

· 实验研究 ·

MRI 序列定量评估离体猪肝微波消融效果的实验研究

张 勇¹, 丁兀兀², 周玉梅³, 廖振洪¹, 刘高元¹, 梁傲源¹, 郭开灿¹

四川省德阳市人民医院 1. 放射科; 2. 病理科; 3. 门诊部 四川 德阳 618000

【摘要】目的 探讨 MRI 序列定量评估离体猪肝微波消融效果的可行性, 为其临床应用提供实验依据。**方法** 采用 4 个新鲜离体猪肝标本进行微波消融, 交替以 50 W/5 min、60 W/5 min 共制备 24 个消融灶, 在消融前和消融后立即进行 MRI 扫描, 成像序列为 T₁-3D WATS、T₂-SPIR、DWI 和 m-Dixon quant 序列, 采用随机区组设计的方差分析比较术前对照组 ($n=24$)、50 W 组 ($n=12$) 及 60 W 组 ($n=12$) 靶区脂肪分数 (FF)、T₂* 值、R₂* 值和 ADC 值的测量差异, 采用 Spearman 相关分析消融后靶区定量参数的变化 (Δ) 与消融功率选择的相关性。**结果** 对照组、50 W 组、60 W 组靶区的总体 FF、T₂* 值、R₂* 值、ADC 值及消融后不同测量区域 (靶区中心、靶区外带、靶区周围) 的 FF、T₂* 值、R₂* 值、ADC 值差异比较均具有统计学意义 ($P<0.05$); 靶区及靶区周围的 Δ FF、 Δ T₂*、 Δ R₂*、 Δ ADC 与消融功率选择均具有较好的相关性, 其相关系数 r 分别为 0.877、-0.769、0.859、-0.555, 以及 -0.579、0.857、-0.865、0.797, P 均 <0.05 。**结论** FF、T₂* 值、R₂* 值能较为准确的定量评估离体猪肝的 MWA 效果, m-Dixon quant 与 DWI 联合将有助于提高 MRI 定量评估消融疗效的准确性。

【关键词】 肝脏恶性肿瘤; 微波消融; 定量评价; 磁共振成像; 实验研究

中图分类号: R735.7; R445.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-9011(2022)06-1024-05

Experimental study of using MRI sequences to quantitative assessment of microwave ablation effect in ex vivo porcine liver

ZHANG Yong¹, DING Wuwu², ZHOU Yumei³, LIAO Zhenhong¹, LIU Gaoyuan¹, LIANG Aoyuan¹, GUO Kaican¹

1. Department of Radiology, The People's Hospital of Deyang City, Deyang 618000, China

2. Department of Pathology, The People's Hospital of Deyang City, Deyang 618000, China

3. Outpatient Department, The People's Hospital of Deyang City, Deyang 618000, China

【Abstract】Objective To explore the feasibility of using MRI sequences to quantitative evaluate the effect of microwave ablation (MWA) in ex vivo porcine liver, and to provide relevant reference for clinical application. **Methods** Four fresh ex vivo porcine livers were used for MWA, totally formed 24 ablation zones with energy at 50 W/5 min and 60 W/5 min alternately. MRI imaging (T₁-3D WATS, T₂-SPIR, m-Dixon Quant and DWI) was performed before and after MWA immediately. All data were divided into 3 groups (preoperative control group, $n=24$; 50 W group, $n=12$; 60 W group, $n=12$); Analysis of variance for random block design was used to compare the differences of fat fraction (FF), T₂* value, R₂* value and ADC value among three groups and in the different areas of MWA; Spearman correlation was used to analyze the correlation between Δ parameters and microwave energy. **Results** All parameters (FF, T₂*, R₂* and ADC) showed significant difference among the 3 groups and in the different areas (central zone, outer zone, peripheral zone) after MWA with all P values <0.05 ; The variations (Δ FF, Δ T₂*, Δ R₂*, Δ ADC) in ablation zone and peripheral zone both revealed highly correlation between quantitative parameters and generate power of MWA, the correlation coefficient r respectively was 0.877, -0.769, 0.859, -0.555 in ablation zone, and respectively was -0.579, 0.857, -0.865, 0.797 in peripheral zone, all P values <0.05 . **Conclusion** FF, T₂* value and R₂* value were confirmed to accurately evaluate the effect of MWA, combined m-Dixon quant and DWI could improve the reliability of MRI quantitative evaluation for hepatic MWA.

【Key words】 Hepatic malignancy; Microwave ablation; Quantitative evaluation; Magnetic resonance imaging; Experimental study

基金项目: 四川省卫健委科研普及应用项目 (编号: 17PJ376)

作者简介: 张勇 (1977-), 男, 医学硕士, 副主任医师, 主要从事 MRI 诊断及非血管介入诊疗工作

以射频消融 (radiofrequency ablation, RFA)、微波消融 (microwave ablation, MWA) 为代表的局部消融治疗已纳入肝肿瘤的综合治疗策略, 针对小肝癌

和肝脏寡转移瘤的治疗效果也与外科手术相当^[1-2]。当瘤体负荷较大、肿瘤位于消融高危部位、瘤旁卫星结节或受热沉降效应影响明显时发生肿瘤残留或局部复发的风险较高^[3-4]。MRI 在肝肿瘤消融治疗的影像学评价中具有极为重要的临床价值,在肿瘤残留/局部复发的早期诊断中仍然面临着一些困难和挑战^[5-10]。定量分析是目前肿瘤影像研究的热点之一,DWI 可对肝细胞癌的病理分级、TACE 术后的疗效评估等提供有价值的参考,但也存在空间分辨率低、ADC 值测量在一定程度上缺乏可重复性的局限^[11-13]。m-Dixon quant 序列为新近开发的定量序列,可对肝脏脂肪含量做准确的定量分析, R_2^* 值也有助于肝细胞癌分化程度的预测^[14-15]。本实验通过分析新鲜离体猪肝 MWA 后 DWI 和 m-Dixon quant 定量分析参数的变化,明确 DWI 联合 m-Dixon quant 序列定量评估 MWA 效果的可行性。

1 资料与方法

1.1 实验材料

在本地市场购置检疫合格的新鲜离体猪肝标本共 4 个,采用标本冷藏箱($2^{\circ}\text{C} \sim 8^{\circ}\text{C}$)储运,箱内制冷物为冰屑,堆积达标本高度,并使标本不与制冷物充分接触。

1.2 检查方法

微波消融设备为南京亿高微波系统工程公司 ECO-100C 型微波治疗仪(输出功率 2 450 MHz)和 16G 水冷循环消融针;成像设备为西门子 Definition 64 层螺旋 CT 和飞利浦 Ingenia 3.0 T 磁共振成像仪。

离体猪肝标本置于塑料托盘内,使用数字化腹部线圈,MRI 成像方案为:1) T_2 -SPIR 序列:TR/TE 2 200 ms/78 ms,FA 90,层厚/层距 5 mm/6 mm,FOV 47.5 cm \times 12.5 cm,矩阵 475 \times 300,NEX 2;2) T_1 -3D WATS 序列:TR/TE 20 ms/8 ms,FA 50,层厚/层距 1.2 mm/1 mm,FOV 34 cm \times 34 cm,矩阵 424 \times 424,NEX 2;3) DWI 为 SE-EPI 序列,b 值为 0、50 和 800 mm^2/s ,TR/TE 4 396 ms/60 ms,FA 60,层厚/层距 5 mm/6 mm,FOV 47 cm \times 30 cm,矩阵 125 \times 125,NEX 6;4) m-DIXON quant 序列:6 个回波,TR/TE 6 ms/1 ms,FA 3,层厚/层距 6 mm/3 mm,FOV 40 cm \times 35 cm,矩阵 215 \times 215,NEX 1。MRI 扫描后立即在 CT 引导下进行微波消融(消融环境温度 22°C ,相对湿度 60%),消融进针角度均为 45° ,进针深度为 5.5 cm,另在消融进针处旁开 5 cm、角度与消融针平行

再插入 1 枚测温针,进针深度为 4.5 cm,交替以 50 W/5 min、60 W/5 min 制备 24 个消融灶,在消融开始 2 min 后进行消融周边区域测温,每分钟记录 1 次,共记录 3 次。消融完成后立即按原成像方案重复 MRI 扫描。

1.3 图像分析

由 2 位具有 MRI 诊断和微波消融治疗经验的影像介入医师共同分析消融前后的一系列 MRI 信号变化,在 MRI 图像后处理工作站上,逐层勾画消融靶区体积,以高分辨 T_1 -3D WATS 和 T_2 -SPIR 序列图像为参考,设置感兴趣区(ROI),同时注意避开血管和胆管,将其复制到 m-Dixon quant 和 DWI 的表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)图中,分别测量消融靶区中心、靶区外带、靶区周围(消融边界 1 cm 范围)的脂肪分数(fat fraction, FF)、 T_2^* 值、 R_2^* 值和 ADC 值,每测量区域选择 3 个相同大小的 ROI 录入数据。

1.4 统计学分析

使用 SPSS 17.0 进行数据分析,计量资料以均数 \pm 标准差表示,消融靶区的 MRI 定量分析结果在消融前、后的比较,不同功率分组的靶区体积及其周边温度测量比较采用独立样本 t 检验,两组中消融靶区及其周边区域的 MRI 定量分析比较及其与消融前的对照比较采用随机区组设计的方差分析,微波消融后 m-Dixon quant 和 DWI 定量分析参数的变化($\Delta = \text{mean 消融后} - \text{mean 消融前}$)与消融功率的关系采用 Spearman 相关性分析,均以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 MWA 靶区的大体病理和 MRI 信号变化

MWA 后肝脏质地逐渐变硬、靶区表明包膜皱缩、温度增加,大体病理观察消融靶区为椭圆形分层状结构,中心褐色区域为针道和碳化坏死,外围为白色的凝固性坏死,最外围为淡红色的消融边界(图 1)。 T_1 WI 梯度成像序列(3D-WATS)显示靶区为高信号,靶区中心及针道为更高信号, T_2 WI 显示靶区整体为低信号,靶区中心可因出血或蛋白浓缩呈高信号,靶区边缘有环形水肿带(图 2,3)。DWI 显示靶区为低信号,仅靶区中心和消融边缘为高信号,ADC 图中靶区整体为不均匀低信号,仅靶区边缘为稍高信号(图 4)。在 m-Dixon quant 定量分析图中靶区表现与大体病理类似的分层环状结构,在 FF 伪彩图中消融靶区为高信号,周围有低信号带围绕

(图 5), T_2^* 伪彩图中靶区呈不均匀低信号, 周围为高信号, R_2^* 伪彩图表现则与 T_2^* 伪彩图相反(图 6, 7)。

2.2 MWA 后 m-Dixon quant、ADC 值的分析结果及变化趋势

50W 组和 60W 组消融灶在 MWA 前的平均 FF、 T_2^* 、 R_2^* 和 ADC 值的测量差异均无统计学意义, 依次分别为 2.66 ± 0.43 vs 2.66 ± 0.49 , $t = 0.112$; 25.53 ± 0.53 vs 25.36 ± 0.24 , $t = 0.970$; 39.18 ± 0.83 vs 39.42 ± 0.36 , $t = 0.927$; 1.20 ± 0.43 vs

1.21 ± 0.49 , $t = 0.402$, P 值均 > 0.05 。MWA 后, 消融前对照组与 50W 组、60W 组消融灶的 m-Dixon quant、ADC 的定量分析结果差异均具有统计学意义, 以消融灶的不同测量分区进行多重比较: 靶区中心、靶区外带、消融周边区域的各定量分析指标的测量差异均具有统计学意义, P 值均 < 0.05 , 见表 1。MWA 后靶区中心、靶区外带 ADC 值、 T_2^* 值较消融前显著下降, FF 值和 R_2^* 值则表现为显著升高, 消融周边区域则呈现 ADC 值和 T_2^* 值略有增加, FF 值和 R_2^* 值轻度下降的趋势。

表 1 对照组、50W 组、60W 组的 m-Dixon quant 和 ADC 定量分析结果

定量参数	对照组* ($n = 24$)	50W 组* ($n = 12$)			60W 组 ($n = 12$)			F	P
		靶区中心	靶区外带	周边区域	靶区中心	靶区外带	周边区域		
ADC	1.21 ± 0.05	1.05 ± 0.03	1.08 ± 0.02	1.26 ± 0.02	1.01 ± 0.02	1.07 ± 0.06	1.38 ± 0.03	171.42	< 0.05
FF	2.66 ± 0.14	6.78 ± 1.07	4.44 ± 0.45	2.36 ± 0.09	8.81 ± 1.14	5.44 ± 0.54	2.28 ± 0.13	299.35	
T_2^*	25.44 ± 0.41	7.51 ± 1.02	9.60 ± 0.54	27.80 ± 0.45	6.10 ± 0.73	8.98 ± 0.49	28.05 ± 0.26	662.13	
R_2^*	39.32 ± 0.64	135.39 ± 17.96	104.55 ± 6.21	35.99 ± 0.59	166.06 ± 19.81	111.52 ± 6.05	35.67 ± 0.35	542.97	

注: ADC = 10^{-3} mm²/s; FF = %; T_2^* = ms; R_2^* = 10^{-3} ms; * 消融前对照组、50W 组、60W 组间 ADC、FF、 T_2^* 、 R_2^* 的差异比较, F 分别为 4.99, 11.84, 13.10, 15.36, P 值均 < 0.05 。* 靶区中心、靶区外带和消融周边区域 ADC、FF、 T_2^* 、 R_2^* 的多重比较, P 值均 < 0.05

2.3 消融后 m-Dixon quant 及 ADC 值变化与功率的关系

50W 组、60W 组消融靶区的平均体积分别为 (10.44 ± 0.62) ml、(12.73 ± 0.73) ml, $t = 10.582$; 靶区周边平均测温为 (40.1 ± 0.7) °C、(44.7 ± 0.6) °C, $t = 8.128$, P 值均 < 0.05 。MWA 靶区的 Δ FF、 ΔT_2^* 、 ΔR_2^* 、 Δ ADC 与消融功率的相关系数 r 分别为 0.877、-0.769、0.859、-0.555, 靶区周围的 Δ FF、 ΔT_2^* 、 ΔR_2^* 、 Δ ADC 与消融功率的相关系数 r 分别为 -0.579、0.857、-0.865、0.797, P 值均 < 0.05 。

3 讨论

RFA、MWA 是常用的肿瘤热消融治疗方法, 相对于 RFA, MWA 的热场范围大, 瘤内温度高、受组织碳化和血流沉降效应的影响较小, 在肿瘤内迅速产生和释放大量热能, 发生热凝固性坏死和组织脱水的同时, 还诱导产生肿瘤坏死因子, 促进细胞凋亡, 激发机体免疫系统的抗肿瘤效应^[16-17]。病理上, 消融靶区为分层环状结构, 中心的针道和碳化坏死称为暗区 (dark zone), 外周为凝固性坏死-白区 (white zone), 最外围为充血反应带-为红区 (red zone)。急性期在光镜下靶区组织大片坏死, 充血区细胞变性、水肿和炎细胞浸润, NADPH 黄地酶免疫

组化染色时坏死区细胞无染色, 红区肝细胞染色由浅淡移行为蓝紫色, 代表细胞活性逐渐增加; 在亚急性期和慢性期, 炎性反应和细胞水肿减轻, 淋巴细胞和成纤维细胞逐渐增多, 与正常肝交界处出现肝纤维化^[18]。

MRI 对消融区的凝固性坏死、蛋白溶解、出血、肉芽组织增生和纤维化等一系列病理变化极为敏感, 为最佳的影像学评估手段。本实验中, 消融靶区在 T_1 序列表现为高信号与肝组织的凝固性坏死、蛋白浓缩变性有关, MWA 的脱水效应使靶区肝组织在 T_2 序列中呈显著低信号, 靶区周边的 T_2 高信号环则与 MWA 的热辐射损伤效应导致离体猪肝细胞膜破坏, 细胞液向细胞外流动有关, 这些变化也与临床中肝肿瘤消融后的 MRI 信号改变相似。当 MWA 术后靶区的 T_1 高信号/ T_2 低信号带未完全覆盖肿瘤, 局部出现 T_1 信号降低/ T_2 信号增高、增强出现结节样强化时, 常提示肿瘤残留及复发。在消融术后早期 (尤其 1~3 个月内), 单纯根据消融区边缘的回声、密度/信号改变并不能准确鉴别炎性水肿与肿瘤残留, 超声造影、CT/MRI 增强显示靶区边缘的持续性增强/显著强化常代表炎性反应和异常灌注, 但也容易掩盖或与靶区边缘的残留病灶相混淆, 尽管 MRI 增强减影或灌注成像能够获取真实的强化和灌注情况, 当残留病灶表现隐匿时仍可能需要多

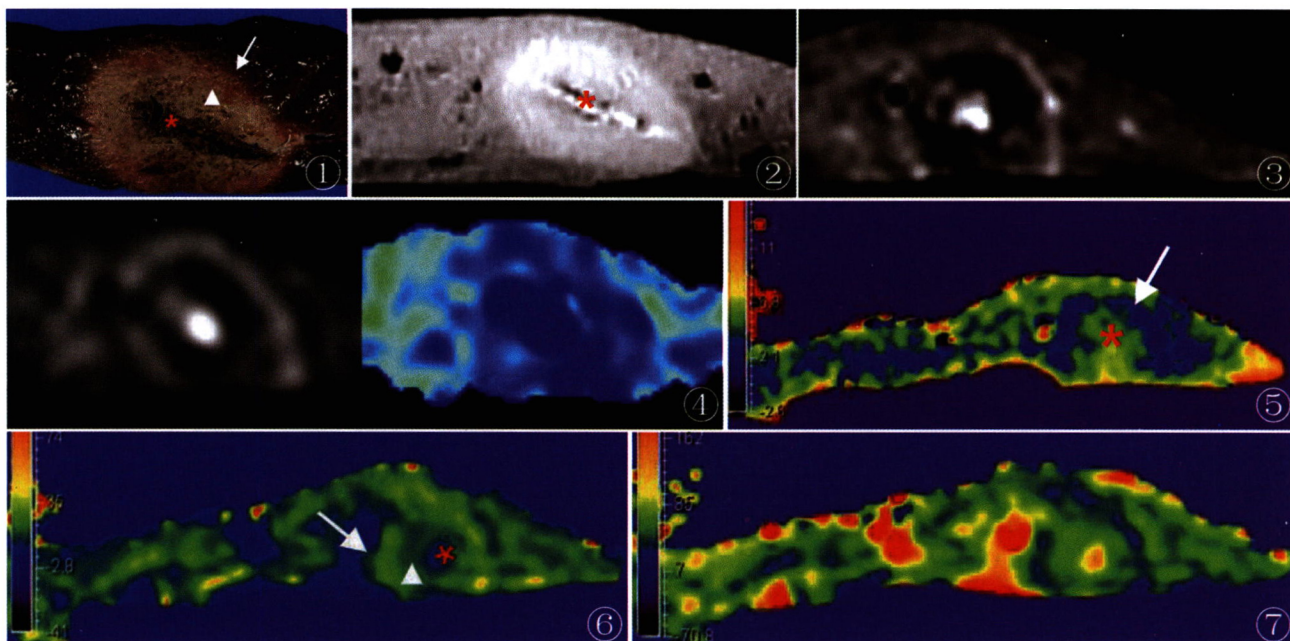


图 1~7 新鲜离体猪肝标本消融后大体病理、常规 MRI、DWI 及 m-Dixon quant 定量分析。图 1 60W/5min 制备的消融灶,靶区中心为碳化性坏死(*),靶区外带为白色凝固性坏死(^),长箭为消融边界;图 2 T₁ 3D-WATS 序列,消融针道(*)及 MWA 靶区均为高信号;图 3 显示靶区在轴位呈“靶环”样结构;图 4 DWI 图像(b=800)及其 ADC 伪彩图,显示靶区中心及外带 ADC 值均明显减低;图 5~7 消融灶的 m-Dixon quant 各定量参数伪彩图,脂肪分数图(图 5),T₂* 和 R₂* 伪彩图(图 6,7)

次随访才能明确,在一定程度上也增加了病情进展的风险。

DWI 是临床最为常用的定量分析序列,肝细胞癌(尤其低分化肝细胞癌)由于细胞密度大,细胞外间隙小,导致水分子的扩散能力下降,通常具有较低的 ADC 值。Ou 等^[19]的研究表明,在接受阿霉素药物洗脱微球栓塞化疗的肝细胞癌患者中,术后 2 周时治疗反应组的 ADC 值变化大于治疗无反应组,DWI 可做为预测肝细胞癌介入疗效的影像标志物。本实验中 MWA 靶区 ADC 值在消融后显著下降,其原因主要与热凝固坏死后组织强烈脱水,离体猪肝靶区水分子含量急剧减少以及凝固性坏死产生的蛋白复合物和细胞碎片限制了水分子的运动有关,而靶区周边区域 ADC 值增加则为 MWA 的热辐射损伤效应所致。由于 MWA 术后病灶内常合并出血和蛋白变性,有学者认为术后早期通过 DWI 来判断肿瘤残留或局部复发缺乏临床实际意义,但也有研究者提出采用分区逐步测量 ADC 值可提高消融疗效评估的准确性^[20]。

m-Dixon quant 是基于最小二乘法水-脂分离技术的最新一代 MRI 脂肪定量技术,通过多个回波的采集、脂肪峰模型运算和 T₂* 的校正,不仅能同时获得肝脏脂图、水图、同相位和反相位图像,还能进行

肝脏脂肪分数(FF)、T₂* 值和 R₂* 值的测量并具有可重复性。周围等^[14]利用 m-Dixon quant 对脂肪肝、肝硬化和肝纤维化患者的脂肪含量和铁沉积状况进行了较为准确的量化分析,曾文彦等^[15]针对肝硬化背景下原发性肝细胞癌(HCC)的铁廓清现象进行研究,发现 R₂* 值有助于预测 HCC 的病理分化程度,但尚未见将其应用于肝肿瘤 MWA 疗效评估的报道。在 m-Dixon quant 的定量参数中,T₂* 弛豫能够反映组织真实的 T₂ 弛豫,R₂* 值相当于 T₂* 值的例数。因此,MWA 靶区和周边区域 FF、T₂* 值、R₂* 值的变化与 MWA 的最本质的病理特征-热凝固性坏死及组织脱水直接相关,靶区组织含水量减少使靶区中心、靶区外带的 T₂* 值呈显著降低,FF 值和 R₂* 值则呈相对升高,而靶区周边区域则因热辐射损伤使细胞膜不完整,细胞外间隙水分含量增加,其 FF、R₂* 值呈相对降低,而 T₂* 值呈轻度升高的趋势。MWA、RFA、激光消融等肿瘤热消融治疗均是以物理能量转化为基础,瘤内温度、消融灶体积与消融功率的选择直接相关^[21-22]。在组织相应的治疗功率选择范围内,靶区温度足以灭活肿瘤,而肿瘤残留或局部复发均发生于靶区边缘。因此,在术后影像评价中对消融靶区进行分区定量分析更具有临床实际意义。

综上所述,本文用离体猪肝来模拟肝脏 MWA,消融靶区不含肿瘤组织,消融效果不受血流沉降效应的影响,对组织切片染色亦不能观察到靶区边缘的炎性反应,与临床实际存在一定差异,但消融后 m-Dixon quant 和 ADC 值的变化仍然能够反映 MWA 后的病理变化,并对 MWA 的实际效果进行定量分析,弥补单独使用 ADC 值进行定量分析的不足。具体到临床实践中,在常规的肝脏 MRI 成像基础上, m-Dixon quant 和 DWI 可与 T₁ 动态增强、肝脏 ASL 成像等进行选择性组合,结合患者的临床特征和多模态 MRI 成像数据构建临床预测模型,有望对肝恶性肿瘤患者接受 TACE 或联合 MWA 治疗后的疗效及预后进行更为精准的评估和预测。

参考文献:

- [1] 袁声贤,周伟平. 肝细胞癌降期转化的治疗策略[J]. 临床肝胆杂志,2020,36(2):252-257.
- [2] Chow FC, Chok KS. Colorectal liver metastases: an update on multidisciplinary approach [J]. World J Hepatol, 2019, 11(2): 150-172.
- [3] 唐俊,张永生,范卫君. 微波消融肝肿瘤术中影响因素及消融后残留危险因素研究[J]. 中国医学创新,2017,14(13):23-25.
- [4] Sparchez Z, Mocan T, Radu P, et al. Prognostic factors after percutaneous radiofrequency ablation in the treatment of hepatocellular carcinoma [J]. Impact of Incomplete Ablation on Recurrence and Overall Survival Rates. J Gastrointest Liver Dis, 2018, 27(4): 399-407.
- [5] 贾振宇,陈奇峰,吴文涛,等. 肝脏肿瘤微波消融后的 MRI 信号演变解读[J]. 介入放射学杂志,2017,26(4):324-328.
- [6] 阳宁静,宋斌. 介入治疗有效肝癌术后 MRI 信号的动态定量观测[J]. 成都医学院学报,2016,11(5):597-601.
- [7] Sainani NI, Gervais DA, Mueller PR, et al. Imaging after percutaneous radiofrequency ablation of hepatic tumors: Part 1, Normal findings [J]. AJR, 2013, 200(1): 184-193.
- [8] Sainani NI, Gervais DA, Mueller PR, et al. Imaging after percutaneous radiofrequency ablation of hepatic tumors: Part 2, Abnormal findings [J]. AJR, 2013, 200(1): 194-204.
- [9] 袁新伟,马秀现,朱荣涛,等. 肝癌射频消融术后残余瘤影像学评估的研究进展[J]. 世界华人消化杂志,2016,24(10):1539-1544.
- [10] 熊瑜琦,蒋莉莉. 射频消融治疗原发性肝细胞癌患者的 MRI 影像变化研究[J]. 实用肿瘤杂志,2019,34(1):39-42.
- [11] Keller S, Chapiro J, Brangsch J, et al. Quantitative MRI for assessment of treatment outcomes in a rabbit VX2 hepatic tumor model [J]. J Magn Reson Imaging, 2020, 52(3): 668-685.
- [12] 周彬彬,孙姚晨,黄海帆,等. TACE 术后肝细胞癌患者功能磁共振成像参数变化研究[J]. 实用肝脏病杂志,2020,23(5):723-726.
- [13] 陈智慧,张昌艳,彭勇,等. MRI 扩散加权成像对肝细胞癌病理分级的预测价值分析[J]. 中国数字医学,2020,15(4):92-95.
- [14] 周围,陈晓巧,周园园,等. 磁共振 Dixon 技术全肝脂肪定量与肝穿活检结果比较[J]. 医学影像学杂志,2018,28(5):775-780.
- [15] 曾文彦,庄娘妥,刘洪芳,等. 3.0T 磁共振 IDEAL-IQ 序列 R₂* 值评估原发性肝细胞癌分化程度的价值[J]. 国际医药卫生导报,2019,25(8):1226-1231.
- [16] Vogl TJ, Nour-Eldin NA, Hammerstingl RM, et al. Microwave ablation (MWA): basics, technique and results in primary and metastatic liver neoplasms-review article [J]. Rofo, 2017, 189(11): 1055-1066.
- [17] Yang W, Wang W, Liu B, et al. Immunomodulation characteristics by thermal ablation therapy in cancer patients [J]. Asia Pac J Clin Oncol, 2018, 14(5): 490-497.
- [18] Gemeinhardt O, Poch FG, Hiebl B, et al. Comparison of bipolar radiofrequency ablation zones in an in vivo porcine model: Correlation of histology and gross pathological findings [J]. Clin Hemorheol Microcirc, 2016, 64(3): 491-499.
- [19] Ou HY, Cheng YF, Chuang YH, et al. Quantification of functional MR predicts early response in post-doxorubicin drug-eluting beads chemoembolization for hepatocellular carcinoma [J]. Dig Dis Sci, 2020, 65(8): 2433-2441.
- [20] 杨凡,陈小军,石海,等. 磁共振 ADC 值逐步分析法对原发性肝癌射频消融疗效的预测价值[J]. 医学影像学杂志,2020,30(4):624-628.
- [21] Heerink WJ, Solouki AM, Vliegthart R, et al. The relationship between applied energy and ablation zone volume in patients with hepatocellular carcinoma and colorectal liver metastasis [J]. Eur Radiol, 2018, 28(8): 3228-3236.
- [22] Wang XR, Gao HJ, Wu SC, et al. Numerical evaluation of ablation zone under different tip temperatures during radiofrequency ablation [J]. Math Biosci Eng, 2019, 16(4): 2514-2531.

(收稿日期:2020-09-28)