

综述

8多模态磁共振成像在HER-2阳性乳腺癌中的应用研究进展

邹紫勤² 杨宇^{1,*} 黄艳芳¹1.湖南中医药大学第一附属医院放射科
(湖南长沙 410021)2.湖南省长沙市湖南中医药大学
(湖南长沙 410208)

【摘要】 HER-2(人表皮生长因子受体-2)阳性乳腺癌是指在基因检测中, HER-2基因表达为阳性的乳腺癌。通常而言, HER-2阳性乳腺癌预示着分化较差的肿瘤、较高的侵袭性、易转移和复发、患者预后一般较差。因此, 对于HER-2阳性乳腺癌患者而言, 早期及有效的临床诊断与治疗显得尤为重要。磁共振成像拥有着优秀的软组织分辨率, 不仅可以从中参数、多方位进行观察肿瘤形态学结构, 亦可以从血流动力学、肿瘤代谢等功能学角度阐释肿瘤内部异质性信息, 在HER-2阳性乳腺癌患者诊断、治疗及预后评估中发挥着重要的作用。本文就多参数磁共振成像在HER-2阳性乳腺癌应用的研究进展进行综述。

【关键词】 人表皮生长因子受体-2; 磁共振成像; 乳腺癌; 影像组学; 体素内不相关运动; 动态增强扫描

【中图分类号】R; 16

【文献标志码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.07.059

Advances in the Application of Multimodal Magnetic Resonance Imaging in HER-2-Positive Breast Cancer

ZOU Zi-qin², YANG Yu^{1,*}, HUANG Yan-fang².1.Department of Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410021, Hunan Province, China
2.Department of The Hospital of Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, Hunan Province, China

ABSTRACT

HER-2 (human epidermal growth factor receptor-2) positive breast cancer is defined as breast cancer with positive HER-2 gene expression in genetic testing. In general, HER-2-positive breast cancer predicts poorly differentiated tumors, higher aggressiveness, susceptibility to metastasis and recurrence, and generally poor patient prognosis. Therefore, early and effective clinical diagnosis and treatment of HER-2-positive breast cancer patients is of utmost importance. Magnetic resonance imaging has excellent soft tissue resolution and can not only observe the morphological structure of tumors from multiple parameters and directions, but also interpret the internal heterogeneity of tumors from the perspective of hemodynamics and tumor metabolism, which plays an important role in the diagnosis, treatment and prognosis assessment of HER-2-positive breast cancer patients. In this paper, we review the progress of multiparametric magnetic resonance imaging in HER-2-positive breast cancer.

Keywords: Human Epidermal Growth Factor Receptor-2; Magnetic Resonance Imaging; Breast Cancer; Radiomics; Intravoxel Incoherent Motion; Dynamic Contrast Enhanced Scan

乳腺癌是一种具有高度异质性的疾病, 由于基因组学、转录组学和微环境差异, 即使同一病理类型的乳腺癌中, 仍存在不同表型及生物学行为差异^[1], 从而导致临床分子分型, 治疗及预后大不相同。乳腺癌根据病理免疫组化结果, 雌激素受体(estrogenreceptor,ER)、孕激素受体(Progesterone receptor,PR)、人表皮生长因子受体2(humanepidermal growth factor receptor 2,HER-2)、核增殖标志物 Ki-67 的表达情况被分为: Luminal A型、Luminal B型、HER-2过表达型和三阴性^[2]。其中, Luminal B型可根据HER-2受体的表达可细分为Luminal B(HER-2阳)型和Luminal B(HER-2阴)型。Luminal B(HER-2阳)型与HER-2过表达型两种亚型因其都存在HER-2阳性的表达又被归入HER-2阳性乳腺癌当中。HER-2阳性乳腺癌患者其肿瘤恶性程度较高、患者生存率低, 预后较差^[3]。为了提高患者的预后及生存率, 尽早的诊断及治疗尤为关键。磁共振成像作为一种无创、无电离辐射的影像学检查手段, 其软组织分辨率较高, 可通过多种功能磁共振序列展现肿瘤的表现形态, 代谢功能及血流动力学等分子影像学信息, 已成为HER-2阳性乳腺癌诊断, 检测治疗效果及评价预后的重要工具。目前, 国内外对HER-2阳性乳腺癌的关注度并不高, 相关的研究报告也不多, 对磁共振在HER-2阳性乳腺癌中的应用价值可能缺乏系统性的认识。本文就多参数磁共振成像与HER-2阳性乳腺癌中的应用相关性研究进展进行综述。

1 多参数MRI对HER-2阳性乳腺癌诊断的应用

1.1 常规MRI序列 常规MRI序列包括T1、T2加权成像及压脂序列, 主要用于对病灶的位置、数量、大小、边缘、病灶内部信号特点、肿瘤周围侵犯及淋巴结转移状态做出评估。由于常规MRI序列主要是从表现形态学的角度获取病灶的信息, 而乳腺良、恶性早期可能出现类似的病理变化, 导致磁共振上表现出相同的影像学征象^[4]以及正常的腺体信号对病灶可能也存在一定的干扰, 以至于常规序列能够获取的病灶信息十分有限。

1.2 磁共振动态对比增强MRI (DCE-MRI) 通过向静脉内注射对比剂, 进行灌注、渗透成像, 观察病灶的血供情况, 不仅可以更好的定性观察病灶的大小、形态、边缘、内部结构, 还可以半定量地分析时间信号强度曲线(timeintensity curve, TIC)以及计算相关参数, 如早期强化率、最大强化率、达峰时间等指标, 同时也可以通过建立药代动力学模型(两室模型)来量化血管与血管外细胞外空间的组织液交换, 从而获得如容量转移常数(Ktrans)、速率常数(kep)、血管外细胞外间隙容积比(ve)等反应组织灌注的定量参数, 从而更好的反应病灶的渗透性及血流灌注情况。

1.2.1 定性分析 张文等人研究发现^[5], 相比于HER-2阴性乳腺癌, HER-2阳性组往往拥有更大的肿块直径, 在直径>2cm上, 存在显著的统计学差异, 这一点与张雪峰等人研究结果一致^[6]。HER-2可以通过调控细胞的周期, 促进细胞的增殖及新生血管的生成、抑制细胞凋亡, 从而获得更快的增殖速度^[7], 这可能说明HER-2阳性表达者肿瘤更具恶性及侵袭性, 表现出更大的肿瘤体积, 更不规则的肿块形态及较毛糙的边界。多数学者指出, HER-2阳性表达^[8-9]肿瘤常存在毛刺状的边界, 形态也多不规则^[10]。陈义磊等人^[10]研究发现HER-2阳性组病灶呈不规则或分叶形者高达85.29% (29/34)、边缘呈不规则或毛刺者为82.35% (28/34)。也有学者^[9]指出, HER-2阳性组的肿块率低于阴性组。HER-2阳性组病灶以边缘毛刺及不规则多见, 两者均有统计学意义。关于HER-2阳性乳腺癌

【第一作者】邹紫勤, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 乳腺MR。E-mail: 2783234713@qq.com

【通讯作者】杨宇, 男, 主任医师, 主要研究方向: 乳腺MR。E-mail: 178693936@qq.com

内部强化方式的研究, 基于HER-2阳性乳腺癌富血供及生长更快的特点, 过快的生长易导致肿瘤内部缺血缺氧, 导致坏死、纤维化的形成, 而HER-2诱导生成的肿瘤血管更易出现在周围, 因此在影像学上多出现环形强化^[7]。陈义磊等人研究发现^[10], HER-2表达阳性者相比于阴性者更易出现环形强化, HER-2阳性组环形强化占47.06% (16/34); 阴性组占15.00% (6/40), 两者具有统计学意义。李静^[11]等人研究指出, HER-2的表达与环形强化方式存在明显的正相关, 环形强化的肿块HER-2的阳性表达率高达73.7%。这说明, 环形强化对鉴别HER-2阳性乳腺癌存在一定的价值。通常而言, HER-2阳性乳腺癌肿瘤侵袭性高, 易浸润周围组织, 因此发生淋巴结的转移的机会可能也会随之增加。国内有学者^[12]研究发现, HER-2阳性组淋巴结转移率显著高于HER-2阴性组, 淋巴结转移组HER-2阳性(32.97%, 30/91), 非淋巴结转移组(20.71%, 29/140), 这与孙宇^[8]等人研究结果一致。这可能是因为HER-2能够诱导机体的血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)增加, 促进肿瘤新生血管的形成^[7], 从而使乳腺癌细胞能够更好的侵袭与转移。

1.2.2 半定量分析 时间信号强度曲线(timeintensity curve, TIC)可分为流入型(I型)、平台型(II型)以及上升型(III型)。HER-2乳腺癌具有丰富的血供, 其可以通过诱导血管内皮生长因子的生成, 来促使肿瘤血管的产生以及灌注的增加^[7], 而新生的内皮血管壁相对不完整, 内皮细胞通透性较高, 因此易出现快进快出的强化模式, 多表现出III型及少许II型的TIC类型。但多数研究发现^[10,13], HER-2阳性及阴性组均以II型及III型TIC曲线为主要表现, 两者之间并不存在统计学意义。出现这一结果的原因可能为, 乳腺癌本身就是一种恶性程度高的疾病, 多产生大量的新生肿瘤血管, 血管通透性高, 易出现II型及III型TIC曲线。有研究指出^[14,15], HER-2的表达显示出更高的早期强化率、最大强化率以及较低的达峰时间。导致这一结果的原因可能是因为HER-2阳性患者细胞增殖更活跃, 新生肿瘤血管更多、密度更大, 灌注更高, 血管通透性更大, 对比剂可以较快的流入组织间隙。关于对比剂流入浓度增强率(W-in)和对比剂流出浓度衰减率(W-out), 国内外研究结果有所出入, 在孟优等人研究^[13]当中, HER-2阳性组W-in值较HER-2阴性组明显降低, HER-2阳性组W-out值较HER-2阴性组明显升高。然而Macchini等人^[16]研究表示Wash-in、Wash-out在HER-2阳性和阴性组之间没有明显的差异。造成这一结果差异的原因可能是样本数量、样本个体之间的差异, ROI感兴趣区的选取方式存在差异, 参数的计算方法不一致等。要想得出更为准确的结果, 还需要更大样本及多中心的进一步研究。

1.2.3 定量分析 HER-2可诱导VEGF的产生^[7], 促进肿瘤新生血管的生成, HER-2表达程度越高, 肿瘤内部血流灌注越高, 而新生的血管壁不完整, 通透性高, 物质在组织与血浆间转运速度快, 而Ktrans及kep作为反映局部血流量及血管通透性的指标, 值相对较高, Ve值是指单位容积组织内细胞外血管外间隙容积, 与细胞密度及微血管密度相关, 随着细胞密度及微血管密度的增大, Ve值应减低。但早前多数的研究结果似乎与预计的并不一致。Catalano等人^[17]研究发现HER-2阳性乳腺癌对比HER-2阴性有更低的Kepmean。柏晓茹^[18]等人则指出HER-2阴性组和HER-2阳性组DCE-MRI定量参数(Ktrans、Kep)比较, 差异无统计学意义。关于文献报道不一致的情况, 分析其原因可能是主要与样本量、个体间差异、HER-2的蛋白质表达与基因扩增不一致等因素有关。Makhat等^[19]研究证实, HER-2基因无扩增组与扩增组间的组织相对血流量的差异有统计学意义, 而HER-2蛋白质表达阴性组和阳性组间的差异无统计学意义。

1.3 扩散加权成像(DWI)、体素内不相干运动(IVIM)及磁共振扩散峰度成像(DKI) 扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)是MIR功能成像序列中的一种, 能够无创性地检测活体组织中水分子的扩散运动, 其用于评价描述的定量参数为表现扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)。ADC值越低代表组织内水分子弥散运动更受限。通常乳腺恶性肿瘤往往细胞增殖速度快, 排列紧密, 细胞核大, 核质比高, 水分子运动限度大, ADC值偏低。但是, 传统ADC值的大小除了与组织内无规律的水分子运动相关外, 也与组织内的毛细血管微循环灌注相关。灌注效应的影响, 往往使得测得的ADC值偏高。为了解决这一难题, 1986年LeBihan^[20]提出了用来描述水分子微观运动的双指数新理论模型体素内非相干运动(intravoxel incoherent

motion, IVIM), 可以通过公式: $S_b/S_0 = (1-f) \times \exp(-bD) + f \cdot \exp(-bD^*)$ 拟合出相关参数, 从而分离体素内水分子成分及灌注成分, 其参数有D*、D和f。D*表示的是微循环的灌注扩散成分, D表示的是水分子的扩散, f表示的是微循环灌注扩散成分占总扩散成分的百分比。DWI的实际运用理论是基于水分子弥散运动满足高斯分布的理想状态。然而实际上组织中水分子的运动受到多方面因素的限制, 如细胞膜、细胞器等, 复杂的微环境使得水分子的运动偏离高斯分布。而扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging, DKI)能在高b值下对水分子偏离高斯分布的运动进行研究, 它在反映组织微观结构的复杂性强于传统的DWI。目前, 其运用较多的参数为平均扩散峰度(Mean Kurtosis, MK), MK反映的是组织内部病理生理复杂程度, 内部结构越复杂, MK值越高。

1.3.1 扩散加权成像 有研究表明^[17,21], HER-2阳性组的ADC值明显大于HER-2阴性组。原因可能在于HER-2^[7]能够诱导VEGF增加, 促进肿瘤新生血管的形成, 灌注分数的增加会导致ADC值增高, 而HER-2阳性乳腺癌同时又因为高细胞增殖性, 具有密集排列的细胞, 使ADC值降低, 较高的灌注分数对ADC值得影响可能超过了高细胞性对ADC值的影响, 使得HER-2阳性乳腺癌组的ADC相对阴性组要更高。

1.3.2 体素内不相干运动(IVIM) Tosun等人报道^[22], HER-2阳性肿瘤, 相比于HER-2阴性肿瘤, f和D*值要更高。这与汪林等人^[23]研究结果一致。这一结果可能能用HER-2诱导VEGF的产生^[7], 促进肿瘤新生血管的生成, 使得肿瘤内部血流灌注增高加以解释。而真实水分子的扩散D值, 周晖等人研究指出^[24], HER-2阳性组D值低于HER-2阴性组, 并解释为HER-2阳性患者癌细胞增殖更快, 导致癌细胞排列紧密, 细胞外间隙缩小, 水分子扩散受限, 因此D值降低, 但这一点并未在部分研究结果中得到体现^[22-23]。出现结果不一致的原因可能与^[24]ROI的设置方法未统一、参数的拟合算法、回波时间、实验中b值的设置缺乏标准化及样本数量不一致, 个体间差异等因素相关。目前, HER-2阳性乳腺癌中IVIM相关的研究较少, 仍需更多样本量以及多中心的进一步研究。

1.3.3 扩散峰度成像(DKI) 多数研究认为^[25-26]HER-2阳性者较HER-2阴性者有更高的MK值。这可能与HER-2阳性乳腺癌血供丰富, 细胞增殖力强, 更易出现坏死, 囊变, 炎症, 使得肿瘤内部微环境更复杂相关。

1.4 磁共振波谱成像(magnetic resonance spectrum, MRS) MRS是一种新兴的磁共振功能成像方法, 能够无创的检测组织内的生化、能量代谢水平, 从而监测组织内的生理病理信息, 对乳腺癌的发生、发展及鉴别进行一定的评估。目前, MRS对乳腺癌的研究多集中于氢质子磁共振波谱。杨涛等人研究指出^[27], 胆碱积分和胆碱与水积分比值均随着乳腺癌的组织学分级和病理分期的增加而增高, 这预示着MRS对乳腺癌的术前分期诊断具有一定的价值。陈萍等人研究指出^[28], 乳腺癌恶性病变中, 胆碱与水积分比值范围具有统计学意义。氢质子磁共振波谱如今已经在乳腺癌的诊断、鉴别、肿瘤分期、预后评价及新辅助治疗后早期评估上展现了一定的价值。但是, 目前, 国内外对MRS在HER-2阳性乳腺癌的应用研究方面空缺较大, 以至于这方面的研究较少, 这可能表明MRS在HER-2阳性乳腺癌中还有着巨大的潜在价值等待着被发现, 但这仍需进一步的深入相关研究去挖掘、验证。

2 多参数MRI在辅助HER-2阳性乳腺癌新辅助化疗过程的应用

新辅助化疗(Neoadjuvant chemotherapy, NAC)是对局部中晚期患者进行的全身化疗, 通过尽早使肿块缩小以及杀死微小的转移细胞, 来给后续的局部手术或放疗创造可行的条件。有研究表明^[29-30], HER-2阳性乳腺癌相比于阴性组NAC后更容易达到病理完全缓解(pathologic complete response, pCR)的标准, 这被认为是^[30]HER-2阳性乳腺癌有着更高的血流灌注及细胞增殖, 化疗和靶向药物更容易到达肿瘤病灶发挥并诱导的凋亡和细胞坏死。Ring等人^[31]早先研究表明, NAC后达pCR的患者可能可以通过仅服用药物来获得良好的预后, 从而免除手术带来的困扰。那么, 如何在NAC后手术前精准的预测HER-2阳性乳腺癌患者是否达到PCR状态, 成为了临床工作的一大难题。磁共振具有良好的软组织分辨力, 能够无创地从形态、血流动力及代谢功能等多方面观测乳腺癌病灶内部的病理生理信息, 是评价乳腺癌NAC后疗效的重要手段。Yu等^[32]对2013-2018年发表的10项研究中的243例HER-2+患者的进行回顾分析, 发现NAC后的PCR, 阴性预测值

(negative predictive value, NPV)为62%~94.6%,阳性预测值(positive predictive value, PPV)为34.9%~72%。这均表明MRI在NAC后的HER-2阳性乳腺癌PCR状态有一定的预测价值,但是通过单独MRI判断的临床缓解标准(clinical complete remission, CCR)来预测PCR的准确度,并未达到临床所要求的标准。MRI无法准确地NAC的PCR,这可能与NAC后炎症、纤维化或组织坏死相关,这些病理生理的改变都可能造成影像学上对PCR的低估或高估^[33]。并且,肿瘤NAC后可能出现收缩形式的不一致、浸润性癌的内部结构也存在复杂性,这些都阻碍着MRI对乳腺癌NAC后PCR做出准确地判断^[34]。为了解决这一问题,有学者尝试结合超声与MRI对HER-2阳性乳腺癌NAC后状态做出评价, Maki^[35]等人的研究发现MRI + US诊断乳腺癌NAC后PCR的PPV为86.8%, MRI单独的PPV为79.4%,相比于单独MRI诊断,PPV有所增高,但其准确度仍然不足以支持临床决策。真正可行的监测方案仍需进一步的深入研究探索。关于磁共振影像学特征对HER-2阳性乳腺癌PCR的预测, DONG^[36]等研究发现, HER-2阳性乳腺癌NAC后乳腺背景实质强化(background parenchymal enhancement, BPE)水平的降低与pCR显著相关。该作者分析可能是由于乳腺BPE强化程度越高,乳腺血供越丰富,化疗药物更容易到达病灶,杀灭癌细胞同时会损伤血管,导致BPE程度下降。Kim等人指出^[37] HER-2阳性乳腺癌会有更高腋窝淋巴结NAC后阴性率。这一点与Vinnicombe等人研究一致。张丹丹^[39]等人通过HER-2阳性乳腺癌多因素 Logistic回归分析时,发现较低的ER表达、较高的KI-67表达、较大的两周内 $\Delta ADC\%$ 及 $\Delta D\%$ (肿瘤最大直径)是PCR的独立预测因素。这似乎可以用较低的ER表达有着更高的血流灌注,较高的KI-67表达意味着肿瘤内部细胞的高增殖性,这两者有助于化疗及靶向药物到达肿瘤位置及更好发挥作用,造成肿瘤内部细胞大量坏死,肿瘤组织坏死或纤维化后,水分子弥散自由度提高,肿瘤的大小及ADC值亦会发生显著变化来解释。

3 基于多参数MRI的影像组学在HER-2阳性乳腺癌中的应用

影像组学旨在从肉眼无法观测到的影像图像差别上挖掘大量的高通量特征,通过创建合适的模型将特征信息整理成数据集,从而量化由肿瘤内部异质性导致的影像图像上的异质,再结合临床病理学信息及所获得的反映肿瘤在蛋白质基因组及分子上的高通量特征信息来更深入的发掘肿瘤内部的异质信息。从而为临床提供更加准确、有效的影像学信息。

Zhou等人^[40]从脂肪抑制t2加权成像和动态增强T1加权(DCE-T1)术前MRI中提取了14个纹理特征、4个一阶特征、9个小波特征和1个形状特征,分别用以脂肪抑制t2加权图像、DCE-T1图像及其组合的放射组学特征区分HER-2阳性和HER-2阴性乳腺癌的性能,验证队列得到的AUC达到0.70、0.68和0.81。Li^[41]等人提取了91例浸润性乳腺癌的大小、形状和增强纹理特征用于区分HER-2/HER+表达状态, AUC达到0.65。Demircioglu等人^[42]研究发现,从98例患者的动态对比增强t1加权成像和t2加权成像提取13.118个定量图像特征,用于预测HER-2受体表达状态,预测AUC值为0.62。就目前来说,有关HER-2阳性乳腺癌的影像组学研究不多,且多是单中心、回顾性的研究,尽管上述研究都验证了影像组学在HER-2阳性乳腺癌方面有着巨大的潜力,但实验缺乏统一的标准,由于各地研究机构设备、预处理或后处理方式^[43]等因素的差异,可重复性和通用性仍较差。影像组学的实用价值需要更为统一的实验标准、更大规模的内部研究和外部验证去发掘。

综上所述,多参数MRI通过其自身多方位、多功能、多参数的成像优势已经在HER-2阳性乳腺癌的诊断、鉴别、预后等方面展现了一定的优势。在相关影像学检查中发挥着越来越重要的作用。但在部分成像模式如DCE-MRI中的半定量分析、DWI中的IVIM成像的参数分析中等方面,国内外学者研究结果仍存在争议。磁共振波谱成像及影像组学在HER-2阳性乳腺癌中的运用价值仍需要更大的规模的实验研究去验证、发掘。倘若这些研究难题能有效得以解决,多参数MRI在HER-2阳性乳腺癌中的运用将会迎来更广阔的天地。

参考文献

- [1] 蒋梦怡, 陆言巧, 王红霞. 乳腺癌异质性的研究进展及临床意义[J]. 中国癌症杂志, 2020, 30(5): 394-400.
- [2] 陆子璇, 储兵. 不同组织学类型乳腺癌的临床病理特征分析[J]. 罕少疾病杂志, 2021, 28(4): 36-37+98.
- [3] 王金海. 微滴式数字PCR与IHC联合FISH对乳腺癌新辅助化疗后HER-2检测的分析[J]. 罕少疾病杂志, 2023, 30(3): 36-38.
- [4] Gohagan J K, Spitznagel E L, Murphy W A, et al. Multispectral analysis of MR images of the breast. Radiology, 1987, 163(3): 703-707.

- [5] 石琴, 付志明, 张文, 等. 乳腺癌动态增强磁共振成像特征与分子预后标志物的关系[J]. 肿瘤影像学, 2019, 28(6): 371-376.
- [6] 张雪峰. 乳腺癌的MRI特征与淋巴结转移和PR、ER、Ki-67、HER-2表达的相关性[J]. 国外医学(医学地理分册), 2019, 40(1): 46-48.
- [7] 朱辉严, 谢力群, 许平等. 乳腺癌DCE-MRI影像表现与VEGF、Her-2表达水平的关系研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2017, 15(6): 72-75.
- [8] 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.
- [9] 徐新红. 乳腺癌浸润性导管癌的MRI表现与病理相关性研究[D]. 南昌大学, 2021.
- [10] 陈义森, 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.
- [11] 安丽华, 时克伟, 李静. 乳腺癌动态增强磁共振成像与Her-2、Ki-67表达的相关性[J]. 兰州大学学报(医学版), 2018, 44(3): 51-55.
- [12] 牛微. 术前乳腺癌原发灶DCE-MRI特征预测腋窝淋巴结转移的价值[D]. 大连医科大学, 2019.
- [13] 孟优, 张帆, 刘晨鹭, 等. 动态增强磁共振半定量参数对乳腺癌人表皮生长因子受体-2表达的预测价值[J]. 中华诊断学电子杂志, 2021, 9(1): 40-45.
- [14] 邓智超. 乳腺癌磁共振动态增强扫描及表观扩散系数与其预后因子的相关性研究[D]. 延边大学, 2020.
- [15] 刘志敏. 乳腺癌浸润性小叶癌MRI特征与表观生长因子受体2表达的相关性分析[J]. 河南外科学杂志, 2021, 27(5): 9-12.
- [16] Macchini M, Ponziani M, Pistelli M, et al. Role of DCE-MR in predicting breast cancer subtypes[J]. Radiol Med, 2018, 123(10): 753-764.
- [17] Catalano OA, Horn GL, Signore A, et al. PET/MR in invasive ductal breast cancer: correlation between imaging markers and histological phenotype[J]. Br J Cancer, 2017, 116(7): 893-902.
- [18] 柏晓茹, 郑建, 罗红红. 不同分子亚型乳腺癌患者MRI定量增强参数比较[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19(12): 78-80.
- [19] Makkat R, Luybaert R, Stadnik T, et al. Deconvolution-based dynamic contrast-enhanced MR imaging of breast tumors: correlation of tumor blood flow with human epidermal growth factor receptor 2 status and clinicopathologic findings—preliminary results. Radiology, 2008, 249(2): 471-482.
- [20] 杜常月, 齐旭红, 温智勇, 等. SWI、3D-ASL及IVIM鉴别高低级别脑胶质瘤的研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(1): 9-11+28.
- [21] Horvat JV, Iyer A, Morris EA, et al. Histogram Analysis and Visual Heterogeneity of Diffusion-Weighted Imaging with Apparent Diffusion Coefficient Mapping in the Prediction of Molecular Subtypes of Invasive Breast Cancers[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2019, 2972189.
- [22] Uslu H, Onal 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.
- [23] 汪林, 陈向荣, 汪淑惠, 等. IVIM定量分析在不同分子分型乳腺癌鉴别诊断中的效果分析[J]. 影像科学与光化学, 2020, 38(2): 368-375.
- [24] 余哲敏, 刘进康, 周晖, 等. 体素内不相干运动与动态增强对乳腺癌免疫组化指标的预测价值[J]. 中国医学影像学杂志, 2019, 27(7): 522-526+528.
- [25] You C, Li JW, Zhi WX, et al. The volumetric-tumour histogram-based analysis of intravoxel incoherent motion and non-Gaussian diffusion MRI: association with prognostic factors in HER-2-positive breast cancer[J]. J Transl Med, 2019, 17(1): 182.
- [26] 薛晓雨. 多参数磁共振成像在HER-2阳性与HER-2阴性乳腺癌鉴别诊断中的应用价值[D]. 济宁医学院, 2021.
- [27] 杨涛, 付雨媛, 王晓阳, 等. 在体1H-MRS在肿块型浸润性乳腺癌分期诊断和预后评估中的应用价值[J]. 医疗卫生装备, 2020, 41(8): 10-13.
- [28] 陈洋, 陈自谦, 汪丽. 3.0T体素磁共振波谱成像对乳腺恶性肿瘤病变诊断的研究[J]. 功能与分子医学影像学(电子版), 2018, 7(2): 1424-1430.
- [29] Iwase M, Sawaki M, Hattori M, et al. Assessing residual cancer cells using MRI and US after preoperative chemotherapy in primary breast cancer to omit surgery[J]. Breast Cancer, 2018, 25(5): 583-589.
- [30] Santamaría G, Bargalló X, Fernández PL, et al. Neoadjuvant Systemic Therapy in Breast Cancer: Association of Contrast-enhanced MR Imaging Findings, Diffusion-weighted Imaging Findings, and Tumor Subtype with Tumor Response[J]. Radiology, 2017, 283(3): 663-672.
- [31] Ring A, Webb A, Ashley S, et al. Is surgery necessary after complete clinical remission following neoadjuvant chemotherapy for early breast cancer? [J]. J Clin Oncol, 2003, 21(24): 4540-4545.
- [32] Yu N, Leung VWY, Meterissian S. MRI Performance in Detecting pCR After Neoadjuvant Chemotherapy by Molecular Subtype of Breast Cancer[J]. World J Surg, 2019, 43(9): 2254-2261.
- [33] Rosen EL, Blackwell KL, Baker JA, et al. Accuracy of MRI in the detection of residual breast cancer after neoadjuvant chemotherapy[J]. AJR Am J Roentgenol, 2003, 181(5): 1275-1282.
- [34] Balleis L, Gigli S, Pastena FD, et al. Magnetic resonance imaging tumor regression shrinkage patterns after neoadjuvant chemotherapy in patients with locally advanced breast cancer: Correlation with tumor biological subtypes and pathological response after therapy[J]. Tumour Biol, 2017, 39(3): 1010428317694540.
- [35] Hayashi N, Tsunoda H, Namura M, et al. Magnetic Resonance Imaging Combined With Second-look Ultrasonography in Predicting Pathologic Complete Response After Neoadjuvant Chemotherapy in Primary Breast Cancer Patients[J]. Clin Breast Cancer, 2019, 19(1): 71-77.
- [36] Chen JH, Yu HJ, Hsu C, et al. Background Parenchymal Enhancement of the Contralateral Normal Breast: Association with Tumor Response in Breast Cancer Patients Receiving Neoadjuvant Chemotherapy[J]. Transl Oncol, 2015, 8(3): 204-209.
- [37] Kim R, Chang JM, Lee H, et al. Predicting Axillary Response to Neoadjuvant Chemotherapy: Breast MRI and US in Patients with Node-Positive Breast Cancer[J]. Radiology, 2019, 293(1): 49-57.
- [38] Al-Hattali S, Vinnicombe SJ, Gowdh NM, et al. Breast MRI and tumour biology predict axillary lymph node response to neoadjuvant chemotherapy for breast cancer[J]. Cancer Imaging, 2019, 19(1): 19-91.
- [39] 张丹丹, 华佳, 庄治国, 等. MRI参数联合免疫组化对HER-2阳性乳腺癌新辅助化疗疗效的评估价值[J]. 实用放射学杂志, 2019, 35(11): 1754-1758.
- [40] Zhou J, Tan H, Li W, et al. Radiomics Signatures Based on Multiparametric MRI for the Preoperative Prediction of the HER2 Status of Patients with Breast Cancer[J]. Acad Radiol, 2021, 28(10): 1352-1360.
- [41] Li H, Zhu Y, Burnside ES, et al. Quantitative MRI radiomics in the prediction of molecular classifications of breast cancer subtypes in the TCGA/TCIA data set[J]. NPJ Breast Cancer, 2016, 2: 16012.
- [42] Demircioglu A, Gruenewald J, Ingenwerth M, et al. A rapid volume of interest-based approach of radiomics analysis of breast MRI for tumor decoding and phenotyping of breast cancer[J]. PLoS One, 2020, 15(6): e0234871.
- [43] 潘杰, 毛景松, 姚天虹, 等. 影像组学在肝癌中的应用的研究进展[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(4): 174-177.

(收稿日期: 2022-02-25)

(校对编辑: 谢诗婷)