

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.01.013

# T1 Mapping 联合扩散加权成像构建多模态预测模型在乳腺肿块良恶性鉴别中的应用研究

吴小敏, 赖燕琴, 廖雪燕, 罗珊, 林丹丹  
(龙岩市第一医院 放射科, 福建龙岩 364000)

**【摘要】目的** 评估 T1 Mapping 联合扩散加权成像 (diffusion-weighted imaging, DWI) 在乳腺肿块良恶性鉴别中的诊断价值, 并分析其与 Ki-67 表达的相关性。**方法** 回顾性纳入 96 例经病理证实的乳腺肿块患者, 比较 T1 值、T1+值、 $\Delta T1\%$ 、T2 值及表观弥散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC) 的差异, 采用 Logistic 回归构建联合模型并受试者操作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线分析, 同时评估 MRI 参数与 Ki-67 的 Spearman 相关性。**结果** 恶性肿块 T1 值、T1+值及  $\Delta T1\%$  均显著高于良性肿块, ADC 显著低于良性 (均  $P < 0.05$ )。多因素分析显示  $\Delta T1\%$  与 ADC 为独立预测因子。联合模型的曲线下面积 (area under the curve, AUC) 为 0.941, 优于各单项 MRI 定量指标。Ki-67 高表达组  $\Delta T1\%$  升高、ADC 降低 (均  $P < 0.05$ ), 且  $\Delta T1\%$  与 Ki-67 呈正相关 ( $r = 0.462$ ), ADC 与 Ki-67 呈负相关 ( $r = -0.518$ )。**结论** T1 Mapping 联合 DWI 可显著提高乳腺肿块良恶性的鉴别效能,  $\Delta T1\%$  与 ADC 具有重要的诊断价值, 并可反映肿瘤的增殖活性。

**【关键词】** T1 Mapping; 扩散加权成像; 乳腺肿块; 表观弥散系数; Ki-67

**【中图分类号】** R737.9; R445.2

**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2026) 01-0063-06

## Application of a multimodal predictive model based on T1 Mapping combined with diffusion-weighted imaging for differentiating benign and malignant breast masses

WU Xiaomin, LAI Yanqin, LIAO Xueyan, LUO Shan, LIN Dandan

(Department of Radiology, The First Hospital of Longyan City, Longyan 364000, Fujian, China)

**【Abstract】Objective** To evaluate the diagnostic value of T1 Mapping combined with diffusion-weighted imaging (DWI) in differentiating benign and malignant breast masses, and to analyze its correlation with Ki-67 expression. **Methods** A total of 96 patients with pathologically confirmed breast masses were retrospectively enrolled. The differences in T1 value, post-contrast T1 (T1+) value, percentage change of T1 ( $\Delta T1\%$ ), T2 value and apparent diffusion coefficient (ADC) were compared between benign and malignant masses. Logistic regression analysis was used to construct a combined diagnostic model, followed by receiver operating characteristic (ROC) curve analysis. Meanwhile, the Spearman correlation between MRI quantitative parameters and Ki-67 expression was evaluated. **Results** The T1 value, T1+ value and  $\Delta T1\%$  of malignant masses were significantly higher than those of benign masses, while the ADC was significantly lower (all  $P < 0.05$ ). Multivariate analysis showed that  $\Delta T1\%$  and ADC were independent predictors for malignant breast masses. The area under the curve (AUC) of the combined model was 0.941, which was superior to all individual MRI quantitative parameters. In the high Ki-67 expression group,  $\Delta T1\%$  was increased and ADC was decreased (both  $P < 0.05$ ). Moreover,  $\Delta T1\%$  was positively correlated with Ki-67 ( $r = 0.462$ ), and ADC was negatively correlated with Ki-67 ( $r = -0.518$ ). **Conclusion** T1 Mapping combined with DWI can significantly improve the diagnostic efficiency in differentiating benign and malignant breast masses.  $\Delta T1\%$  and ADC have important diagnostic value and can reflect the proliferative activity of breast tumors.

**【Key words】** T1 Mapping; Diffusion-weighted imaging; Breast mass; Apparent diffusion coefficient; Ki-67

乳腺癌是全球女性发病率最高的恶性肿瘤之一, 分型的需求愈加迫切<sup>[1]</sup>。磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 凭借高软组织分辨率与多

收稿日期: 2025-08-21。

基金项目: 福建省自然科学基金计划项目 (2023J011880)。

作者简介: 吴小敏, 主治医师, 研究方向: CT、MR 影像诊断。邮箱: m19942754796@163.com。

通讯作者: 林丹丹, 主治医师, 研究方向: CT、MR 影像诊断。邮箱: ldd1232025@126.com。

参数成像能力,已成为评估乳腺肿块的重要工具。然而,现行基于乳腺影像报告和数据库系统(breast imaging reporting and data system, BI-RADS)的影像解读仍依赖主观判断,形态学与动态增强特征在部分良恶性病灶间存在重叠<sup>[2]</sup>。扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)及其表现弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)可提供乳腺肿块组织水分子扩散的客观信息。恶性肿瘤通常因细胞排列致密而呈现ADC降低的特征,但不同研究中ADC阈值不一致,敏感性与特异性波动明显,因此单一参数难以实现稳定的鉴别效果<sup>[3]</sup>。

近年来, DWI与T2 Mapping等弛豫时间定量技术逐渐应用于多系统疾病研究。弛豫时间作为组织的固有属性,可客观反映水含量、细胞结构与微环境变化,不受扫描条件的影响<sup>[4]</sup>。乳腺癌的高度异质性使其生物学行为差异显著,其中Ki-67作为评估细胞增殖能力的重要标志物,与患者预后及分子分型密切相关。既往研究提示Ki-67高表达往往伴随ADC降低,但其与T1/T2 Mapping的关系鲜有系统探讨<sup>[5]</sup>。

本研究系统分析T1 Mapping联合DWI在乳腺肿块良恶性诊断中的效能差异,探索多参数协同是否能提升MRI的客观性与准确性,并进一步评估MRI定量参数与Ki-67的相关性,构建面向乳腺癌术前分型的潜在预测模型。本研究有望为乳腺肿瘤的影像学诊断提供标准化、可量化及可推广的技术路径。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

本研究采用回顾性研究设计,连续纳入2023年3月至2024年3月于龙岩市第一医院接受乳腺MRI检查且术后/穿刺后获得明确病理结果的乳腺肿块患者。所有受试者均完成T1 Mapping与DWI序列的标准化扫描流程,影像质量满足后处理要求。本研究已获得医院伦理委员会审核批准。

纳入标准:①经影像学检查提示乳腺肿块,且行穿刺或手术病理检查者;②术前或穿刺前完成完整的乳腺MRI检查(含T1 Mapping与DWI);③病灶边界清晰、影像质量可用于定量分析;④MRI与病理取材时间间隔 $\leq 14$  d,且期间未接受任何治疗。

排除标准:①影像中存在明显运动伪影或增强阶段不完整,无法进行感兴趣区(region of interest, ROI)测量者;②MRI检查与手术/穿刺活检期间接受放疗、化疗或激素治疗者;③既往有乳腺手术史、乳腺植入物等影响成像判读者;④病灶最大径过小( $\leq 5$  mm),无法准确勾画ROI者,或病理结果不明确或缺失Ki-67检测指标者。

### 1.2 扫描序列及技术参数

(1)常规平扫序列。①横断位T1加权成像(T1-weighted imaging, T1WI): TR 6 ms, TE 2.46 ms, 层厚 1.6 mm, 间距 0.32 mm, 扫描视野(field of view, FOV) 360 mm $\times$ 360 mm, 矩阵 448 $\times$ 448。②横断位脂肪抑制T2加权成像(fat suppression T2-weighted imaging, FS-T2WI): TR 4000 ms, TE 54 ms, 层厚 4 mm, 间距 0.8 mm, FOV 340 mm $\times$ 340 mm, 矩阵 384 $\times$ 384。

(2)DWI:采用单次激励自旋回波平面回波成像(spin echo-echo planar imaging, SE-EPI)序列, b值设为0和800 s/mm<sup>2</sup>。TR 7400 ms, TE 42 ms, 层厚 5 mm, 间距 0.1 mm, FOV 380 mm $\times$ 306 mm, 矩阵 192 $\times$ 192。系统自动生成ADC图,用于反映水分子扩散受限情况,为乳腺肿块良恶性辨别提供基础定量参数。使用钆贝葡胺,剂量0.2 ml/kg,以2.5 ml/s注射,后接生理盐水同速冲管。动态对比增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging, DCE-MRI)序列参数:TR 3.89 ms, TE 2.46 ms, 层厚 3 mm, 间距 0.6 mm, FOV 400 mm $\times$ 325 mm, 矩阵 256 $\times$ 256, 翻转角 80°, 总扫描时间约5 min。

(3)T1 Mapping:分别在增强前与增强后5分钟采集。参数:TR 4.95 ms, TE 1.75 ms, 层厚 2 mm, 间距 0.4 mm, FOV 300 mm $\times$ 244 mm, 矩阵 256 $\times$ 256, 翻转角 2°, 扫描时间约2 min 18 s。

(4)T2 Mapping:采用多回波序列, TR 1890 ms, TE分别为10.5、21、31.5、42、52.5、63 ms;层厚 4 mm, 间距 0.8 mm, FOV 280 mm $\times$ 280 mm, 矩阵 256 $\times$ 256, 回波链数 6, 总扫描时间约5 min 32 s。

### 1.3 ROI勾画策略与病灶定位

①整体ROI(肿瘤层面, tumor),沿肿瘤外缘逐

层手动勾画整个病灶范围,去除病灶头尾端薄层组织及坏死、囊变、出血区域,尽可能保留具有代表性的实性成分;②最大层面 ROI (病灶最大截面, max),在病灶最大层面选取最能代表肿瘤组织密度及形态的截面,采用轮廓勾画方式获得 ROI;③强化最显著区域 ROI (局部强化区, local),参考 DCE 增强序列,选择肿瘤强化最明显的区域,于 T1/T2 Mapping 及 ADC 图相应位置勾画小尺寸 ROI (0.5~2.5 cm<sup>2</sup>)。

定量参数测量与数据提取:依据三种 ROI,分别在 T1 Mapping、T2 Mapping 及 ADC 图中测量对应的定量参数,包括:①T1 值(增强前):病灶原始纵向弛豫时间,反映肿瘤细胞结构与间质变化;②T1+值(增强后 5 min):间接反映对比剂分布及组织灌注情况;③ $\Delta T1\% = (T1+值 - T1 值) / T1 值 \times 100\%$ ,用于评估增强前后组织弛豫的差异,更能反映肿瘤血供与细胞外间隙的变化;④T2 值:反映病灶组织的含水量及组织结构复杂度,是评估肿瘤异质性的关键指标;⑤ADC:由 b 值为 0 和 800 s/mm<sup>2</sup> 的 DWI 序列自动计算获得,定量反映水分子的扩散受限情况。每个 ROI 均测量 3 次,取平均值作为最终结果,以减少单次测量中的操作误差。

#### 1.4 组织病理学与 Ki-67 检测

所有受试者的乳腺病灶均通过手术切除或粗针穿刺活检获取病变组织标本,并以病理学结果作为良恶性诊断的最终金标准。Ki-67 表达水平的评估选取增殖最活跃的热点区域,在高倍显微镜视野下计数至少 500 个肿瘤细胞,计算 Ki-67 阳性细胞百分比。本研究以 20% 作为 Ki-67 高低表达的临界值,将 Ki-67 < 20% 定义为低表达, Ki-67  $\geq$  20% 定义为高表达,以提高不同病例间结果比较的一致性与可重复性。

#### 1.5 统计学方法

本研究所有数据均采用 SPSS 23.0 及 R 软件进行数据统计分析。连续变量首先经 Shapiro-Wilk 检验判断分布类型,正态分布资料以均数  $\pm$  标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示,组间比较采用独立样本 *t* 检验;非正态分布资料以中位数(四分位间距)表示,采用 Mann-Whitney *U* 检验或 Kruskal-Wallis 检验进行分析。分类变量以频数和百分比描述,采用  $\chi^2$  检验或连续校正  $\chi^2$  检验进行组间比较。为明确各 MRI 定

量参数在乳腺肿块良恶性鉴别中的作用,首先进行单因素 Logistic 回归分析,筛选出具有统计学意义的指标,再将候选变量纳入多因素 Logistic 回归模型,计算比值比(odds ratio, OR)及其 95% 置信区间(95% confidence interval, 95% CI),构建联合诊断模型,并以回归系数为基础绘制列线图,实现预测结果的可视化。模型的诊断效能通过受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线进行评估,计算曲线下面积(area under the curve, AUC)、敏感度、特异度和最佳阈值,并采用 DeLong 检验比较不同模型之间 AUC 的差异。采用 Bootstrap 重抽样法对模型进行内部验证,评估其稳健性;并采用 Hosmer-Lemeshow 检验和校准曲线评价拟合度与一致性,同时利用决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评估模型的临床应用价值。此外,采用 Spearman 秩相关分析探索 MRI 定量参数与 Ki-67 表达水平之间的相关性,以判断其预测肿瘤增殖活性及生物学行为的应用潜力。本研究所有统计检验均采用双侧检验,  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 基线资料

两组患者年龄、体质指数(body mass index, BMI)、月经状态(绝经/未绝经)等基线资料比较,差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ ),具有可比性(表 1)。

表 1 2 组患者基线资料比较(例,  $\bar{x} \pm s$ )

指标	良性组 ( <i>n</i> =42)	恶性组 ( <i>n</i> =54)	<i>t</i> / $\chi^2$	<i>P</i>
年龄(岁)	46.12 $\pm$ 8.25	47.83 $\pm$ 9.14	0.958	0.341
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	23.42 $\pm$ 2.11	23.96 $\pm$ 2.38	1.096	0.276
月经状态(绝经/未绝经)	11/31	18/36	0.266	0.606
病灶侧别(左/右)	20/22	27/27	0.043	0.836
乳腺密度(A-B/C-D型)	18/24	20/34	0.633	0.426
BI-RADS(3/4/5类)	10/26/6	3/31/20	4.637	0.099
病灶最大径(cm)	1.92 $\pm$ 0.63	2.05 $\pm$ 0.71	0.948	0.346
Ki-67 高表达( $\geq 20\%$ ) <sup>*</sup>	—	38(70.4%)	—	—

注: BMI 为体质指数; BI-RADS 为乳腺影像报告和信息系统; <sup>\*</sup>Ki-67 仅适用于恶性病灶,不作良恶性比较。

### 2.2 MRI 定量参数在良恶性病灶间的差异

2 组患者的 T1 值、T1+值、 $\Delta T1\%$  及 ADC 比较差异均具有统计学意义(均  $P < 0.05$ ); 恶性组 T2 值较良性组虽呈下降趋势,但差异无统计学意义( $P > 0.05$ )(表 2、图 1)。

表 2 良恶性乳腺肿块 MRI 定量参数比较 (  $\bar{x} \pm s$  )

组别	T1 (ms)	T1+ (ms)	$\Delta T1\%$ (%)	T2 (ms)	ADC ( $\times 10^{-3}$ mm <sup>2</sup> /s )
良性组 (n=42)	1028.36 ± 122.14	812.57 ± 95.14	20.45 ± 6.12	72.14 ± 9.63	1.42 ± 0.18
恶性组 (n=54)	1186.42 ± 135.83	923.64 ± 110.52	29.38 ± 7.85	68.02 ± 10.41	1.05 ± 0.15
t	5.429	5.035	6.136	1.891	11.236
P	<0.001	<0.001	<0.001	0.061	<0.001

注: ROI 为感兴趣区; ADC 为表观弥散系数; 在最大层面 ROI 与强化最显著区域 ROI 的测量中, 各定量指标的差异趋势与整体 ROI 基本一致。尤其是 ADC 在不同 ROI 下均表现出稳定的诊断能力, 而  $\Delta T1\%$  在局部强化区域的区分度最为明显, 提示其对反映肿瘤的血供状态及间质变化具有更高的敏感性。

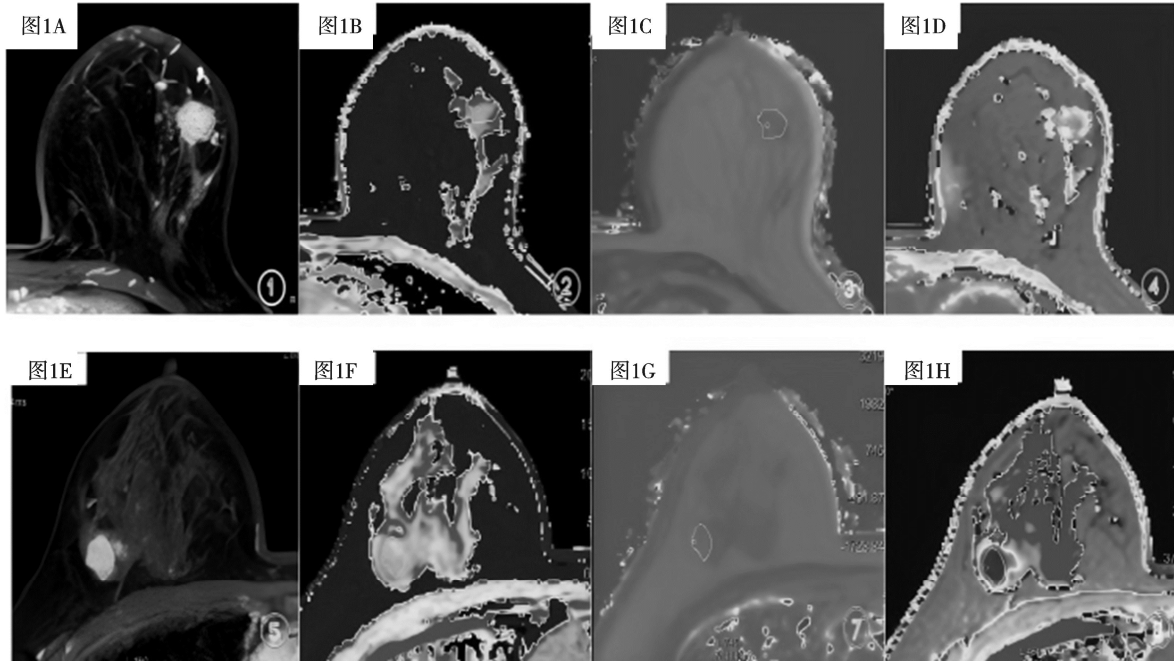


图 1 典型病例影像图

注: 图 1 A—D 为多参数组合模型在乳腺良性肿块预测中的应用, 其中 A 为增强 T1WI 图, B 为 T1 弛豫图, C 为 T2 弛豫图, D 为 T1 增强弛豫图。最终病理诊断为纤维腺瘤。图 1 E—F 为多参数组合模型在乳腺恶性疾病预测中的应用, 其中 E 为增强 T1WI 图, F 为 T1 弛豫图, G 为 T2 弛豫图, H 为 T1 增强弛豫图, 最终病理诊断为非特殊型浸润性乳腺癌。

### 2.3 MRI 定量参数的 Logistic 回归分析

单因素 Logistic 回归分析结果显示, T1 值、T1+ 值、 $\Delta T1\%$  与 ADC 均与乳腺肿块的恶性风险显著相关 (均  $P < 0.05$ ), 其中 ADC 为负向关联因素, 而 T2 值与乳腺肿块的恶性风险无显著相关性 ( $P > 0.05$ ) (表 3)。

表 3 MRI 定量参数的单因素 Logistic 回归分析结果 (n=96)

变量	OR	95%CI	P
T1 (ms)	1.008	1.004~1.013	0.001
T1+ (ms)	1.01	1.005~1.016	<0.001
$\Delta T1\%$ (%)	1.212	1.130~1.301	<0.001
T2 (ms)	0.974	0.945~1.004	0.087
ADC ( $\times 10^{-3}$ mm <sup>2</sup> /s )	0.012	0.002~0.063	<0.001

注: OR 为比值比; 95%CI 为 95%置信区间; ADC 为表观弥散系数。

多因素 Logistic 回归分析结果显示,  $\Delta T1\%$  及 ADC 均是乳腺肿块恶性的独立预测因子 ( $P < 0.05$ )。

T1 值与 T1+ 值在多因素模型中均无统计学意义 (均  $P > 0.05$ )。最终构建的联合诊断模型由  $\Delta T1\%$  及 ADC 共同构成, 其回归方程如下:  $\text{Logit}(P) = -7.842 + 2.901 \times (\Delta T1\%) - 3.492 \times (\text{ADC})$  (表 4)。

表 4 MRI 定量参数的多因素 Logistic 回归分析结果 (n=96)

变量	OR	95%CI	P
$\Delta T1\%$ (%)	1.148	1.068~1.234	<0.001
ADC ( $\times 10^{-3}$ mm <sup>2</sup> /s )	0.031	0.005~0.182	<0.001
T1 (ms)	1.003	0.998~1.008	0.188
T1+ (ms)	1.004	0.998~1.009	0.142

注: OR 为比值比; 95%CI 为 95%置信区间; ADC 为表观弥散系数。

### 2.4 MRI 参数及联合模型的 ROC 诊断效能比较

将 ADC 与  $\Delta T1\%$  整合后, 所构建联合模型的 AUC 为 0.941, 显著优于各单一 MRI 定量参数。经 DeLong 检验显示, 联合诊断模型的 AUC 显著高于单

独的 ADC ( $P=0.034$ ) 及  $\Delta T1\%$  ( $P=0.015$ ) (表 5)。

表 5 各 MRI 参数及联合模型的 ROC 诊断效能比较 ( $n=96$ )

指标	AUC	95%CI	敏感度 (%)	特异度 (%)	最佳阈值
T1 (ms)	0.726	0.627~0.812	68.5	66.7	1120
T1+ (ms)	0.743	0.645~0.826	70.4	64.3	880
$\Delta T1\%$ (%)	0.851	0.771~0.916	79.6	76.2	25.5
T2 (ms)	0.601	0.493~0.705	55.6	57.1	69
ADC ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ )	0.892	0.819~0.944	83.3	83.3	1.18
联合模型 ( $\Delta T1\% + \text{ADC}$ )	0.941	0.885~0.976	87	88.1	依据回归模型

注: MRI 为磁共振成像; ROC 为受试者操作特征; AUC 为曲线下面积; 95%CI 为 95%置信区间; ADC 为表观弥散系数。

### 2.5 MRI 定量参数与 Ki-67 表达水平的相关性分析

根据 Ki-67 20%临界值将恶性病灶分为 Ki-67 高、低表达组后, 比较两组 MRI 定量参数发现,  $\Delta T1\%$  与 ADC 在高、低表达组间的差异最为显著。T1 值与 T1+ 值在两组间虽存在统计学差异但区分度较弱, 而 T2 值在两组间的差异无统计学意义。进一

步 Spearman 相关分析显示,  $\Delta T1\%$  与 Ki-67 表达水平呈中度正相关, ADC 与 Ki-67 表达水平呈中度负相关, 其余参数与 Ki-67 表达水平的相关性较弱(表 6, 表 7, 图 2)。

表 6 不同 Ki-67 表达组乳腺恶性病灶 MRI 定量参数比较 ( $n=54, \bar{x} \pm s$ )

指标	Ki-67 < 20% ( $n=16$ )	Ki-67 $\geq$ 20% ( $n=38$ )	$t$	$P$
T1 (ms)	1125.4 $\pm$ 120.8	1198.3 $\pm$ 133.6	-2.103	0.041
T1+ (ms)	887.6 $\pm$ 95.3	932.4 $\pm$ 110.5	-2.019	0.049
$\Delta T1\%$ (%)	23.14 $\pm$ 6.25	31.82 $\pm$ 7.34	-4.590	<0.001
T2 (ms)	69.84 $\pm$ 10.12	66.25 $\pm$ 10.52	1.260	0.216
ADC ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ )	1.18 $\pm$ 0.13	0.98 $\pm$ 0.14	4.795	<0.001

注: MRI 为磁共振成像; ADC 为表观弥散系数。

表 7 MRI 定量参数与 Ki-67 表达水平的 Spearman 秩相关分析 ( $n=54$ )

指标	$r$	$P$
T1 (ms)	0.241	0.032
T1+ (ms)	0.226	0.041
$\Delta T1\%$ (%)	0.462	<0.001
T2 (ms)	-0.114	0.326
ADC ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ )	-0.518	<0.001

注: MRI 为磁共振成像; ADC 为表观弥散系数。

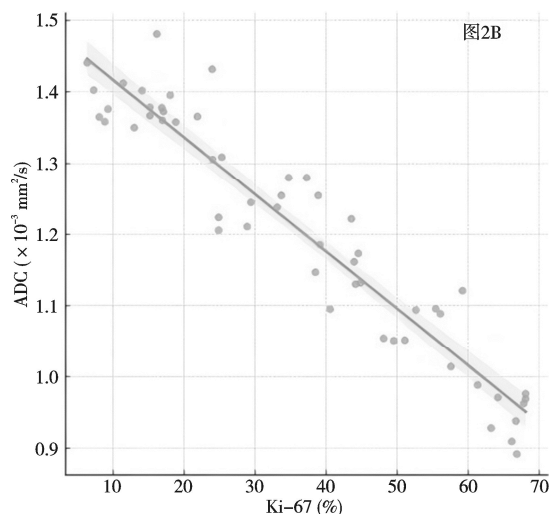
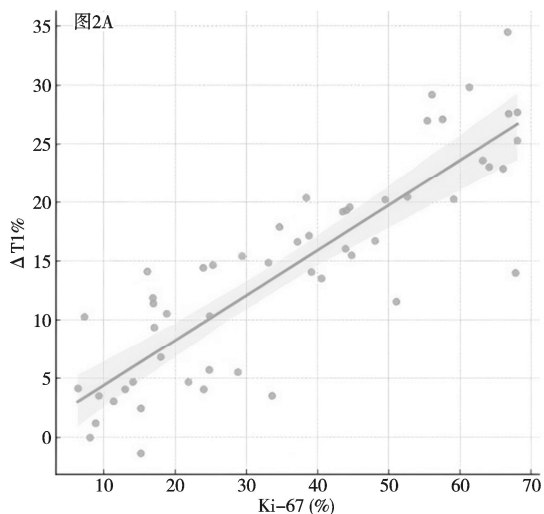


图 2 MRI 定量参数与 Ki-67 表达的相关性散点图

注: ADC 为表观弥散系数; 图 2A 为  $\Delta T1\%$  与 Ki-67 表达水平的相关性散点图, 图 2B 为 ADC 与 Ki-67 表达水平的相关性散点图。

### 3 讨论

T1 Mapping 能精确记录病灶组织在不同状态下的纵向弛豫时间, 对肿瘤内部水含量、细胞外间隙及对比剂动力学变化具有高度敏感性<sup>[6]</sup>; 而 DWI 通过 ADC 反映水分子扩散受限程度, 能够揭示细胞密度增高、腺体结构紊乱等恶性肿瘤的病理特征<sup>[7]</sup>。将不同 MRI 定量技术联合应用, 可从不同维度互补病灶信息, 从而提升乳腺肿块良恶性鉴别的整体准

确性。

本研究结果表明, T1 值、T1+ 值、 $\Delta T1\%$ 、ADC 等定量参数在良恶性肿块间呈现出明确的方向性差异, 其中  $\Delta T1\%$  与 ADC 在多因素模型中具有独立诊断价值, 联合模型的 AUC 为 0.941, 显著优于任一单一 MRI 定量参数。此外,  $\Delta T1\%$  与 ADC 与 Ki-67 表达水平均存在中度相关性, 提示这两项 MRI 定量参数能够在一定程度上反映乳腺恶性肿瘤的细胞增

殖活性。在良、恶性肿瘤的基础定量参数比较中,恶性肿瘤的 T1 值、T1+值及 $\Delta T1\%$ 均显著高于良性肿块,而 ADC 值显著低于良性肿块。乳腺恶性病灶通常伴随细胞密度增高、间质结构紊乱和血管生成旺盛,导致水分子扩散受限程度显著增加,因而 ADC 显著降低;同时恶性病灶血管通透性较高,对比剂分布快速且广泛,使增强后 T1 弛豫时间变化幅度增大,这也解释了 $\Delta T1\%$ 在本研究中具有良好诊断效能的原因。T2 值在本研究与乳腺肿块良恶性鉴别无统计学关联,可能与良、恶性肿瘤中不同病理成分的 T2 值高度重叠有关,也与现有研究中 T2 值在乳腺肿块诊断中价值有限的结论一致。在多因素模型分析中, $\Delta T1\%$ 与 ADC 为独立预测因素,两者联合构建的 Logistic 模型获得最高的诊断效能, AUC 为 0.941,并在敏感性与特异性上亦取得平衡。与单一参数相比,联合模型充分利用了 DWI 反映的组织微观扩散受限特征与 T1 Mapping 捕捉的病灶弛豫动力学变化,体现形态结构信息与功能代谢信息的互补优势,使良恶性鉴别结果更具可靠性。该结果进一步佐证了多参数 MRI 的综合价值,也与近年开展的乳腺定量 MRI 研究趋势一致<sup>[8]</sup>。 $\Delta T1\%$ 与 ADC 均与 Ki-67 表达水平显著相关,提示定量 MRI 可在一定程度上反映乳腺恶性肿瘤的细胞增殖水平。Ki-67 是乳腺癌重要的预后与分子分型指标,本研究中 $\Delta T1\%$ 随 Ki-67 表达水平升高呈上升趋势,而 ADC 随 Ki-67 表达水平升高呈下降趋势,该现象的生物学机制与与肿瘤细胞密度、间质成分及肿瘤微环境改变密切相关。

综上所述,本研究证实 T1 Mapping 联合 DWI 在乳腺肿块良恶性鉴别中具有较高的临床诊断价值,其中 $\Delta T1\%$ 与 ADC 是最具潜力的定量生物学标志物,联合模型的诊断效能远优于单一 MRI 定量参数。本研究中的定量 MRI 参数与 Ki-67 表达水平具有关联性,提示其在乳腺恶性肿瘤的无创增殖活性分级与生物学行为评估中具有有良好的临床应用前景。随着 MRI 技术与分析方法的发展,多参数 MRI 有望在乳腺癌个体化精准诊疗中发挥重要临床价值。

#### 参考文献

- [1] 张涛,周鹏,王俊,等.基于双序列的可解释性机器学习模型术前预测浸润性乳腺癌 luminal 和非 luminal 分型的价值[J].磁共振成像,2025,16(11):114-122.
- [2] 李慧,丁玉双,刘菲菲,等.双模态弹性成像联合 BI-RADS 分类构建列线图诊断乳腺肿块良恶性[J].中国超声医学杂志,2025,41(11):1224-1228.
- [3] 冯亚芬,张俊丽,邵山峰,等.MRI-DWI 参数 ADC 及血清 Sirtuin1 水平与 AIS 患者病情严重程度的相关性及其联合检测对患者预后不良的预测价值[J].航空航天医学杂志,2025,36(9):1031-1034.
- [4] 张倩倩,刘珂,赵丹蕾,等.磁共振多翻转角 T1mapping 结合血清 CCNA2 和 GP73 诊断肝癌的影像学特征分析[J].中西医结合肝病杂志,2025,35(8):1003-1007.
- [5] 陈耿标,刘映芬,李海刚,等.不同克隆号 Ki-67 对乳腺癌免疫组化染色的性能分析[J].岭南急诊医学杂志,2024,29(5):532-534.
- [6] 洪琴,肖勇,符益纲,等.B1 场校正 T1mapping 可作为肺结节良恶性诊断及病理分型的有效影像学检查方法[J].分子影像学杂志,2024,47(7):741-745.
- [7] 张武花,谢春,杨永汉,等.DWI 不同 b 值下 ADC 值对乳腺病变良恶性的鉴别诊断价值[J].河南外科学杂志,2025,31(3):30-32.
- [8] 刘磊,徐慧慧,王佳,等.乳腺 MRI 检查 DWI、DCE-MRI 定量参数与乳腺癌分子亚型及 Ki-67 表达的关系[J].河北医科大学学报,2024,45(7):779-784.