



· 综述 ·

# T1 mapping技术在肿瘤性病变中的应用研究进展

陈一杰<sup>1</sup>, 郭季春<sup>1</sup>, 孙俊旗<sup>1, 2</sup>

1. 广东医科大学第一临床医学院, 广东 湛江 524002 ;

2. 粤北人民医院放射科, 广东 韶关 512000

[摘要] T1 mapping技术是一种定量磁共振成像技术, 随着该技术的发展, 实现T1 mapping技术的方法不断更新, 从传统的T1 mapping技术到一次扫描即可获得多个参数的合成磁共振成像, 每种方法也各有其优缺点。目前, 该技术被广泛应用于头颈、胸部、乳腺、肝脏、宫颈及直肠等部位肿瘤性病变的研究中。本文主要就T1 mapping技术在各系统肿瘤性病变的诊断、鉴别诊断及预后评估等方面的应用研究进展进行综述。

[关键词] T1 mapping; 定量磁共振成像; 肿瘤; 研究进展; 弛豫时间

中图分类号: R73; R445.2 文献标志码: A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2025.02.010

**Research progress in the application of T1 mapping technology in tumor lesions** CHEN Yijie<sup>1</sup>, GUO Jichun<sup>1</sup>, SUN Junqi<sup>1, 2</sup> (1. The First Clinical Medical College, Guangdong Medical University, Zhanjiang 524002, Guangdong Province, China; 2. Department of Radiology, Yuebei People's Hospital, Shaoguan 512000, Guangdong Province, China)

Correspondence to: SUN Junqi E-mail: sunjunqi1233668@sina.com

[Abstract] T1 mapping technology is a quantitative magnetic resonance imaging technique. With the development of this technology, methods for achieving T1 mapping have continually evolved, from traditional T1 mapping techniques to synthetic magnetic resonance imaging that can obtain multiple parameters in once scan. Each method has its own advantages and disadvantages. At present, this technology is widely used in the research of tumor lesions in various regions, including head and neck, chest, breast, liver, cervix, and rectum. This article primarily provided a review of the application of T1 mapping technology in the diagnosis, differential diagnosis, and prognosis evaluation of tumor lesions across different organ systems.

[Key words] T1 mapping; Quantitative magnetic resonance imaging; Tumor; Research progress; Relaxation time

随着磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术的发展, MRI已从传统的解剖成像逐步转向功能成像, 通过病变内部的分子改变评估疾病种类。MRI信号受扫描仪、序列类型、线圈灵敏度及磁场均匀性等因素影响<sup>[1-3]</sup>, 诊断结果与医师的知识储备、诊断经验密切相关。近年来, 已经出现了各种MRI定量序列的研究方法, T1 mapping技术成为研究热点之一, 从心肌病变中的应用逐渐拓展到肿瘤领域。该技术通过定量评估组织信号, 提供比传统成像

更为客观的诊断信息。本文将结合国内外文献对T1 mapping技术与肿瘤性病变相关研究进行综述, 旨在为肿瘤的鉴别诊断、治疗、预后预测等提供新的研究思路。

## 1 T1 mapping技术的原理、优缺点

T1 mapping是高分辨率的纵向弛豫时间定量成像技术, 可以直接定量测量组织内T1值。其原理是在特殊序列作用下, 使用沿纵向轴磁化恢复程度不同的多幅原始图像, 计算视野内每个体素的质子自旋晶格弛豫时间生成T1图。

基金项目: 无。

利益冲突: 作者声明无利益冲突。

伦理批件: 不需要。

知情同意: 不需要。

引用本文: 陈一杰, 郭季春, 孙俊旗. T1 mapping技术在肿瘤性病变中的研究进展 [J]. 肿瘤影像学, 34(2): 183-190.

Funding: no.

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: not required.

Informed consent: not required.

Cite this article: CHEN Y J, GUO J C, SUN J Q. Research progress in the application of T1 mapping technology in tumor lesions [J]. Oncoradiology, 34(2): 183-190.

常用实现T1 mapping的方法包括Look-Locker技术、变量翻转角 (variable flip angle, VFA) 技术、合成磁共振成像 (synthetic magnetic resonance imaging, SyMRI) 技术和磁共振指纹 (magnetic resonance fingerprinting, MRF) 技术。Look-Locker技术基于反转恢复序列, 通过多次图像采集生成弛豫恢复曲线, 计算T1值, 具有较高的稳定性 (偏差 $<5\%$ ), 但空间分辨率较低且采集时间长。VFA技术通过不同翻转角获取T1图, 具有空间分辨率较高和单次屏气完成的优势, 但易受B1场不均匀性和容积效应影响。SyMRI利用多回波信号, 通过涡轮自旋回波量化弛豫时间, 能快速获得包括T1、T2等多种定量图像, 具有良好的可重复性, 但在T2液体衰减反转恢复序列图像上存在伪影干扰。MRF通过快速脉冲序列和欠采样采集数据, 主要分为数据收集、字典生成和模式识别3个部分, 能同时定量多种参数如T1、T2、质子密度 (proton density, PD) 等, 但技术复杂、硬件要求高, 标准化和验证尚需完善。

## 2 T1 mapping技术在头颈部肿瘤中的应用

### 2.1 脑部胶质瘤应用

脑胶质瘤是中枢神经系统常见的原发肿瘤, 既往研究<sup>[4-5]</sup>表明, T1值与胶质瘤病理学分级相关。徐蕊等<sup>[6]</sup>回顾性纳入117例经病理学检查证实的脑胶质瘤, 采用快速多对比度磁共振定量成像技术 (magnetic resonance image complication, Magic) 扫描, 发现T1值对于区分高、低级别胶质瘤差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 曲线下面积 (area under curve, AUC) 为0.731, 高级别胶质瘤组T1值显著高于低级别组, 提示T1值与肿瘤细胞增殖有关, 在临床上对于肿瘤的生物行为判断、治疗方案制订以及预后预测至关重要。

异柠檬酸脱氢酶 (isocitrate dehydrogenase, IDH) 是三羧酸循环中的一种关键酶, 突变IDH蛋白与肿瘤发生有关, IDH突变型星形细胞瘤 (IDH-m) 的预后优于IDH野生型胶质母细胞瘤 (IDH-w)。研究<sup>[6-7]</sup>表明, T1值与IDH状态相关, Ge等<sup>[7]</sup>采用SyMRI技术的多动态多回波序

列扫描, 前瞻性分析80例胶质瘤患者, 提取全肿瘤直方图信息, IDH-m相对于IDH-w显示出较低T1值及更高的增强后T1值, logistic回归分析示T1第10百分位数 (T1-10th)、增强后T1第10百分位数 (cT1-10th) 及年龄是独立危险因素, 联合模型 (T1-10th+cT1-10th+年龄) 的诊断性能最优, AUC为0.872, T1直方图模型可以作为判断胶质瘤IDH状态的工具, 准确评估胶质瘤患者IDH状态对制订治疗计划至关重要。

胶质瘤增强部分的切除范围与患者生存时间相关, 浸润细胞扩散程度往往超过了肿瘤增强的范围, 手术切除后胶质瘤经肿瘤扩散区域复发。Nöth等<sup>[8]</sup>采用VFA技术进行T1 mapping扫描, 计算并比较33例胶质母细胞瘤患者的定量T1绝对差异值、相对差异值和传统T1图像的绝对差异、相对差异, 发现增强肿瘤、瘤周水肿和病理周围5 mm区域的平均绝对T1差值显著高于正常组织, 差异均有统计学意义 ( $P<0.01$ ), 与常规T1加权图像的差异相比, 绝对定量T1差异图能够可视化未治疗胶质母细胞瘤的钆造影剂渗漏, 体现水肿区域内外肿瘤细胞浸润。

放化疗后相关改变和肿瘤复发鉴别困难, 在临床诊疗中误诊率较高。吕瑞瑞等<sup>[9]</sup>探讨了SyMRI定量参数联合多重灵敏度编码弥散加权成像鉴别胶质瘤复发和治疗相关改变的应用价值, 通过纳入45例定期随访出现新发强化灶患者, 发现增强前后的T1值及ADC值在鉴别胶质瘤复发和治疗相关改变中差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 三者联合则提高诊断效能 (AUC=0.901)。该研究样本量较小, 需要大样本量研究进一步验证。

### 2.2 鼻咽部肿瘤应用

既往研究<sup>[10-11]</sup>表明, SyMRI技术在鉴别鼻咽癌和鼻咽良性增生及鼻咽癌预后方面有诊断价值, T1均值与Ki-67增殖指数呈正相关 ( $r=0.469$ ,  $P=0.002$ ), T1最小值与血浆EB病毒DNA ( $r=-0.417$ ,  $P=0.002$ )、血清EA-IgA抗体 ( $r=-0.313$ ,  $P=0.02$ ) 呈负相关, 认为可能是EBV感染通过诱导粒细胞/巨噬细胞集落刺激因

子产生募集更多的巨噬细胞,从而促进肿瘤血管生成,通透性增加、细胞密度和巨噬细胞聚集降低细胞外水含量,导致T1值降低;T1的直方图相关参数与肿瘤T分期和临床分期呈负相关,认为高分期的新生脉管系统表现出通透性的增加,高比例肿瘤内坏死降低T1值;对于N分期、表皮生长因子受体表达差异则无统计学意义。

与鼻咽癌淋巴结转移相关。鼻咽癌咽后淋巴结患者转移预后较差,需要调整放疗剂量和范围,咽后淋巴结位置较深,很难进行活检和手术切除。Wang等<sup>[12]</sup>回顾性纳入共63个淋巴结(良性21个,转移性42个),通过SyMRI、弥散加权成像及形态学特征比较鉴别良性和转移性咽后淋巴结的诊断价值,良性咽后淋巴结T1、T2、PD及T1标准差显著高于转移性( $P<0.05$ , AUC为0.661~0.834),多参数联合显著提高整体诊断性能(AUC=0.944),指导术前放疗和减少不必要的放疗次数,有待多中心、大样本量研究补充。

### 2.3 腮腺肿瘤的应用

腮腺多形性腺瘤、腺淋巴瘤和腮腺恶性肿瘤的生物学行为不同,手术方式也不一样,影像学特征存在较大重叠。研究<sup>[13-14]</sup>发现,采用VFA技术扫描T1值在鉴别腮腺肿瘤有应用价值,T1减少值鉴别腮腺良恶性肿瘤差异有统计学意义( $P<0.05$ ),增强前T1值、T1差值及T1差值百分比对于腮腺肿瘤亚型间鉴别有统计学意义,腺淋巴瘤与恶性肿瘤的表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)差异无统计学意义,T1值对于两者诊断效能较高,可以作为区分腺淋巴瘤与恶性肿瘤新方法。T1相关定量参数有可能作为腮腺病变组织物理特性的标志物。

## 3 胸部肿瘤中的应用

### 3.1 与肺良恶性病变鉴别相关

肺癌是全球发病率最高的恶性肿瘤<sup>[15-16]</sup>。CT是诊断肺良恶性病变的主要手段,但反复照射对儿童、孕妇等群体有潜在危害。洪琴等<sup>[17]</sup>回顾并分析57个经病理学检查证实肺结节,T1 mapping采用VFA技术,T1均值显示观察者内、间重复性较好,良性肺结节的T1均值比恶性肺结节更高( $P<0.05$ , AUC=0.720),这与Yang

等<sup>[18]</sup>的结果一致,并且还比较了结核与非结核良恶性病变T1值差异,发现结核病T1值低于非结核良性病变T1值( $P=0.002$ ),而与恶性肿瘤的T1值差异无统计学意义,推测这一差异可能与病变含水量有关,推动了磁共振技术诊断肺结节的发展。

### 3.2 与肺癌病理学类型相关

肺癌治疗方式、预后与其病理学类型密切相关,肺腺癌易发生血行转移,鳞癌生长缓慢,转移发生较晚,小细胞肺癌易早期转移,手术切除疗效差,对放化疗敏感。B1场校正T1 mapping技术已被证明能区分不同肺癌病理学类型。张玮等<sup>[19]</sup>回顾并分析117例经病理学检查确诊的肺癌患者,T1 mapping采用VFA技术,发现腺癌、鳞状细胞癌和小细胞肺癌的T1减少值、T1减少百分比和增强后T1值差异有统计学意义( $P<0.05$ ),增强前T1值差异无统计学意义,这与Li等<sup>[20]</sup>的研究结果不一致,可能是因为肿瘤内部出现肉眼难以识别的不完全坏死,勾画感兴趣区时难以排除,也可能是病理学类型差异所导致的,增强前T1值在鉴别肺癌恶性肿瘤病理学类型方面的价值目前尚存争议。

### 3.3 与肺癌患者治疗效果相关

化疗是晚期肺癌的重要治疗手段,治疗前预测疗效至关重要。吕秉霖等<sup>[21]</sup>纳入52例经病理学检查确诊并至少完成2个周期化疗的晚期肺癌患者,化疗前均行增强T1 mapping序列检查,扫描采用VFA技术,发现敏感组治疗前增强T1明显低于不敏感组( $t=-4.96$ ,  $P<0.001$ ),T1差值百分比及细胞外体积分数明显高于不敏感组( $t=5.40$ ,  $P<0.001$ ;  $t=5.64$ ,  $P<0.001$ ),细胞外体积分数在预测肺癌化疗效果中具有最高的诊断效能(AUC=0.880)。

多药耐药性是非小细胞肺癌化疗失败的主要因素,准确区分耐药性和敏感性非小细胞肺癌对后续治疗至关重要。Shen等<sup>[22]</sup>提出,通过检测肿瘤微环境中受纳米复合材料影响的过氧化氢含量差异,T1值可用于鉴别耐药性与敏感性非小细胞肺癌,为耐药性非小细胞肺癌的精确诊断提供了新的途径。

## 4 乳腺肿瘤中的应用

### 4.1 与乳腺病变良恶性鉴别相关

MRI是乳腺良恶性病变诊断的重要手段,但在时间信号曲线分型上存在重叠,准确性不足。苏春艳等<sup>[23]</sup>采用变量翻转角B1校正的T1 mapping技术,发现增强后T1值可以鉴别乳腺良恶性病变,且联合ADC的诊断效能更高;增强前T1值在此方面差异无统计学意义,这与Lian等<sup>[24]</sup>的研究结果不一致,其采用Look-Locker反转恢复序列(MOLLI)扫描,前瞻性纳入108个病灶,发现T1值在乳腺良恶性组之间差异有统计学意义( $P<0.001$ ),认为可能与纳入病灶分化程度、患者月经周期等因素有关;对于增强后T1值的最佳测量时相选择有待进一步研究;He等<sup>[25]</sup>的研究表明,SyMRI的T1差值变化率结合临床特征、病灶内部强化模式及边缘等,能显著提高乳腺良恶性病变的鉴别效能,此外,还比较了不同勾画感兴趣区方法对诊断效果的影响。

### 4.2 与乳腺癌患者生物学特性相关

乳腺癌具有预后异质性,个体化治疗依赖于雌激素受体(estrogen receptor, ER)、孕激素受体(progesterone receptor, PR)、人类表皮生长因子受体2(human epidermal growth factor receptor 2, HER2)和Ki-67增殖指数等活检结果,但活检只能提供局部信息。有研究<sup>[24, 26]</sup>表明,SyMRI的T1值与ER、PR显著相关,ER、PR阴性组T1值明显高于阳性组,预测HER2、Ki-67增殖指数差异无统计学意义,这与Li等<sup>[27]</sup>的研究结果不一致,他们发现T1标准差可预测HER2表达( $P<0.05$ ),增强前T1值预测Ki-67增殖指数差异有统计学意义( $P<0.05$ )。T1值在预测HER2和Ki-67增殖指数上存在争议,可能与乳腺癌的异质性和肿瘤内部生物学差异有关,亟待大样本、多中心研究以弥补活检的局限,推动无创定量分析乳腺癌的生物学特性研究发展。

### 4.3 与乳腺癌患者腋窝淋巴结状态相关

腋窝淋巴结是乳腺癌最常见的转移区域,转移淋巴结数量与乳腺癌患者的预后密切相关。Qu等<sup>[28]</sup>回顾并分析56例经病理学检查证实的浸润性乳腺癌,通过SyMRI技术扫描,多因素

分析表明增强前T1是判断腋窝淋巴结转移的独立风险因素(OR=1.426, 95% CI 1.130~1.798,  $P=0.039$ )。Zeng等<sup>[29]</sup>利用直方图分析预测浸润性导管癌患者腋窝淋巴结情况,通过SyMRI技术扫描,增强后T1值的直方图信息(能量、最小值和方差)和临床特征(年龄和多灶性)联合模型在预测N0和N<sup>+</sup>组间的诊断性能最佳(AUC=0.879),SyMRI参数的全肿瘤直方图特征可作为术前预测腋窝淋巴结转移的无创补充方法。

### 4.4 与三阴性乳腺癌患者新辅助治疗相关

病理学完全缓解反映新辅助治疗效果,并与预后相关,但需手术切除后证实。Hwang等<sup>[30]</sup>的研究通过SyMRI定量图谱的放射组学模型,预测三阴性乳腺癌患者的新辅助治疗反应,该研究纳入181例患者,基线及新辅助治疗4个周期后,提取T1、T2及PD参数的直方图和纹理特征,建立预测模型。结果表明,T1模型在训练和独立测试队列中具有良好的预测效能(AUC分别为0.78、0.72)。非对比SyMRI定量图可作为新辅助治疗反应的早期标记,未来需要更大样本量研究进一步验证其临床应用准确性。

## 5 肝脏肿瘤中的应用

### 5.1 与肝脏肿瘤鉴别相关

肝癌是中国常见的癌症,肝脏结节的早期诊断对治疗至关重要。现有影像学技术对某些不典型血管瘤、肝细胞癌及肝转移瘤的鉴别诊断存在困难。研究<sup>[31]</sup>表明,初始T1值在区分肝血管瘤、肝细胞癌及肝转移瘤方面具有较好效果。Wang等<sup>[32]</sup>通过T1 mapping扫描(VFA技术),对294例肝脏局灶性病变进行研究,发现增强后2 min的T1值鉴别良恶性结节效果最佳(AUC=0.979)。三维可变翻转角T1 mapping技术在鉴别肝脏良恶性结节方面具有较高的临床价值。

细胞外基质与肿瘤侵袭性及生长密切相关,胶原蛋白在血管生成、肿瘤细胞浸润及对抗癌药物敏感性中起重要作用。初始T1值与胶原蛋白含量相关。Keller等<sup>[33]</sup>的研究将家兔肝肿瘤分割为中央、边缘和瘤周区域,采用Look-Locker反转

恢复 (MOLLI) 技术, 发现3个区域的初始T1值存在显著差异。初始T1值可作为评估局部和全身治疗细胞外基质重塑的潜在定量参数。

## 5.2 与肝癌患者预后相关

微血管浸润 (microvascular invasion, MVI) 是肝细胞癌根治性治疗后早期复发和预后不良的重要预测指标。术前对MVI进行无创评估可能会影响手术选择。韦孟等<sup>[34]</sup>采用翻转角T1 mapping技术, 发现瘤周1 cm的增强前T1值可反映MVI状态。陈伊凡等<sup>[35]</sup>的研究探讨了钆塞酸二钠增强MRI联合全瘤及瘤周双区域平均T1 mapping值与肝细胞癌MVI状态的关系, 发现纳入平扫的全瘤及瘤周10 mm、双区域T1 mapping值的列线图模型结合增强MRI进一步提高了MVI的预测效能 (AUC: 0.928; 95% CI 0.873~0.984)。

Ki-67增殖指数是细胞增殖的指标, 与肝细胞癌的总生存期及无复发生存期相关。术前无创评估Ki-67增殖指数有助于预测患者预后并指导治疗。既往研究<sup>[36-37]</sup>表明, 采用翻转角T1 mapping技术, T1值联合增强MRI可准确预测肝癌患者术前Ki-67增殖指数。

Wang等<sup>[38]</sup>纳入107例单发小肝癌患者, 根据随访病理分为复发组和无复发组, 探讨T1 mapping在预测肝癌切除术后复发的应用价值, 多因素分析发现非富血管低信号结节和T1弛豫时间的减少率与肿瘤复发独立相关, 合并这两种危险因素的患者复发率明显增高。

## 6 宫颈肿瘤中的应用

### 6.1 与宫颈癌病理学类型相关

宫颈癌是女性生殖道常见的恶性肿瘤, 宫颈癌活检反映局部病变, 不能代表病灶整体, 可能漏诊小病变。既往研究<sup>[39]</sup>表明T1值能够区分宫颈癌和正常宫颈组织, 增强后T1值可反映肿瘤分化程度。Zhang等<sup>[40]</sup>前瞻性纳入157例宫颈癌患者, 采用翻转角T1 mapping技术, 发现初始T1值能有效鉴别宫颈癌病理学亚型和分期, 宫颈鳞癌T1值高于腺癌, 宫颈癌晚期组初始T1值显著高于早期组; 相比弥散峰度成像, T1 mapping在鉴别宫颈鳞癌亚型和分期方面的诊断效能更高, 有潜力

用于指导穿刺活检。

### 6.2 与宫颈癌的淋巴管血管间隙浸润相关

淋巴管血管间隙浸润 (lymphovascular space invasion, LVSI) 是宫颈癌淋巴结转移的重要途径, 也是早期宫颈癌复发的危险因素, 决定可否实施保留生育功能手术、宫颈癌术后是否行辅助治疗, 术前评估LVSI状态非常重要。相关研究<sup>[41-42]</sup>探究了SyMRI参数在预测宫颈鳞癌LVSI状态中的应用, 发现T1值在鉴别无淋巴结转移的宫颈鳞癌LVSI状态中具有显著差异, 且T1是预测宫颈鳞癌LVSI的独立危险因素 ( $\beta=-0.010$ , OR=0.990,  $P=0.009$ ), 鳞癌LVSI阳性组的T1值低于LVSI阴性组, 该研究样本量较小, 且组织学类型单一, 需扩大样本量并涵盖多种组织学类型进一步研究。

### 6.3 与宫颈癌复发相关

手术是早期宫颈癌患者的首选治疗方法, 同步放化疗是晚期患者的主要选择, 但部分患者在完成治疗后的前2年内出现复发, 并且复发患者的1年生存率仅为15%~20%。Liu等<sup>[43]</sup>纳入144例患者, T1 mapping采用Look-Locker技术, 发现在手术治疗和非手术治疗患者中, 原始T1值是肿瘤复发的独立危险因素, 分别建立复发风险模型的个体预后指数, Cox回归模型的AUC分别为0.923、0.921, 表明模型在预测宫颈癌复发及筛查高危人群方面具有较好的预测效能, 为个体化治疗提供了重要依据。

## 7 直肠肿瘤中的应用

### 7.1 与直肠癌的病理学分级、分类相关

直肠癌的发病率和死亡率位居全国恶性肿瘤前列<sup>[16]</sup>。黏液腺癌是预后差的直肠腺癌亚型, 对新辅助治疗不敏感。Li等<sup>[44-45]</sup>的研究发现, 原始T1值 (反转恢复MOLLI技术) 在直肠黏液腺癌和非黏液性腺癌的鉴别中差异有统计学意义 ( $P<0.001$ ), 可减少不必要的新辅助放化疗, 此外, T1值在区分直肠癌的高、低级别及神经浸润程度方面也具有显著意义, 神经浸润阳性组T1值显著高于阴性组, T1值有助于评估直肠癌的病理分级和神经浸润程度。

## 7.2 与直肠癌壁外血管侵犯 (extramural vascular invasion, EMVI) 相关

直肠癌EMVI指肿瘤所在肠管固有肌层外的血管腔内出现肿瘤浸润, 是直肠癌的独立预后因素及危险度分层指标。Zhu等<sup>[46]</sup>的研究发现, SyMRI中T1弛豫时间在检测EMVI方面比T2、PD更敏感, 且随着EMVI评分增加, 直肠旁脂肪间隙T1值会增加, 无需对比剂的定量图像可能成为评估直肠癌病理学特征及患者预后的有效工具, T1值的量化变化也可能成为追踪直肠癌患者预后的新的生物标志物。

## 7.3 与直肠癌患者淋巴结状态相关

淋巴结转移是直肠癌总生存期的重要预后因素, 治疗策略基于局部复发和远处转移的风险分层。Zhao等<sup>[47]</sup>的研究指出, 合成磁共振T1图的直方图参数 (能量) 是预测淋巴结转移的独立风险因素, 相比形态学特征和化学位移效应, 可显著提高直肠癌淋巴结转移的预测能力。

## 7.4 与直肠癌患者分期相关

局部晚期直肠癌患者的新辅助放化疗后, 治疗策略因分期降级、病理学完全缓解或肿瘤进展而异, 因此早期预测治疗反应至关重要。Lian等<sup>[48]</sup>纳入63例局部晚期直肠癌患者, 发现新辅助放化疗病理学完全缓解组的T1均值明显低于非病理学完全缓解组, T分期下降组T1均值明显低于T分期非下降组。SyMRI技术获得的T1值可能是预测治疗反应有前景的生物标志物。此研究样本量较少, 仅勾画肿瘤的最大面积层面作为感兴趣区, 可能会丢失部分生物信息, 需进一步比较单一层面与整个肿瘤层面的T1值差异。

## 8 总结与展望

综上所述, T1 mapping是一种无创、快速成像、定量评估的技术, 经过反复研究和发展, 已广泛应用于头颈、胸部、乳腺、肝脏、子宫、直肠等肿瘤的诊断、鉴别和预后评估。尽管其在肿瘤诊断中展现一定价值, 但由于定量参数、样本差异、扫描方式等原因, 在肿瘤生物学特征和预后预测等方面的研究结果存在差异。未来需通过多中心、大样本研究进一步验证, 并结合人工智能和深度学习等技术, 提升其科研和临床应用潜力。

### 第一作者:

陈一杰 (ORCID: 0009-0002-2429-3920), 硕士研究生。

### 通信作者:

孙俊旗 (ORCID: 0000-0002-5528-0340), 博士, 主任医师, E-mail: sunjunqi1233668@sina.com。

### 作者贡献声明:

陈一杰: 文献收集、整理, 撰写和修改论文; 郭季春: 文献调研, 参考文献校对, 英文翻译; 孙俊旗: 指导论文修改, 对文章知识性内容进行审阅, 选题。

## [参 考 文 献]

- [1] 贾韬宇, 秦培鑫, 扈 锋, 等. T1 mapping技术原理及其在心肌量化的研究进展 [J]. 磁共振成像, 2022, 13(3): 151-158. JIA T Y, QIN P X, HU F, et al. Principle of T1 mapping technique and its research progress in myocardial quantification [J]. Chin J Magn Reson Imag, 2022, 13(3): 151-158.
- [2] SUNG K, DANIEL B L, HARGREAVES B A. Transmit B1+ field inhomogeneity and T1 estimation errors in breast DCE-MRI at 3 tesla [J]. J Magn Reson Imaging, 2013, 38(2): 454-459.
- [3] AZLAN C A, DI GIOVANNI P, AHEARN T S, et al. B1 transmission-field inhomogeneity and enhancement ratio errors in dynamic contrast-enhanced MRI (DCE-MRI) of the breast at 3T [J]. J Magn Reson Imaging, 2010, 31(1): 234-239.
- [4] 王佳男, 朱婧怡, 张 博, 等. 脑良恶性胶质瘤实质与瘤周T1、T2值差别的研究 [J]. 磁共振成像, 2020, 11(6): 416-421. WANG J N, ZHU J Y, ZHANG B, et al. The study of T1 and T2 values in differentiating of benign and malignant gliomas [J]. Chin J Magn Reson Imag, 2020, 11(6): 416-421.
- [5] 谢佳培, 张卫东, 朱婧怡, 等. 磁共振T1、T2值在脑胶质瘤分级及细胞增殖活性预测中的临床价值 [J]. 磁共振成像, 2021, 12(1): 15-20. XIE J P, ZHANG W D, ZHU J Y, et al. The clinical value of T1 and T2 values in predicting brain glioma grading and cell proliferation activity [J]. Chin J Magn Reson Imag, 2021, 12(1): 15-20.
- [6] 徐蕊, 罕迦尔别克·库锐, 赵伟, 等. 合成MRI及弥散张量成像评估成人胶质瘤级别与异柠檬酸脱氢酶-1状态 [J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(6): 820-824. XU R, HANJIAERBIEKE K K, ZHAO W, et al. Synthetic MRI and diffusion tensor imaging for evaluating grade and isocitrate dehydrogenase-1 status of adult gliomas [J]. Chin J Med Imag Technol, 2024, 40(6): 820-824.
- [7] GE X, GAN T J, YANG Z H, et al. Whole-tumor histogram analysis of synthetic magnetic resonance imaging predicts isocitrate dehydrogenase mutation status in gliomas [J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(3): 2225-2239.
- [8] NÖTH U, TICHY J, TRITT S, et al. Quantitative T1 mapping indicates tumor infiltration beyond the enhancing part of glioblastomas [J]. NMR Biomed, 2020, 33(3): e4242.
- [9] 吕瑞瑞, 杨治花, 党 佩, 等. 合成MRI联合MUSE-DWI鉴别

- 胶质瘤复发和治疗相关改变的应用研究 [J]. 磁共振成像, 2024, 15(7): 81-86.
- LÜ R R, YANG Z H, DANG P, et al. Application of synthetic MRI combined with MUSE-DWI to differentiate glioma progressive disease from treatment-related changes [J]. Chin J Magn Reson Imag, 2024, 15(7): 81-86.
- [ 10 ] YANG F, LI Y J, LI X L, et al. The utility of texture analysis based on quantitative synthetic magnetic resonance imaging in nasopharyngeal carcinoma: a preliminary study [J]. BMC Med Imaging, 2023, 23(1): 15.
- [ 11 ] YANG F, LI X L, LI Y J, et al. Histogram analysis of quantitative parameters from synthetic MRI: correlations with prognostic factors in nasopharyngeal carcinoma [J]. Eur Radiol, 2023, 33(8): 5344-5354.
- [ 12 ] WANG P, HU S D, WANG X Y, et al. Synthetic MRI in differentiating benign from metastatic retropharyngeal lymph node: combination with diffusion-weighted imaging [J]. Eur Radiol, 2023, 33(1): 152-161.
- [ 13 ] WEN B H, ZHANG Z X, FU K, et al. Value of pre-/ post-contrast-enhanced T1 mapping and readout segmentation of long variable echo-train diffusion-weighted imaging in differentiating parotid gland tumors [J]. Eur J Radiol, 2023, 162: 110748.
- [ 14 ] 文宝红, 程敬亮, 张 勇. 定量动态对比增强磁共振成像鉴别诊断腮腺肿瘤的价值 [J]. 临床放射学杂志, 2023, 42(7): 1081-1086.
- WEN B H, CHENG J L, ZHANG Y. The value of readout segmentation of long variable echo-trains diffusion kurtosis imaging in differential diagnosis of parotid gland tumors [J]. J Clin Radiol, 2023, 42(7): 1081-1086.
- [ 15 ] BRAY F, LAVERSANNE M, SUNG H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA Cancer J Clin, 2024, 74(3): 229-263.
- [ 16 ] HAN B F, ZHENG R S, ZENG H M, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022 [J]. J Natl Cancer Cent, 2024, 4(1): 47-53.
- [ 17 ] 洪 琴, 肖 勇, 符益纲, 等. B1场校正T1 mapping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.
- HONG Q, XIAO Y, FU Y G, et al. Clinical value of B1-corrected T1 mapping in the diagnosis of benign and malignant lung nodules and pathological classification [J]. J Mol Imag, 2024, 47(7): 741-745.
- [ 18 ] YANG S Y, SHAN F, YAN Q Q, et al. A pilot study of native T1-mapping for focal pulmonary lesions in 3.0 T magnetic resonance imaging: size estimation and differential diagnosis [J]. J Thorac Dis, 2020, 12(5): 2517-2528.
- [ 19 ] 张 玮, 赵 鹏, 郭文秀, 等. 基于T1 mapping序列的定量参数鉴别肺癌病理学类型的应用研究 [J]. 磁共振成像, 2023, 14(12): 33-39.
- ZHANG W, ZHAO P, GUO W X, et al. Application of quantitative parameters based on T1 mapping sequence in identifying pathological types of lung cancer [J]. Chin J Magn Reson Imag, 2023, 14(12): 33-39.
- [ 20 ] LI G Z, HUANG R J, ZHU M, et al. Native T1-mapping and diffusion-weighted imaging (DWI) can be used to identify lung cancer pathological types and their correlation with Ki-67 expression [J]. J Thorac Dis, 2022, 14(2): 443-454.
- [ 21 ] 吕秉霖, 赵 鹏, 张 杨, 等. IVIM和增强T1mapping成像对肺癌化疗疗效的预测价值 [J]. 医学影像学杂志, 2024, 34(2): 33-37.
- LYU B L, ZHAO P, ZHANG Y, et al. Value of IVIM and enhanced T1mapping in predicting chemotherapy efficacy of lung cancer [J]. J Med Imag, 2024, 34(2): 33-37.
- [ 22 ] SHEN A J, SUN Y H, WANG G M, et al. An adaptable nanoprobe integrated with quantitative T1-mapping MRI for accurate differential diagnosis of multidrug-resistant lung cancer [J]. Adv Healthc Mater, 2023, 12(31): e2300684.
- [ 23 ] 苏春艳, 杨 智, 付 兵, 等. T1 mapping联合弥散加权成像对乳腺良、恶性病变的诊断价值 [J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31(10): 1049-1053.
- SU C Y, YANG Z, FU B, et al. T1 mapping combined with diffusion-weighted imaging in the diagnosis of benign and malignant breast lesions [J]. Chin J Med Imag, 2023, 31(10): 1049-1053.
- [ 24 ] LIAN C, ZHUANG L L, WANG Z H, et al. The diagnostic performance of T1 mapping in the assessment of breast lesions: a preliminary study [J]. Eur J Radiol, 2024, 177: 111589.
- [ 25 ] HE H, SONG M N, TIAN Z R, et al. Multiparametric MRI model with synthetic MRI, DWI multi-quantitative parameters, and differential sub-sampling with Cartesian ordering enables BI-RADS 4 lesions diagnosis with high accuracy [J]. Front Oncol, 2024, 13: 1180131.
- [ 26 ] GAO W B, YANG Q X, LI X H, et al. Synthetic MRI with quantitative mappings for identifying receptor status, proliferation rate, and molecular subtypes of breast cancer [J]. Eur J Radiol, 2022, 148: 110168.
- [ 27 ] LI X J, FAN Z C, JIANG H N, et al. Synthetic MRI in breast cancer: differentiating benign from malignant lesions and predicting immunohistochemical expression status [J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 17978.
- [ 28 ] QU M M, FENG W, LIU X R, et al. Investigation of synthetic MRI with quantitative parameters for discriminating axillary lymph nodes status in invasive breast cancer [J]. Eur J Radiol, 2024, 175: 111452.
- [ 29 ] ZENG F, YANG Z T, TANG X X, et al. Whole-tumor histogram models based on quantitative maps from synthetic MRI for predicting axillary lymph node status in invasive ductal breast cancer [J]. Eur J Radiol, 2024, 172: 111325.
- [ 30 ] HWANG K P, ELSHAFFEY N A, KOTROTSOU A, et al. A radiomics model based on synthetic MRI acquisition for predicting neoadjuvant systemic treatment response in triple-negative breast cancer [J]. Radiol Imaging Cancer, 2023,

- 5(4): e230009.
- [ 31 ] 张玉佩, 李小虎, 汪 飞, 等. 非对比增强定量T1 mapping技术对肝血管瘤、肝细胞癌及肝转移瘤的诊断价值 [ J ] . 中国医学影像学杂志, 2021, 29(12): 1216-1221.  
ZHANG Y P, LI X H, WANG F, et al. Quantitative diagnosis of non-contrast-enhanced T1 mapping in hemangioma, hepatocellular carcinoma and hepatic metastases [ J ] . Chin J Med Imag, 2021, 29(12): 1216-1221.
- [ 32 ] WANG F, YANG Q, ZHANG Y P, et al. 3D variable flip angle T1 mapping for differentiating benign and malignant liver lesions at 3 T: comparison with diffusion weighted imaging [ J ] . BMC Med Imaging, 2022, 22(1): 146.
- [ 33 ] KELLER S, BORDE T, BRANGSCH J, et al. Native T1 mapping magnetic resonance imaging as a quantitative biomarker for characterization of the extracellular matrix in a rabbit hepatic cancer model [ J ] . Biomedicines, 2020, 8(10): 412.
- [ 34 ] 韦 孟, 冯秋霞, 刘希胜. 基于T1 mapping技术的定量参数评估肝细胞肝癌微血管侵犯的研究 [ J ] . 现代肿瘤医学, 2024, 32(11): 2059-2064.  
WEI M, FENG Q X, LIU X S. Research on evaluation of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma based on quantitative parameters of T1 mapping [ J ] . J Mod Oncol, 2024, 32(11): 2059-2064.
- [ 35 ] 陈伊凡, 刘子蔚, 蔡志平, 等. 钆塞酸二钠增强MRI联合全瘤及瘤周T1 mapping均值的列线图预测肝细胞癌微血管侵犯 [ J ] . 影像诊断与介入放射学, 2023, 32(1): 9-17.  
CHEN Y F, LIU Z W, CAI Z P, et al. Prediction of microvascular invasion in hepatocellular carcinoma using a nomogram constructed by Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI signatures combined with the mean T1 relaxation time of tumor and the peritumor dual-region [ J ] . Diagn Imag Interv Radiol, 2023, 32(1): 9-17.
- [ 36 ] QIU G B, CHEN J C, LIAO W X, et al. Gadoteric acid-enhanced MRI combined with T1 mapping and clinical factors to predict Ki-67 expression of hepatocellular carcinoma [ J ] . Front Oncol, 2023, 13: 1134646.
- [ 37 ] LIU Z W, YANG S M, CHEN X J, et al. Nomogram development and validation to predict Ki-67 expression of hepatocellular carcinoma derived from Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI combined with T1 mapping [ J ] . Front Oncol, 2022, 12: 954445.
- [ 38 ] WANG W T, ZHU S, DING Y, et al. T1 mapping on gadoteric acid-enhanced MR imaging predicts recurrence of hepatocellular carcinoma after hepatectomy [ J ] . Eur J Radiol, 2018, 103: 25-31.
- [ 39 ] 李淑健, 程敬亮, 张 勇, 等. T1 mapping成像在宫颈癌组织分化程度评估中的初步应用 [ J ] . 中国临床医学影像杂志, 2020, 31(4): 276-280.
- LI S J, CHENG J L, ZHANG Y, et al. T1 mapping in evaluation of differentiation of cervical cancer: a primary study [ J ] . J Chin Clin Med Imaging, 2020, 31(4): 276-280.
- [ 40 ] ZHANG Z X, LIU J, ZHANG Y, et al. T1 mapping as a quantitative imaging biomarker for diagnosing cervical cancer: a comparison with diffusion kurtosis imaging [ J ] . BMC Med Imaging, 2024, 24(1): 16.
- [ 41 ] 郭丽美, 王 峻, 武文奇, 等. 合成MRI定量参数评估宫颈鳞癌淋巴管间隙浸润的初步研究 [ J ] . 磁共振成像, 2023, 14(11): 103-107.  
GUO L M, WANG J, WU W Q, et al. A preliminary study of quantitative parameters derived from synthetic MRI for predicting the lymphovascular space invasion status in cervical squamous cell carcinoma [ J ] . Chin J Magn Reson Imag, 2023, 14(11): 103-107.
- [ 42 ] GUO L M, ZHANG R M, XU Y, et al. Predicting the status of lymphovascular space invasion using quantitative parameters from synthetic MRI in cervical squamous cell carcinoma without lymphatic metastasis [ J ] . Front Oncol, 2024, 14: 1304793.
- [ 43 ] LIU J, LI S J, CAO Q C, et al. Prediction of recurrent cervical cancer in 2-year follow-up after treatment based on quantitative and qualitative magnetic resonance imaging parameters: a preliminary study [ J ] . Ann Surg Oncol, 2023, 30(9): 5577-5585.
- [ 44 ] LI J, GAO X M, DOMINIK NICKEL M, et al. Native T1 mapping for differentiating the histopathologic type, grade, and stage of rectal adenocarcinoma: a pilot study [ J ] . Cancer Imaging, 2022, 22(1): 30.
- [ 45 ] LI J, KOU P S, LIN L J, et al. T1 mapping in evaluation of clinicopathologic factors for rectal adenocarcinoma [ J ] . Abdom Radiol (NY), 2024, 49(1): 279-287.
- [ 46 ] ZHU K X, CHEN Z C, CUI L L, et al. The preoperative diagnostic performance of multi-parametric quantitative assessment in rectal carcinoma: a preliminary study using synthetic magnetic resonance imaging [ J ] . Front Oncol, 2022, 12: 682003.
- [ 47 ] ZHAO L, LIANG M, SHI Z, et al. Preoperative volumetric synthetic magnetic resonance imaging of the primary tumor for a more accurate prediction of lymph node metastasis in rectal cancer [ J ] . Quant Imaging Med Surg, 2021, 11(5): 1805-1816.
- [ 48 ] LIAN S S, LIU H M, MENG T B, et al. Quantitative synthetic MRI for predicting locally advanced rectal cancer response to neoadjuvant chemoradiotherapy [ J ] . Eur Radiol, 2023, 33(3): 1737-1745.

(收稿日期: 2025-01-28 修回日期: 2025-03-02)