

论 著

三种不同指数模型预测乳腺癌人类表皮生长因子受体2阳性状态：一项基于IVIM的研究

蔡康杰¹ 李海歌^{1,*} 朱建国¹
郭浩东¹ 黄泽波² 梁 童²
袁晓凡¹ 贾子涵¹

1.南京医科大学第二附属医院医学影像科
(江苏 南京 210011)

2.南京医科大学附属妇产医院(南京市妇幼保健院)医学影像科 (江苏 南京 210004)

【摘要】目的 探讨并比较单指数模型、双指数模型、拉伸指数模型定量参数对乳腺癌HER2阳性状态的预测价值。**方法** 回顾性分析67例确诊为浸润性乳腺癌患者的影像及临床资料。在病灶表现扩散系数(ADC)图像勾画感兴趣区(ROI)，并对照扩散加权成像(DWI)图像修正ROI，记录病灶的表现扩散系数(ADC)、伪扩散系数(ADC_{fast})、真实扩散系数(ADC_{slow})、灌注分数(ADC_{fraction of fast})、分布扩散系数(DDC)、扩散异质性值(α)。根据免疫组化结果，将患者分为两组(HER2阳性 vs. HER2阴性)。采用单因素分析比较两组间三种指数模型的六项定量参数(ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、ADC_{fraction of fast}、DDC、 α)组间差异。将具有统计学差异的定量参数纳入二元Logistic回归分析，并构建联合预测模型。采用DeLong检验比较三种模型定量参数、联合模型的受试者工作特征(ROC)曲线下面积(AUC)，区分诊断效能。**结果** HER2阳性组ADC_{fast}值高于HER2阴性组($P<0.05$)，ADC、ADC_{slow}、DDC值低于HER2阴性组(均 $P<0.05$)。ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、DDC、ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型的AUC分别为75.85%、71.11%、76.92%、71.11%、88.19%；ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型的AUC最高，诊断效能显著优于ADC_{fast}($P=0.009$)，与ADC、ADC_{slow}、DDC相仿(均 $P>0.05$)；ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、DDC的诊断效能组间比较表现相仿(均 $P>0.05$)。**结论** 三种不同指数模型定量参数有助于预测乳腺癌HER2阳性状态；双指数模型参数联合模型预测效能最优。

【关键词】 乳腺癌；人类表皮生长因子受体2；表现扩散系数；体素内不相干运动；拉伸指数模型

【中图分类号】 R737.9

【文献标识码】 A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.04.030

Prediction of Human Epidermal Growth Factor Receptor 2 Positive Status in Breast Cancer by Three Different Exponential Models: a Study Based on IVIM

CAI Kang-jie¹, LI Hai-ge^{1,*}, ZHU Jian-guo¹, GUO Hao-dong¹, HUANG Ze-bo², LIANG Tong²,
YUAN Xiao-fan¹, JIA Zi-han¹.

1.Department of Medical Imaging, Second Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210011, Jiangsu Province, China

2.Department of Medical Imaging, Affiliated Obstetrics and Gynecology Hospital of Nanjing Medical University (Nanjing Maternal and Child Health Hospital), Nanjing 210004, Jiangsu Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate and compare the predictive value of quantitative parameters deriving from the mono-exponential, bi-exponential, and stretched-exponential for human epidermal growth factor receptor 2 (HER2) positive status in breast cancer, based on intra-voxel incoherent motion (IVIM). **Methods** The clinical and imaging data of 67 patients with invasive breast cancer were analyzed retrospectively. On the apparent diffusion coefficient (ADC) image of the lesion, region of interest (ROI) was delineated and subsequently adjusted reference to diffusion weighted imaging (DWI) image. The apparent diffusion coefficient (ADC), fast diffusion coefficient (ADC_{fast}), slow diffusion coefficient (ADC_{slow}), fraction of fast diffusion coefficient (ADC_{fraction of fast}), distributed diffusion coefficient (DDC), and intravoxel diffusion heterogeneity index (α) were recorded. Patients were divided into two groups based on immunohistochemistry results (HER2-positive vs. non-HER2-positive). Univariate analysis was used to assess the differences among six quantitative parameters (ADC, ADC_{fast}, ADC_{slow}, ADC_{fraction of fast}, DDC, α) of three different exponential models between the HER2-positive and non-HER2-positive groups. Statistically significant quantitative parameters were incorporated in binary Logistic regression, and a combined predictive model was created. To evaluate diagnostic performance, the DeLong test was applied to compare the area under the curve (AUC) of the receiver operating characteristic (ROC) for all the individual quantitative parameters and combined model. **Results** The ADC_{fast} value in the HER2-positive group was higher than that in the HER2-negative group ($P<0.05$), while the ADC, ADC_{slow} and DDC values were lower than those in the HER2-positive group (all $P<0.05$). The AUCs of the ADC, ADC_{fast}, ADC_{slow}, DDC and the combined model (ADC_{fast}-ADC_{slow}) were 75.85%、71.11%、76.92%、71.11%、88.19%, respectively. The ADC_{fast}-ADC_{slow} combined model performed the highest AUC, showing significantly better diagnostic performance than ADC_{fast} ($P=0.009$), which was similar to ADC, ADC_{slow}, and DDC (all $P>0.05$). The diagnostic performance of ADC, ADC_{fast}, ADC_{slow}, and DDC showed no significant differences between in pairwise comparisons (all $P>0.05$). **Conclusion** Quantitative parameters deriving from three different exponential models contribute to predicting the HER2 positive status in breast cancer. The combined model of quantitative parameters deriving from bi-exponential model showed the best predictive performance.

Keywords: Breast Cancer; Human Epidermal Growth Factor Receptor 2; Apparent Diffusion Coefficient; Intravoxel Incoherent Motion; Stretched-exponential Model.

乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤^[1]，其发病率及死亡率呈上升趋势，严重威胁女性健康^[2]，因此早期精准诊断、早期治疗对患者有重要意义。

人类表皮生长因子2(human epidermal growth factor receptor 2, HER2)是临床制定乳腺癌患者治疗方案、判断预后的主要免疫组化指标之一，HER2阳性表达促进肿瘤生长和血管增殖，导致预后较差^[3-4]。临床研究表明，曲妥珠单抗+帕妥珠单抗双靶方案联合化疗与单用化疗相比能够显著提高HER2阳性表达乳腺癌患者病理完全缓解率^[5-6]。因此，早期诊断HER2阳性表达有助于临床制定治疗方案及改善患者预后。

磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)软组织分辨率较高，诊断乳腺癌敏感性高于钼靶、超声^[7]。MRI扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)是乳腺癌诊断常用序列，反映肿瘤组织微环境信息^[8]，但无法区分微循环与微结构。基于此开发的体素内不相干运动(intra-voxel incoherent motion, IVIM)序列^[9]，能够生成三种不同的指数模型(单指数模型、双指数模型、拉伸指数模型)，用于区分肿瘤组织微循环灌注与水分子扩散信息。我们既往研究已揭示了三种不同指数模型区分乳腺癌良恶性病变的价值^[10]，但未进一步研究其预测HER2阳性表达的作用。同时，这些不同DWI模型预测HER2阳性表达的能力尚未进行过比较。

因此，本研究旨在探讨并比较单指数模型、双指数模型、拉伸指数模型对乳腺癌HER2阳性表达的预测价值，为临床术前评估HER2阳性表达、选择治疗方案及预测患者预后提供帮助。

【第一作者】蔡康杰，男，住院医师，主要研究方向：乳腺影像学诊断。E-mail: 1131779905@qq.com

【通讯作者】李海歌，女，主任医师，主要研究方向：乳腺影像学诊断。E-mail: lihaige@njmu.edu.cn

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集2021年11月至2024年4月期间接受了乳腺3T MRI检查的患者信息(BI-RADS 4类及以上),包括影像资料及临床、病理资料(年龄、肿瘤最大径、月经状态、淋巴结转移、组织学分级)。

纳入标准:均接受IVIM-DWI检查;行MRI检查前未接受过手术、放化疗等治疗;术后病理资料完整,病理证实为浸润性乳腺癌,HER2表达状态诊断明确。排除标准:MRI扫描序列不全或图像质量较差;免疫组织化学(immunochis to chemistry, IHC)检测结果为HER2(++),但未进一步原位杂交(in situ hybridization, ISH)检测;病变体积较小(<1.0cm),无法准确勾勒病灶边缘。最终,67例患者被纳入研究。

1.2 图像采集 采用3.0 T MR扫描仪(GE Premier)检查,16通道乳腺专用相控线圈,患者俯卧位,足先进,双侧乳房自然悬垂于专用乳腺线圈内。扫描序列:轴位T1WI、轴位T2WI、轴位IVIM-DWI、轴位增强扫描。扫描参数如下:

轴位T1WI:TR=531.0ms,TE=6.9ms,层厚=5.0mm,间距=1.0mm,FOV=36.0cm×36.0cm,矩阵=412×320,扫描时间=1min16s,NEX=1。

轴位T2WI:TR=4858.0ms,TE=88.3ms,层厚=5.0mm,间距=1.0mm,FOV=36.0cm×36.0cm,矩阵=352×288,扫描时间=2min26s,NEX=1。

轴位IVIM-DWI:TR=4235.0ms,TE=63.5ms,层厚=5.0mm,间距=1.0mm,FOV=36.0cm×25.2cm,矩阵=130×180,扫描时间=15min15s,b值=1800,1200,800,400,200,150,100,70,0 s/mm²,NEX=14,10,4,2,2,1,1,1,1。

轴位增强:TR=4.1ms,TE=2.1ms,层厚=3.2mm,间距=0mm,FOV=32.0cm×32.0cm,矩阵=320×320,扫描时间=5min01s,NEX=1。

1.3 图像后处理 采用后处理工作站(adw 4.6版本)软件(Functool MADC)处理图像,沿表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)图病灶低信号区边缘勾画感兴趣区(region of interest, ROI),并对照DWI序列病灶高信号区修正感兴趣区,记录三种指数模型参数:(1)单指数模型:表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC);(2)双指数模型:伪扩散系数(fast diffusion coefficient, ADC_{fast})、真实扩散系数(slow diffusion coefficient, ADC_{slow})、灌注分数(fraction of fast diffusion coefficient, ADC_{fraction of fast});(3)拉伸指数模型:分布扩散系数(distributed diffusion coefficient, DDC)、扩散异质性值(alpha,α)(见图1)。

1.4 病理标准 HER2检测参考我国《乳腺癌HER2检测指南(2019版)》^[11]和《人表皮生长因子受体2阳性乳腺癌临床诊疗专家共识(2021)版》^[12],进行IHC检测和ISH检测。IHC检测结果(+++)者,

为阳性组;IHC()或(+)者为阴性组;IHC(++)者进一步行荧光原位杂交法(fluorescence in situ hybridization, FISH),HER2无扩增者分为阴性组,有扩增者分为阳性组。

1.5 统计分析 采用SPSS 26.0、MedCalc 20.0统计软件进行统计分析,P<0.05认为具有统计学差异。

连续变量采用Kolmogorov-Smirnov检验判断是否符合正态分布,符合正态分布者表示为均数±标准差,不符合者表示为中位数(四分位距);采用Levene检验判断方差齐性,符合正态分布且方差齐同者,组间比较采用方差分析(ANOVA检验);否,则采用Kruskal-Wallis H检验。分类变量表示为例(构成比),组间比较采用Pearson卡方检验、连续校正卡方检验。将具有组间差异的参数纳入二元Logistic回归分析,构建联合预测模型;通过DeLong检验比较不同定量参数及联合模型的受试者工作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线下面积(Area under curve, AUC),评估诊断效能差异。

2 结果

研究对象共67例患者,HER2阳性组18例,HER2阴性组49例,患者均为女性,HER2阳性组:年龄:58.56±10.00岁(39-76岁);肿瘤最大径:2.10cm(1.50cm);绝经状态:是:13例(72.22%)、否:5例(27.78%);淋巴结转移状态:是:12例(66.67%)、否:6例(33.33%);组织学分级:低级别10例(55.56%)、高级别8例(44.44%)。HER2阴性组:年龄:55.45±11.35岁(35-77岁);肿瘤最大径:1.70cm(1.90cm);绝经状态:是:29例(59.18%)、否:20例(40.82%);淋巴结转移状态:是:21例(42.86%)、否:28例(57.14%);组织学分级:低级别31例(63.27%)、高级别18例(36.73%)。

组间比较中,HER2阳性组与HER2阴性组在年龄、肿瘤最大径、月经状态、淋巴结转移、组织学分级的组间比较无明显差异(均P>0.05)(表1)。HER2阳性组的ADC_{fast}值显著高于HER2阴性组(阳性组 vs. 阴性组:6.50×10⁻³mm²/s vs.4.52×10⁻³mm²/s, P=0.004);下列参数HER2阳性组低于HER2阴性组,包括:ADC(阳性组 vs. 阴性组:0.83×10⁻³mm²/s vs.0.95×10⁻³mm²/s, P=0.005)、ADC_{slow}(阳性组 vs. 阴性组:0.61×10⁻³s/mm² vs.0.71×10⁻³mm²/s, P=0.003)、DDC(阳性组 vs. 阴性组:0.89×10⁻³mm²/s vs.1.04×10⁻³mm²/s, P=0.022);ADC_{fraction of fast}(P=0.133)、α(P=0.432)组间比较无明显差异(表2)。ADC_{fast}-ADC_{slow}模型:Y=16.72+1.29×ADC_{fast} 23.23×ADC_{slow}(表3)。

ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、DDC、ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型的AUC分别为75.85%、71.11%、76.92%、71.11%、88.19%。DeLong检验结果显示:ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型诊断效能最高,显著优于ADC_{fast}(P=0.009),与ADC、ADC_{slow}、DDC相仿(均P>0.05);单指数诊断效能组间比较表现相仿(均P>0.05),见图2。

表1 HER2阳性组与阴性组临床及病理特征的比较

	HER2阳性组(18例)	HER2阴性组(49例)	P值
年龄(岁)	58.56±10.00	55.45±11.35	0.173
肿瘤最大径(cm)	2.10(1.50)	1.70(1.90)	0.566
绝经状态(n%)			0.276
是	13(72.22%)	29(59.18%)	
否	5(27.78%)	20(40.82%)	
淋巴结转移(n%)			0.176
是	12(66.67%)	21(42.86%)	
否	6(33.33%)	28(57.14%)	
组织学分级(n%)			0.585
低级别	10(55.56%)	31(63.27%)	
高级别	8(44.44%)	18(36.73%)	

注:n=number=例。

表2 HER2阳性组与阴性组多b值MUSE-DWI参数的比较

	HER2阳性组(18例)	HER2阴性组(49例)	P值
ADC(×10 ⁻³ mm ² /s)	0.83(0.10)	0.95(0.29)	0.005*
ADC _{fast} (×10 ⁻³ mm ² /s)	6.50±3.08	4.52±1.72	0.004#
ADC _{slow} (×10 ⁻³ mm ² /s)	0.61(0.14)	0.71(0.17)	0.003*
ADC _{fraction of fast} (%)	30.00(11.20)	32.70(12.30)	0.133
DDC(×10 ⁻³ mm ² /s)	0.89(0.20)	1.04(0.43)	0.022*
α	0.79±0.07	0.81±0.09	0.432

注:#:ANOVA检验*;Kruskal-Wallis H检验。

表3 定量参数二元Logistic回归结果

	回归系数b值	Wald卡方值	P值	OR值	95%CI
ADC _{fast}	1.29	6.66	0.01	3.64	1.365~9.707
ADC _{slow}	-23.23	4.22	0.04	<0.001	0.001~0.347

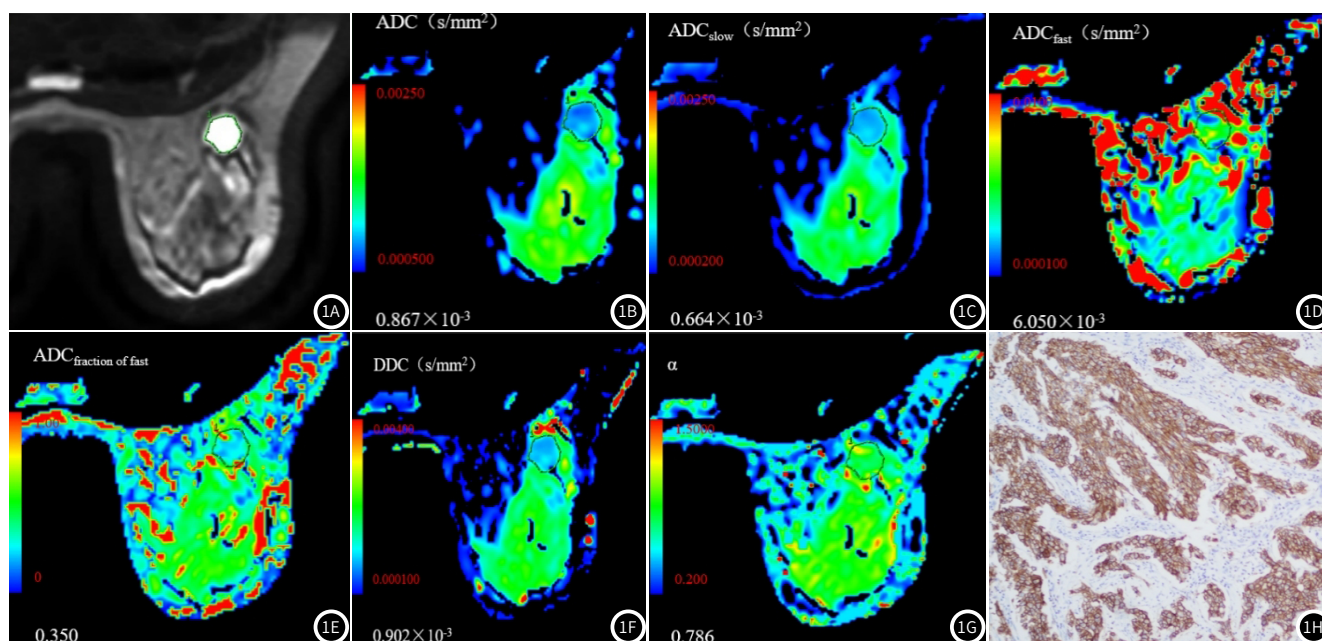


图1A-图1H 浸润性乳腺癌患者MRI及病理图。女，41岁，浸润性乳腺癌HER2阳性。1A图为DWI图像，病灶呈高信号；1B图为ADC ($0.867 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$) 图像，病灶呈低信号；1C-1G图分别为ADC_{slow} ($0.664 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)、ADC_{fast} ($6.050 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)、ADC_{fraction of fast} (0.350)、DDC ($0.902 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)、 α (0.786) 伪彩图，其中1C、1E、1F图病灶偏冷色调，1D、1G图病灶偏暖色调。H图为瘤体组织切片光学显微镜下染色图(EnVision法， $\times 100$)，提示HER2阳性(肿瘤细胞呈金黄色)。

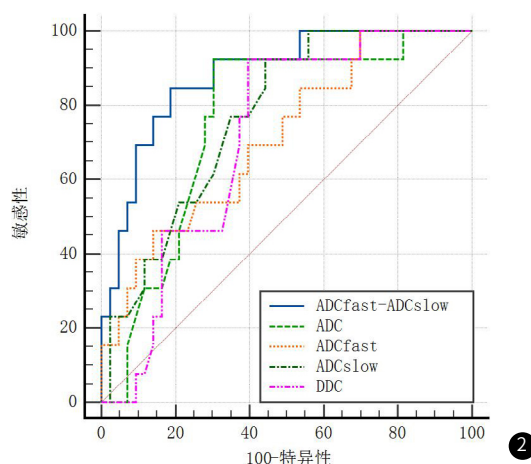


图2 三种模型定量参数对HER2阳性表达预测ROC曲线；ROC曲线显示：ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、DDC、ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型的AUC分别为75.85%、71.11%、76.92%、71.11%、88.19%；DeLong检验结果显示：ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型诊断效能最高，显著优于ADC_{fast} ($P=0.009$)，与ADC、ADC_{slow}、DDC相仿 (均 $P>0.05$)；ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、DDC的诊断效能组间比较表现相仿 (均 $P>0.05$)。

3 讨论

本研究探讨并比较了三种指数模型量参数预测HER2阳性表达的价值。结果显示HER2阳性组的ADC_{fast}值高于HER2阴性组，ADC、ADC_{slow}、DDC值低于阴性组。ADC_{fast}、ADC_{slow}是预测乳腺癌HER2阳性表达的独立预测因素。ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型的诊断效能优于单一量参数。

单指数模型定量参数ADC反映了组织微环境信息，被广泛用于乳腺癌评估^[13]。本研究中，HER2阳性组ADC值低于HER2阴性组，与吕以东^[14]研究一致，但与Horvat、Park^[15-16]研究存在差异，造成结果不同的原因可能是肿瘤组织高度异质性的影响^[17]。HER2调控乳腺癌细胞生长及肿瘤血管生成，HER2阳性肿瘤组

织微循环灌注的增加会使ADC值上升，细胞密度的增加则会降低ADC值，这一矛盾现象导致ADC值可能在不同研究样本中有不同的结论。

双指数模型用于区分组织微循环与微结构信息，共包括三个定量参数：ADC_{fast}反映灌注信息、ADC_{slow}反映真实扩散信息、ADC_{fraction of fast}反映灌注分数。本研究中，乳腺癌HER2阳性组ADC_{fast}值高于HER2阴性组，与刘瑜琳^[18]研究结果一致，病理基础为HER2阳性表达促进血管内皮因子生长^[19]，组织内新生血管增多，微循环灌注增加。乳腺癌HER2阳性组ADC_{slow}值低于HER2阴性组，与余哲歆^[20]研究结果一致。病理基础为HER2阳性表达的肿瘤细胞排列紧密，水分子扩散受限较HER2表达阴性的肿瘤组织明显。本研究中，ADC_{fraction of fast}在HER2阳性组和HER2阴性组间不存在差异。但是，Hande^[21]研究表明，HER2阳性组ADC_{fraction of fast}值高于HER2阴性组，可能由于所选b值不同，本研究中使用最大b值=1800s/mm²，且b值 $\leq 200 \text{ s/mm}^2$ 共有5个，而Hande^[21]研究中使用最大b值=1000s/mm²，且b值 $\leq 200 \text{ s/mm}^2$ 共有13个^[21]，低b值分布更为密集，反映组织内微循环灌注信息更丰富。

拉伸指数模型由Bennett^[22]提出，假设体素内扩散系数是连续分布，包括两个定量参数： α 、DDC。 α (范围0-1)反映体素内水分子扩散的异质性， α 接近0表示体素扩散异质性越高；DDC反映体素内平均扩散率，有研究表明DDC值与ADC值有较高相关性^[23]。拉伸指数模型在乳腺癌HER2阳性表达的研究目前较少。本研究中，HER2阳性组DDC值低于HER2阴性组，可能因为拉伸指数模型更真实地反映组织内水分子扩散情况，HER2阳性表达肿瘤细胞排列密集，水分子扩散受限，表现为更低的DDC值。本研究中， α 值在HER2阳性组与HER2阴性组间不存在差异，可能是因为HER2阳性乳腺癌其他免疫组化标志物水平差异。其中，

HER2阳性乳腺癌根据雌激素受体表达状态分为HER2阳性(激素受体阴性)和HER2阳性(激素受体阳性)乳腺癌^[24], 雌激素受体阳性表达会抑制肿瘤血管增殖、增加细胞密度^[15,25], 不同雌激素受体表达状态的HER2阳性乳腺癌肿瘤组织内水分子扩散异质性不同。同时, 肿瘤微坏死或水肿程度的不同也会导致水分子扩散异质性不同。

不同于既往对乳腺癌良恶性鉴别的研究, 本研究探究并比较了单指数模型、双指数模型、拉伸指数模型的不同定量参数对HER2阳性表达的预测价值。ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、DDC及ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型有助于预测HER2阳性表达状态, 为临床选择治疗方案及预测患者预后提供帮助。

本研究具有一定局限性。首先, 样本量偏小, 计划于后续研究中继续扩大样本量; 其次, 并未进一步区分HER2阴性组中零表达与低表达, 将在后续研究中进一步细分HER2表达状态分组; 第三, 并未讨论乳腺癌其他分子亚型, 将在后续研究中加入讨论。

4 结 论

综上所述, 通过三种指数模型得到的定量参数ADC、ADC_{fast}、ADC_{slow}、DDC对预测HER2阳性表达有诊断价值; 双指数模型定量参数ADC_{fast}-ADC_{slow}联合模型的预测价值优于单一参数。对于HER2阳性患者, 可以根据影像学检查及早选择治疗方案, 改善患者预后。

参考文献

- [1] Siegel RL, Miller KD, Fuchs HE, et al. Cancer statistics, 2022[J]. CA Cancer, 2022; 72 (1): 7-33.
- [2] Li T, Mello-Thoms C, Brennan PC. Descriptive epidemiology of breast cancer in China: incidence, mortality, survival and prevalence[J]. Breast Cancer Res Treat, 2016, 159 (3): 395-406.
- [3] Lopez-Albaitero A, Xu H, Guo H, et al. Overcoming resistance to HER2-targeted therapy with a novel HER2/CD3 bispecific antibody[J]. Oncoimmunology, 2017, 6 (3): e1267891.
- [4] Bhattacharjee A, Rajendra J, Dikshit R, et al. HER2 borderline is a negative prognostic factor for primary malignant breast cancer[J]. Breast Cancer Res Treat, 2020, 181 (1): 225-231.
- [5] 齐艳姝, 傅鉴乾, 黄如意. 曲妥珠单抗联合帕妥珠单抗靶向治疗HER2阳性乳腺癌患者临床疗效研究[J]. 罕少疾病杂志, 2024, 31 (1): 75-76.
- [6] Gradishar WJ, Moran MS, Abraham J, et al. NCCN Guidelines® insights: breast cancer, version 4, 2023[J]. Natl Compr Canc Netw, 2023, 21 (6): 594-608.
- [7] He M, Ruan H, Ma M, et al. Application of diffusion weighted imaging techniques for differentiating benign and malignant breast lesions[J]. Front Oncol, 2021, 11: 694634.
- [8] 高燕, 王培军. 乳腺癌MRI诊断进展[J]. 中国医学影像技术, 2018, 34 (2): 306-309.
- [9] Le Bihan D, Breton E, Lallemand D, et al. MR imaging of intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders[J]. Radiology, 1986, 161 (2): 401-407.

- [10] 袁晓凡, 李海歌, 朱建国, 等. 三种不同指数模型对乳腺良恶性病变鉴别诊断效能的比较: 一项基于多b值MUSE-DWI的研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22 (1): 81-84.
- [11] 《乳腺癌HER2检测指南(2019版)》编写组. 乳腺癌HER2检测指南(2019版)[J]. 中华病理学杂志, 2019, 48 (3): 169-175.
- [12] 中国临床肿瘤学会乳腺癌专家委员会. 人表皮生长因子受体2阳性乳腺癌临床诊疗专家共识(2021版)[J]. 中华医学杂志, 2021, 101 (17): 1226-1231.
- [13] Surov A, Meyer HJ, Wienke A. Can apparent diffusion coefficient (ADC) distinguish breast cancer from benign breast findings? A meta-analysis based on 13847 lesions[J]. BMC Cancer, 2019, 19 (1): 955.
- [14] 吕以东, 陈艳, 牛耀东, 等. HER-2阳性非肿块型乳腺癌患者MRI征象分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18 (4): 75-77.
- [15] Horvat JV, Bernard-Davila B, Helbich TH, et al. Diffusion-weighted imaging (DWI) with apparent diffusion coefficient (ADC) mapping as a quantitative imaging biomarker for prediction of immunohistochemical receptor status, proliferation rate, and molecular subtypes of breast cancer[J]. Magn Reson Imaging, 2019, 50 (3): 836-846.
- [16] Park SH, Choi HY, Hahn SY. Correlations between apparent diffusion coefficient values of invasive ductal carcinoma and pathologic factors on diffusion-weighted MRI at 3.0 Tesla[J]. Magn Reson Imaging, 2015, 41 (1): 175-182.
- [17] 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.
- [18] 刘瑜琳, 章蓉, 卢冬梅, 等. 乳腺癌全肿瘤体素内不相干运动-弥散加权成像(IVIM-DWI)直方图定量参数与ER、PR和HER-2表达的相关性[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37 (3): 380-385.
- [19] Meng N, Wang X, Sun J, et al. A comparative study of the value of amide proton transfer-weighted imaging and diffusion kurtosis imaging in the diagnosis and evaluation of breast cancer[J]. Eur Radiol, 2021, 31 (3): 1707-1717.
- [20] 余哲歆, 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.
- [21] 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 May; 78: 35-41.
- [22] Bennett KM, Schmainda KM, Bennett RT, et al. Characterization of continuously distributed cortical water diffusion rates with a stretched-exponential model[J]. Magn Reson Med, 2003, 50 (4): 727-734.
- [23] Bedair R, Priest AN, Patterson AJ, et al. Assessment of early treatment response to neoadjuvant chemotherapy in breast cancer using non-mono-exponential diffusion models: a feasibility study comparing the baseline and mid-treatment MRI examinations[J]. Eur Radiol, 2017, 27 (7): 2726-2736.
- [24] Wang FH, Zhang XT, Tang L, et al. The Chinese Society of Clinical Oncology (CSCO): Clinical guidelines for the diagnosis and treatment of gastric cancer, 2023[J]. Cancer Commun (Lond), 2024, 44 (1): 127-172.
- [25] 张士朋, 姚立国, 王彦龙, 等. 乳腺癌ER、AR表达与术前MRI征象的相关性分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22 (02): 85-88.

(收稿日期: 2024-05-06)

(校对编辑: 赵望淇)