性强和易复发等因素所致。因此,临床实践中及时发现和治疗 HER-2 阳性乳腺癌至关重要。但部分研究得出不同结论, Temerik 等^[3]及 Galati 等^[11]发现肿瘤大小与不同分子亚型乳腺癌间无显著相关性。这可能是由于 HER-2 阳性乳腺癌细胞通常具有较高的增殖能力,即使肿块较小,也可能具有广泛的生长和转移能力。需要进一步研究验证这些关系的存在,更全面地支持乳腺癌诊断和治疗。

1.1.2 肿块形态 肿瘤形态及边缘在肿瘤类型的诊断和治疗方面至关重要。部分研究报道不同分子亚型的肿瘤形态及边缘存在显著差异^[3,12-13]。陈义磊等^[14]纳入 74 例乳腺癌患者,其中 34 例为 HER-2 阳性,该组中病灶呈不规则或分叶形占 85.29%,边缘呈不规则或毛刺占 82.35%。苗环等^[15]的研究也得到类似结论,即肿瘤边缘毛刺征与 HER-2 阳性表达呈正相关。总之,HER-2 阳性乳腺癌在 MRI 检查中常呈不规则肿块,其边缘通常为毛刺状。

1.1.3 强化方式 乳腺癌的强化方式通常可以分为均匀强化、不均匀强化和环形强化 3 种类型,HER-2 阳性乳腺癌内部强化方式多为不均匀强化,这可能与乳腺癌的组织特征相关,HER-2 阳性乳腺癌存在异常的血管生成和微血管渗漏,导致血液供应不均,形成不均匀强化模式。Mumin 等^[16]发现 HER-2 阳性乳腺癌在 MRI 图像中通常呈不均匀强化特征,其他研究^[11,17]也进一步证实了这一结论,该发现对于乳腺癌诊断和治疗具有重要意义。综上所述,MRI 肿块形态学特征在预测肿瘤分子亚型方面具有很大潜力,但目前研究多为小样本回顾性研究,缺乏对结果的验证和复现,为更好地理解肿块形态特征与乳腺癌分子分型的关系,未来可以开展更大规模的前瞻性研究,结合临床和影像学数据,建立完整的数据库进行分析。

1.2 定量分析

1.2.1 时间-强度曲线(time-intensity curve, TIC) 乳腺 MRI 的定性检查局限于观察病变形态学特征,而肿瘤组织的 DCE 曲线反映了乳腺癌组织的不同生长模式和血流动力学特征,这种半定量的评估方法对个体化治疗具有重要意义^[18]。肿瘤病灶的血流 TIC 型分为 I 型(流入型)、II 型(平台型)和 III 型(流出型)。HER-2 阳性乳腺癌的增强曲线在形态上主要呈现为 III 型曲线。Mansour 等^[19]的研究表明造影剂摄取的中度初始峰值和流出曲线模式与 HER-2 富集亚型的诊断结果显著相关。Kazama 等^[20]的荟萃分析发现 HER-2

阳性乳腺癌中观察到的 III 型曲线比例明显高于 HER-2 阴性乳腺癌。程雪等^[21]发现 TIC 形态与 HER-2 表达相关,流入型与 HER-2 呈负相关,流出型与 HER-2 呈正相关,且与平台型无关。HER-2 阳性乳腺癌在 MRI 上的流出曲线比例高,可能是由于其血管生成增加导致早期造影剂快速摄取。目前,HER-2 阳性乳腺癌与 TIC 间的关系对临床诊治具有重要意义,但在实际操作中存在感兴趣区误差大的问题,需要更多研究进一步分析。

1.2.2 速率常数(K_{ep})、容量转移常数(K^{trans})与血管外细胞外间隙容积比(V_e) 定量动态增强 MRI 检查中,药代动力学模型可用于对造影剂在组织器官内的动力学过程建模和分析,结合该模型和 MRI 图像数据分析可计算出一系列定量增强参数,包括 K_{ep} 、 K^{trans} 与 V_e 等参数,能够提供关于药物在组织和器官中运转方式的详尽信息,反映肿瘤微血管通透性、灌注和血管生成等生物学特征^[22]。 K^{trans} 反映血管内物质向组织细胞外间隙的扩散速度, K_{ep} 反映物质从组织细胞外间隙返回血管内的速度, V_e 反映血管外细胞外间隙与血管内的容积比例^[23]。目前研究一致认为 HER-2 阳性乳腺癌的 K^{trans} 、 K_{ep} 均较 HER-2 阴性乳腺癌高,而 V_e 较 HER-2 阴性乳腺癌低,这与 HER-2 阳性乳腺癌较高的血管生成和侵袭性有关。Yang 等^[24]对 Luminal A 型、Luminal B 型、HER-2 阳性及三阴性乳腺癌进行研究,发现其 K_{ep} 分别为 0.76、0.86、0.92、0.90, K_{ep} 在 HER-2 富集的乳腺癌中最高,与既往研究^[22,25]结果一致,表明更具侵袭性的肿瘤 K_{ep} 更高。Wang 等^[25]也表明 HER-2 阳性乳腺癌患者 V_e 显著低于 HER-2 阴性乳腺癌患者。HER-2 阳性乳腺癌通常微血管生成和异常血管结构更多,导致血流速度快,血管密度高, V_e 降低。Du 等^[12]研究表明 HER-2 阳性肿瘤 K^{trans} 、 K_{ep} 显著高于 HER-2 阴性肿瘤,该研究使用 DISCO 技术和 3D 采集方法对乳腺 MRI 图像进行分析,在测量肿瘤体积和药代动力学参数方面的可重复性和准确性更高。MRI 检查结合药代动力学模型能提供药物在组织中的分布情况,帮助医师制订个性化治疗方案,但面临数据分析复杂、成本高昂、对专业人员的需求等挑战,未来需展开进一步研究。

2 扩散成像技术在 HER-2 阳性乳腺癌中的应用

扩散加权成像(DWI)利用水分子扩散提供关于组织微结构和细胞密度信息。表观扩散系数(ADC)是对水分子扩散的量化指标,乳腺癌组织通常具有高细胞密度和细胞核比例,导致 DWI 图像高信号和 ADC 较低。多项研究表明,定量 ADC 评估在区分肿

瘤亚型方面有一定参考价值, HER-2 阳性乳腺癌的 ADC 明显高于 HER-2 阴性乳腺癌^[12,26],可能因为:①HER-2 阳性乳腺癌的肿瘤细胞具有高代谢活性和高细胞密度导致扩散受限,血管生成增加导致血管通透性提高,扩散增加,ADC 增高;②在 HER-2 阳性肿瘤中,血管生成在 HER-2 阳性肿瘤中可能比细胞密度因素更具主导性,导致平均 ADC 增高^[27]。还有一些因素也可能影响 HER-2 阳性乳腺癌患者的 ADC,如肿瘤分化程度、异质性、病灶大小和位置、患者年龄和性别等。尽管潜在因素可能影响 ADC,但缺乏实验证据支持,需要进一步研究验证这些因素对患者 ADC 的确切影响。

DWI 检测到的水分子在组织中的扩散受多种因素影响,包括细胞密度、组织结构、微灌注和扩散异质性,导致准确性有所下降。为克服这一问题, Si 等^[28]提出体素内不相干运动 (intra-voxel incoherent motion, IVIM) 模型,通过区分微血管系统和周围组织解决高斯和非高斯扩散率之间的冲突。IVIM 利用双指数模型模拟信号的衰减,得到水在组织中的扩散系数 (D 或 Dt)、灌注的伪扩散系数 (D*、Dp 或 Df) 以及灌注分数 (f、fp 或 fIVIM) 等重要参数^[29]。Uslu 等^[30]和 Ma 等^[31]的研究均发现 HER-2 阳性肿瘤的 f 和 D* 值更高,表明其比 HER-2 阴性肿瘤的血管生成更多。Wang 等^[32]的研究表明 HER-2 阳性乳腺癌 D 值高于非 HER-2 阳性乳腺癌;非管腔乳腺癌,包括 HER-2 阳性和三阴性乳腺癌,其 D* 值高于 Luminal A/B 型。综上所述,HER-2 阳性乳腺癌 D、D*、f 通常较高,可能是 HER-2 表达的潜在标志物。但 IVIM 技术在高信噪比情况下易受干扰,且操作者需要接受专门培训,需要在实践中不断完善和优化。

扩散峰度成像 (diffusion kurtosis imaging, DKI) 基于活体组织中的非高斯现象,在乳腺病变鉴别和表征方面具有独特优势,能够提供组织微观结构更深入的信息^[33]。在 DKI 中,平均扩散率反映水分子在组织中的自由扩散程度,平均峰度表示非高斯扩散的程度,即水分子在组织中的受限扩散情况^[33]。HER-2 阳性乳腺癌患者的肿瘤组织中平均扩散率高于 HER-2 阴性乳腺癌患者,而平均峰度低于 HER-2 阴性乳腺癌患者,这种关系对于指导临床治疗和预后评估具有重要意义。Kang 等^[34]分析峰度与乳腺癌亚型的关联性,HER-2 阳性和三阴性亚型的峰度值比管腔亚型更低,两者峰度差异显著,可能是新生血管增加、血管通透性增加和细胞外液连续增加所致。Wang 等^[32]的研究表明 HER-2 阳性乳腺癌的平均扩散率显著高于

其他亚型,原因可能是 HER-2 高表达病变具有高细胞密度、丰富的组织血液灌注以及高侵袭和转移能力,这些因素可能导致肿瘤组织的水分子在不同方向上的扩散受到更多限制,从而使平均扩散率增加。总之,在 HER-2 阳性乳腺癌中,DKI 有助于了解肿瘤生长和浸润状况,对制订治疗方案具有重要参考价值。但 DKI 效果可能受异质性和微环境影响,需综合考虑多方面因素以确保准确性。

3 MRI 影像组学及人工智能在 HER-2 阳性乳腺癌中的应用

MRI 在识别和诊断病变方面具有高特异度和敏感度^[35],但仍然存在局限性。影像组学是一种非侵入性成像技术,能够将数字医学图像转换为定量的连续数据,评估时间和空间异质性^[36]。通过深度学习和机器学习等技术,人工智能可以快速、准确地识别和分析医学影像中的病变特征,帮助医师更精准地诊断和选择更优的治疗方案^[37]。Li 等^[38]基于乳腺 DCE-MRI 的功能参数图上瘤内和瘤周区域的影像组学特征可以识别 HER-2 和 Ki-67 状态,瘤内和瘤周区域的影像组学特征预测 HER-2 状态的曲线下面积 (AUC) 最大、分类准确度最高 (分别为 0.808、78.6%)。Huang 等^[39]使用 6 种分类算法构建模型预测分子亚型,结果显示多层感知器在 3 个分类任务 (三阴性与非三阴性、HER-2 阳性与 HER-2 阴性和激素受体阳性/HER-2 阴性与其他) 中表现最佳, AUC 分别为 0.965、0.840 和 0.860,准确度分别为 92.6%、79.0%和 82.1%。Sheng 等^[40]发现随机森林模型在分析 HER-2 过表达组和非 HER-2 过表达组时比其他 5 个模型的分​​类效率和区分能力更高, AUC (0.8054) 和特异度 (97.44%) 较高。Lupat 等^[41]提出一种多组学神经网络算法 (Moanna 算法) 用于预测乳腺癌亚型,该模型区分 HER-2 阳性和 HER-2 阴性的分类准确度、精确度分别为 95.9%、96.0%。总之,影像组学及人工智能在乳腺癌分子分型方面具有广阔的应用前景,通过结合影像学和病理学方法,可以实现对乳腺癌分子表型的全面评估,为患者的个性化治疗提供更多信息。

4 总结与展望

多参数 MRI 在 HER-2 阳性乳腺癌诊断中通过不断实践,为患者提供更加个体化和精准的诊疗方案。然而,目前这些新技术在临床中的应用还存在一些挑战和限制,如 MRI 扫描时间过长,保持长时间静止会让部分患者难以承受;人工智能需要建立一个包含大量标注数据的数据库训练人工智能算法,并不断优化

和改进,这仍需要进一步研究和探索。未来,随着影像组学及人工智能的不断发展和完善,多参数MRI将在HER-2阳性乳腺癌诊断和治疗中发挥越来越重要的作用,为乳腺癌的诊断提供新方向,为患者带来更好的治疗和管理策略。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Tao X, Li T, Gandomkar Z, et al. Incidence, mortality, survival, and disease burden of breast cancer in China compared to other developed countries[J]. *Asia Pac J Clin Oncol*, 2023, 19(6): 645-654. DOI: 10.1111/ajco.13958.
- [2] Mohanty SS, Sahoo CR, Padhy RN. Role of hormone receptors and HER2 as prospective molecular markers for breast cancer: an update[J]. *Genes Dis*, 2020, 9(3): 648-658. DOI: 10.1016/j.gendis.2020.12.005.
- [3] Temerik SM, Elwahab SMA, Wahman MM, et al. Relation between morphological features of initial breast MRI and breast cancer molecular subtypes[J]. *Egypt J Radiol Nucl Med*, 2023, 54(1): 147. DOI: 10.1186/s43055-023-01087-w.
- [4] Mao C, Jiang W, Huang J, et al. Quantitative parameters of diffusion spectrum imaging: HER2 status prediction in patients with breast cancer[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 817070. DOI: 10.3389/fonc.2022.817070.
- [5] Zhao X, Yang X, Fu L, et al. Associations of estrogen receptor, progesterone receptor, human epidemic growth factor receptor-2 and ki-67 with ultrasound signs and prognosis of breast cancer patients[J]. *Cancer Manag Res*, 2021, 13: 4579-4586. DOI: 10.2147/CMAR.S276422.
- [6] Ueda D, Yamamoto A, Takashima T, et al. Training, validation, and test of deep learning models for classification of receptor expressions in breast cancers from mammograms[J]. *JCO Precis Oncol*, 2021, 5: 543-551. DOI: 10.1200/PO.20.00176.
- [7] 邹紫勤, 黄艳芳, 周智慧, 等. HER-2 阳性乳腺癌中不同激素受体表达状态的磁共振鉴别[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2023, 48(1): 68-75. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7347.2023.220096.
- [8] 苏晓慧, 李超, 林青, 等. 乳腺断层摄影和超声对不同病理级别非钙化型导管原位癌的诊断效能[J]. *中国医学影像学杂志*, 2022, 30(11): 1130-1135. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5185.2022.11.009.
- [9] Kim JJ, Kim JY, Suh HB, et al. Characterization of breast cancer subtypes based on quantitative assessment of intratumoral heterogeneity using dynamic contrast-enhanced and diffusion-weighted magnetic resonance imaging[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(2): 822-833. DOI: 10.1007/s00330-021-08166-4.
- [10] Szep M, Pintican R, Boca B, et al. Multiparametric MRI features of breast cancer molecular subtypes[J]. *Medicina* (Kaunas), 2022, 58(12): 1716. DOI: 10.3390/medicina58121716.
- [11] Galati F, Rizzo V, Moffa G, et al. Radiologic-pathologic correlation in breast cancer: do MRI biomarkers correlate with pathologic features and molecular subtypes?[J]. *Eur Radiol Exp*, 2022, 6(1): 39. DOI: 10.1186/s41747-022-00289-7.
- [12] Du S, Gao S, Zhang L, et al. Improved discrimination of molecular subtypes in invasive breast cancer: comparison of multiple quantitative parameters from breast MRI[J]. *Magn Reson Imaging*, 2021, 77: 148-158. DOI: 10.1016/j.mri.2020.12.001.
- [13] Long N, Ran C, Sun J, et al. Correlation study between the magnetic resonance imaging features of breast cancer and expression of immune molecular subtypes[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2020, 24(22): 11518-11527. DOI: 10.26355/eurev_202011_23793.
- [14] 陈义磊, 陈艾琪, 曹胜男, 等. 多参数3.0T MRI在HER-2阳性乳腺癌中的应用[J]. *蚌埠医学院学报*, 2021, 46(6): 786-790. DOI: 10.13898/j.cnki.issn.1000-2200.2021.06.020.
- [15] 苗环, 许文森, 孙宇. 浸润性乳腺癌 MRI 征象与 HER-2 及 Ki-67 表达的相关性[J]. *现代肿瘤医学*, 2020, 28(22): 3904-3907. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4992.2020.22.015.
- [16] Mumin NA, Ramli Hamid MT, Wong JHD, et al. Magnetic resonance imaging phenotypes of breast cancer molecular subtypes: a systematic review[J]. *Acad Radiol*, 2022, 29(Suppl 1): S89-S106. DOI: 10.1016/j.acra.2021.07.017.
- [17] 张天瑞, 高文怡, 姚娟, 等. 浸润性乳腺癌动态增强磁共振与分子分型的相关性分析[J]. *医学影像学杂志*, 2024, 34(1): 41-45. DOI: 1006-9011(2024)01-0041-05.
- [18] Liang X, Chen X, Yang Z, et al. Early prediction of pathological complete response to neoadjuvant chemotherapy combining DCE-MRI and apparent diffusion coefficient values in breast cancer[J]. *BMC Cancer*, 2022, 22(1): 1250. DOI: 10.1186/s12885-022-10315-x.
- [19] Mansour S, Abdullah E, Mohamed EH, et al. Imaging of HER2 detected receptor expression positive breast cancer: from detection to interpretation[J]. *Egypt J Radiol Nucl Med*, 2023, 54(1): 122. DOI: 10.1186/s43055-023-01063-4.
- [20] Kazama T, Takahara T, Hashimoto J. Breast cancer subtypes and quantitative magnetic resonance imaging: a systemic review[J]. *Life (Basel)*, 2022, 12(4): 490. DOI: 10.3390/life12040490.
- [21] 程雪, 余日胜, 徐民, 等. 乳腺癌的功能磁共振成像征象与人表皮生长因子受体 2 表达差异的相关性分析[J]. *中华医学杂志*, 2019, 99(31): 2440-2444. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2019.31.007.
- [22] Wang W, Lv S, Xun J, et al. Comparison of diffusion kurtosis

- imaging and dynamic contrast enhanced MRI in prediction of prognostic factors and molecular subtypes in patients with breast cancer[J]. *Eur J Radiol*, 2022, 154: 110392. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110392.
- [23] Kataoka M, Iima M, Miyake KK, et al. Multiparametric approach to breast cancer with emphasis on magnetic resonance imaging in the era of personalized breast cancer treatment[J]. *Invest Radiol*, 2024, 59(1): 26-37. DOI: 10.1097/RLI.0000000000001044.
- [24] Yang Z, Chen X, Zhang T, et al. Quantitative multiparametric MRI as an imaging biomarker for the prediction of breast cancer receptor status and molecular subtypes[J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 628824. DOI: 10.3389/fonc.2021.628824.
- [25] Wang Z, Ren G, Yin Q, et al. Correlation of magnetic resonance imaging quantitative parameters and apparent diffusion coefficient value with pathological breast cancer[J]. *World J Clin Cases*, 2022, 10(21): 7333-7340. DOI: 10.12998/wjcc.v10.i21.7333.
- [26] Partridge SC, Nissan N, Rahbar H, et al. Diffusion-weighted breast MRI: clinical applications and emerging techniques[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45(2): 337-355. DOI: 10.1002/jmri.25479.
- [27] Behnam A, Moein G, Fatemeh R, et al. A comprehensive evaluation of quantitative diffusion parameters for differentiating histopathological features and subtypes of breast cancers: diffusion kurtosis imaging (DKI), intravoxel incoherent motion (IVIM) and histogram analysis of ADC[J]. *Research Square (Research Square)*, 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2351497/v1.
- [28] Si L, Liu X, Li X, et al. Diffusion kurtosis imaging and intravoxel incoherent motion imaging parameters in breast lesions: effect of radiologists' experience and region-of-interest selection[J]. *Eur J Radiol*, 2023, 158: 110633. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110633.
- [29] Mendez AM, Fang LK, Meriwether CH, et al. Diffusion breast MRI: current standard and emerging techniques[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 844790. DOI: 10.3389/fonc.2022.844790.
- [30] Uslu H, Önal T, Tosun M, et al. Intravoxel incoherent motion magnetic resonance imaging for breast cancer: a comparison with molecular subtypes and histological grades[J]. *Magn Reson Imaging*, 2021, 78: 35-41. DOI: 10.1016/j.mri.2021.02.005.
- [31] Ma Y, Shan D, Wei J, et al. Application of intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging in differential diagnosis and molecular subtype analysis of breast cancer[J]. *Am J Transl Res*, 2021, 13(4): 3034-3043.
- [32] Wang W, Zhang X, Zhu L, et al. Prediction of prognostic factors and genotypes in patients with breast cancer using multiple mathematical models of MR diffusion imaging[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 825264. DOI: 10.3389/fonc.2022.825264.
- [33] Zhang D, Geng X, Suo S, et al. The predictive value of DKI in breast cancer: does tumour subtype affect pathological response evaluations?[J]. *Magn Reson Imaging*, 2022, 85: 28-34. DOI: 10.1016/j.mri.2021.10.013.
- [34] Kang HS, Kim JY, Kim JJ, et al. Diffusion kurtosis MR imaging of invasive breast cancer: correlations with prognostic factors and molecular subtypes[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 56(1): 110-120. DOI: 10.1002/jmri.27999.
- [35] Aristokli N, Polycarpou I, Themistocleous SC, et al. Comparison of the diagnostic performance of magnetic resonance imaging (MRI), ultrasound and mammography for detection of breast cancer based on tumor type, breast density and patient's history: a review[J]. *Radiography (Lond)*, 2022, 28(3): 848-856. DOI: 10.1016/j.radi.2022.01.006.
- [36] Pesapane F, Rotili A, Agazzi GM, et al. Recent radiomics advancements in breast cancer: lessons and pitfalls for the next future[J]. *Curr Oncol*, 2021, 28(4): 2351-2372. DOI: 10.3390/curroncol28040217.
- [37] Li R, Li L, Xu Y, et al. Machine learning meets omics: applications and perspectives[J]. *Brief Bioinform*, 2022, 23(1): bbab460. DOI: 10.1093/bib/bbab460.
- [38] Li C, Song L, Yin J. Intratumoral and peritumoral radiomics based on functional parametric maps from breast DCE-MRI for prediction of HER-2 and ki-67 status[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2021, 54(3): 703-714. DOI: 10.1002/jmri.27651.
- [39] Huang Y, Wei L, Hu Y, et al. Multi-parametric MRI-based radiomics models for predicting molecular subtype and androgen receptor expression in breast cancer[J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 706733. DOI: 10.3389/fonc.2021.706733.
- [40] Sheng W, Xia S, Wang Y, et al. Invasive ductal breast cancer molecular subtype prediction by MRI radiomic and clinical features based on machine learning[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 964605. DOI: 10.3389/fonc.2022.964605.
- [41] Lupat R, Perera R, Loi S, et al. Moanna: multi-omics autoencoder-based neural network algorithm for predicting breast cancer subtypes[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 10912-10924. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3240515.

【收稿日期】2024-04-15 【修回日期】2025-01-22

(本文编辑 冯婧)