

剪切波弹性成像评估正常兔肝微波消融效果的实验研究

张植兰¹, 符叶柳¹, 陈列¹, 李忠举¹, 朱才义², 张江山³

摘要 **目的** 探讨剪切波弹性成像(SWE)在评估正常兔肝微波消融效果中的应用价值。**方法** 选取正常兔肝为实验对象,分左、右肝叶进行消融参数探索:左肝叶消融参数分别为功率25 W、时间2 min,功率30 W、时间45 s,功率30 W、时间1 min;右肝叶消融参数分别为功率30 W、时间2 min,功率35 W、时间1 min,功率40 W、时间45 s。通过预实验选取大体病理标本消融区范围完整且趋于圆形的消融参数进行肝微波消融术;术前及术后即刻应用SWE测量左、右肝叶消融区大小即最大径及其垂直径线,以及消融区中心(a点)、边界(b点)、边界以外5.0 mm处正常肝脏组织(c点)3个位置杨氏模量平均值(E_{mean});同时应用超声造影测量左、右肝叶消融区最大径及其垂直径线;比较SWE、超声造影及大体标本测量的左、右肝叶消融区最大径及其垂直径线。取a、b、c点组织标本进行HE染色及NADH黄递酶组织化学染色,半定量分析左、右肝叶a、b、c点NADH黄递酶表达的颗粒数量及累积光密度值(IOD);分析左、右肝叶a、b、c点E_{mean}与NADH黄递酶表达的颗粒数量及IOD的相关性;以HE染色病理结果为金标准,绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析E_{mean}判定b点组织凝固性坏死的截断值。**结果** 左肝叶功率30 W、时间45 s,右肝叶功率35 W、时间1 min时大体标本完整且更趋于圆形,故以此作为本实验的消融参数。共90个有效消融区,其中位于左肝叶38个,右肝叶52个;SWE、超声造影及术后大体标本测量的左、右肝叶消融区最大径及其垂直径线比较差异均无统计学意义。左、右肝叶术后a、b点E_{mean}均高于术前,差异均有统计学意义(均 $P<0.001$);c点E_{mean}术前、后比较差异无统计学意义。左、右肝叶术后E_{mean}均以针道为中心向外递减,a、b、c点E_{mean}两两比较差异均有统计学意义(均 $P<0.001$);左、右肝叶术后b点E_{mean}比较差异无统计学意义。左、右肝叶a、b、c点E_{mean}与NADH黄递酶表达的颗粒数量、IOD均呈负相关($r=-0.733$ 、 -0.701 、 -0.721 、 -0.689 ,均 $P<0.001$)。ROC曲线分析显示,当E_{mean}截断值为22.31 kPa时,判定b点组织凝固性坏死的曲线下面积为0.828(95%可信区间:0.740~0.917, $P<0.001$)。**结论** SWE能准确评估正常兔肝微波消融术后消融区大小,反映其组织硬度变化,当E_{mean}为22.31 kPa时提示兔肝细胞失活,组织发生凝固性坏死;其有望成为微波消融术后监测的有效手段。

关键词 剪切波弹性成像;超声检查;造影剂;微波消融;活体肝,正常兔

[中图分类号]R445.1;R-33

[文献标识码]A

Experimental study on the evaluation of microwave ablation efficacy in normal rabbit liver by shear wave elastography

ZHANG Zhilan¹, FU Yeliu¹, CHEN Lie¹, LI Zhongju¹, ZHU Caiyi², ZHANG Jiangshan³

1.Department of Ultrasound Medicine, 3.Department of Neurology, Haikou Affiliated Hospital of Central South University Xiangya School of Medicine, Haikou 570208, China. 2.Department of Ultrasound, Bao'an Center Hospital of Shenzhen, Shenzhen 518100, China

ABSTRACT **Objective** To explore the application value of shear wave elastography (SWE) in evaluating the microwave ablation efficacy in normal rabbit liver. **Methods** The normal rabbit liver was selected as the experimental subject, with ablation parameter exploration conducted separately in the left and right hepatic lobes. The ablation parameters applied to left hepatic lobes were power 25 W for 2 min, power 30 W for 45 s, power 30 W for 1 min, respectively, and the ablation

parameters applied to right hepatic lobes were power 30 W for 2 min, power 35 W for 1 min, power 40 W for 45 s, respectively. The ablation parameters for the liver were selected by preliminary experiments to achieve complete ablation zones with a near-circular shape in gross pathological specimens. SWE was used to measure the maximum diameter and perpendicular diameter of the ablation zones before and after ablation immediately, as well as the mean Young's modulus value (E_{mean}) at the center of the ablation zone (point a), the boundary of the ablation zone (point b), and normal liver tissue 5.0 mm beyond the boundary (point c). Contrast-enhanced ultrasound (CEUS) was used to measure the maximum diameter and perpendicular diameter of the ablation zones in the left and right hepatic lobes. The differences in the maximum diameter and perpendicular diameter of the ablation zones measured by SWE, CEUS, and gross specimens were compared. After the experiment, tissue samples from points a, b, c were examined by HE staining and NADH-diaphorase histochemical staining. Semi-quantitative analysis was performed to assess the number of NADH-diaphorase-positive granules and the integrated optical density (IOD). The correlation between E_{mean} of left and right hepatic lobes at points a, b, c and the number of NADH-diaphorase-positive granules and IOD were analyzed. Taking HE-stained pathological results as the gold standard, receiver operating characteristic (ROC) curve was drawn to analyze the E_{mean} cutoff value for coagulative necrosis at point b (tissue coagulative necrosis). **Results** Preliminary experiments showed that an ablation power 30 W for 45 s in left hepatic lobes and an ablation power 35 W for 1 min in right hepatic lobes produced complete and nearly circular ablation zones, which were selected as the experimental parameters. A total of 90 effective ablation zones were obtained (38 in left hepatic lobes, 52 in right hepatic lobes). There were no significant differences in the maximum diameter and perpendicular diameter of the ablation zones measured by SWE, CEUS, and gross specimens in left liver and right hepatic lobes. After ablation, the E_{mean} at points a and b increased significantly compared to those before ablation (all $P < 0.001$). There were no statistically significant differences in E_{mean} of left and right hepatic lobes at point c between pre-ablation and post-ablation. The E_{mean} of left and right hepatic lobes ablation zones decreased outward centered on the needle track after ablation, and the differences in the E_{mean} at points a, b, and c were all statistically significant in pairwise comparisons (all $P < 0.001$). There was no statistically significant difference in the E_{mean} of left and right hepatic lobes at point b after ablation. The E_{mean} of left and right hepatic lobes at points a, b, c were negatively correlated with the number of NADH-diaphorase-positive granules and IOD ($r = -0.733, -0.701, -0.721, -0.689$, all $P < 0.001$). ROC curve analysis showed that the E_{mean} cutoff value of 22.31 kPa for determining tissue coagulative necrosis at point b yielded an area under the curve of 0.828 (95% confidence interval: 0.740~0.917, $P < 0.001$). **Conclusion** SWE can effectively assess the ablation size and tissue stiffness changes in normal rabbit liver after microwave ablation. The E_{mean} of 22.31 kPa indicates cell inactivation and tissue coagulative necrosis, suggesting its potential as an effective monitoring tool after microwave ablation.

KEY WORDS Shear wave elastography; Ultrasonography; Contrast agent; Microwave ablation; Live liver, normal rabbits

原发性肝癌 (hepatocellular carcinoma, HCC) 作为我国重大公共卫生问题, 其发病率居恶性肿瘤第 4 位, 致死率居第 2 位。近期流行病学数据^[1]显示, 我国 HCC 新发病例占全球肝脏肿瘤的 45%~50%, 严重威胁国民健康。微波消融作为 HCC 局部治疗的优选方案, 其核心在于精准控制消融范围——既需完整覆盖肿瘤及 ≥ 5 mm 瘤周安全边界, 又要规避邻近重要脏器损伤。然而临床实践中, 这种“治疗安全窗”的精准把控仍面临重大挑战。超声造影是目前消融术中常用的监测手段, 但其需经外周静脉注射造影剂, 存在造影剂过敏风险及肾功能评估要求, 一定程度上限制了其临床应用。剪切波弹性成像 (shear wave elastography, SWE) 凭借其实时定量测量组织硬度、无创可重复等优势, 目前已成为美国食品药品监督管理局认证的弹性成像技术。本课题组前期已开展系列探索性研究^[2-3], 证实了 SWE 可精准评估离体猪肝消融区空间分

布特征, 并确定离体器官模型中消融区边界组织凝固性坏死的杨氏模量平均值 (E_{mean}) 截断值为 22.5 kPa。然而, 上述研究仅局限于离体器官模型, 与活体组织复杂的血流动力学及代谢环境存在本质差异, 制约了临床转化价值。为此, 本实验拟建立活体正常兔肝微波消融模型, 重点解决两大问题: ①活体状态下消融区安全边界 E_{mean} 截断值的确定; ②SWE 用于活体微波消融效果评估的应用价值验证。

材料与方 法

一、实验动物

健康新西兰大白兔 30 只, 8~10 月龄, 雌雄不限, 体质量 3.45~4.76 kg, 平均 (4.00±0.67) kg, 均购于长沙市天勤生物技术有限公司, 许可证号: SCXK (湘) 2019-0015。本实验经动物伦理委员会批准 [批准号: 2018-(伦审)-132]。

二、主要实验试剂、仪器及器械

1. 主要实验试剂:麻醉剂使用1%戊巴比妥钠溶液(上海江莱生物科技有限公司)和速眠新Ⅱ(敦化市圣达动物药品有限公司);造影剂使用SonoVue(意大利博莱科公司)。

2. 主要实验仪器及器械:使用迈瑞 Resona 7 彩色多普勒超声诊断仪, L11-3U 线阵探头, 频率 3.0~11.0 MHz; 配有 SWE 及超声造影模式; 组织间实体瘤超声引导微波凝固治疗仪 (ECO-100C) 和一次性微波消融针 (ECO-100AI3) 均购自南京亿高医疗科技股份有限公司。

三、主要实验方法

1. 兔肝微波消融参数预实验优化: 基于兔肝解剖学特征 (左肝叶薄且呈多分叶结构, 右肝叶实质厚实), 本实验根据团队前期实验^[4]经验采用阶梯式参数筛选策略。预实验阶段共纳入 6 只新西兰大白兔, 分左、右肝叶进行消融参数探索: 左肝叶消融参数为功率 25 W、时间 2 min, 功率 30 W、时间 45 s, 功率 30 W、时间 1 min; 右肝叶消融参数为功率 30 W、时间 2 min, 功率 35 W、时间 1 min, 功率 40 W、时间 45 s。术后即刻解剖获取肝脏标本, 通过双盲法评估消融区形态学特征, 选取大体病理标本消融区范围完整且趋于圆形 (有效消融区标准) 的消融参数进行后续实验。

2. 兔肝微波消融方法: 将剩余的 24 只新西兰大白兔禁食、禁水 12 h 完成肠道准备, 术区 (左、右腋前线, 上至剑突下至耻骨联合) 剃毛后送至清洗间清洗并吹干, 麻醉实施采用阶梯诱导方案: 首先肌注速眠新Ⅱ (0.1 ml/kg) 达到镇静状态, 随后经耳缘静脉缓慢推注 1% 戊巴比妥钠溶液 (0.3 ml/kg), 观察兔角膜反射及疼痛刺激反应, 以角膜反射消失及疼痛刺激无反应作为麻醉深度达标的判定标准。将实验兔取仰卧位固定于防静电木制手术台, 持续监测呼吸频率及血氧饱和度等生命体征。于兔剑突下腹部正中做一“L”形切口, 逐层分离暴露肝十二指肠韧带。行术中超声扫描, 选择兔肝组织较厚且无大血管及胆管处为消融靶点, 插入微波消融针, 以预试验的消融参数进行微波消融术。

3. SWE 及超声造影检查: 术前启动 SWE, 弹性成像量程设定为 0~75 kPa, 机械指数 (MI) 为 1.0, 将取样框置于整个消融区, 设定直径为 2 mm 感兴趣区 (ROI), 当置信指数 >95% 时自动记录有效测量值。术前测量消融区中心 (a 点, 经二维超声评估确定)、边界 (b 点, 距中心约 5.5 mm 处)、边界以外 5.0 mm 处正常肝脏组织 (c 点) Emean; 术后再次启动 SWE 测量 a、b、c 点

Emean, 以及消融区最大径及其垂直径线。然后切换至超声造影模式, MI 为 0.071, 从兔耳缘静脉团注按说明书配制好的造影剂 0.5 ml, 再以 1.0 ml 生理盐水冲管, 观察消融区的灌注情况, 测量无灌注区域最大径及其垂直径线。以上操作均由 2 名具有 5 年以上操作经验的超声医师完成, 所有数据均重复测量 3 次取平均值。

4. 病理检查: 完成上述检测后经规范空气栓塞法处死实验兔, 完整摘取肝脏标本, 于二维超声引导下沿消融区最大径平面进行精准切面剖解, 测量其最大径及其垂直径线, 分别于 a、b、c 点采集代表性组织样本进行 HE 染色及 NADH 黄递酶组织化学染色对组织坏死程度进行半定量分析, 于 400 倍视野下, 每张 NADH 黄递酶组织化学染色冰冻切片随机选取 10 个视野, 利用 Image-Plus 6.0 图像分析软件定量测量 a、b、c 点 NADH 黄递酶表达的颗粒数量及累积光密度值 (IOD)。

四、统计学处理

应用 SPSS 22.0 统计软件进行数据分析。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 多组比较采用单因素方差分析; 两两比较采用 *t* 检验。相关性分析采用直线回归分析, 对回归系数采用随机区组方差分析。以病理结果为金标准, 绘制受试者工作特征 (ROC) 曲线分析 Emean 判定 b 点组织凝固性坏死的截断值。P < 0.05 为差异有统计学意义。

结 果

预实验结果显示, 左肝叶采用功率 30 W、时间 45 s, 右肝叶采用功率 35 W、时间 1 min 时大体标本消融区范围完整且更趋于圆形, 故以此作为本实验的消融参数。见图 1。本实验共 136 个消融区, 其中有效消融区 90 个 (左肝叶 38 个, 右肝叶 52 个)。

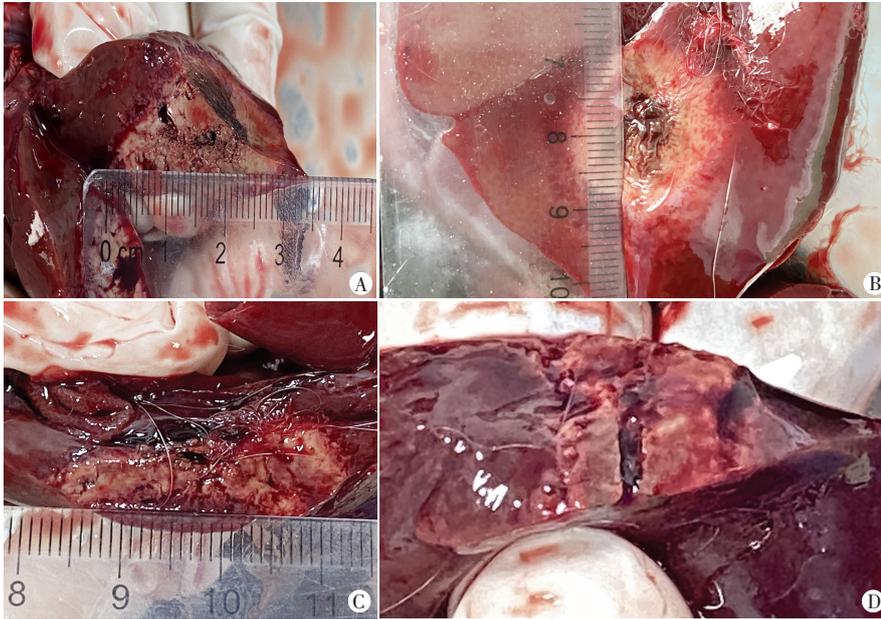
一、左、右肝叶术前、后 a、b、c 点 Emean 比较

左、右肝叶术后 a、b 点 Emean 均高于术前, 差异均有统计学意义 (均 P < 0.001); c 点 Emean 术前、后比较差异无统计学意义。左、右肝叶术后 Emean 均以针道为中心向外递减, a、b、c 点 Emean 两两比较差异均有统计学意义 (均 P < 0.001); 左、右肝叶术后 b 点 Emean 比较差异无统计学意义。见表 1 和图 2。

二、左、右肝叶术后 a、b、c 点病理结果

左、右肝叶术后 a、b、c 点 NADH 黄递酶表达的颗粒数量及 IOD 两两比较差异均有统计学意义 (均 P < 0.001)。见表 2, 3。正常兔肝术后 a、b、c 点病理图见图 3。

三、正常兔肝术后 a、b、c 点 Emean 与 NADH 黄递



A: 右肝叶消融功率45 W,时间45 s; B: 右肝叶消融功率35 W,时间1 min; C: 左肝叶消融功率25 W,时间2 min; D: 左肝叶消融功率30 W,时间45 s

图1 不同消融参数下正常兔肝大体标本图

表1 左、右肝叶术前、后a、b、c点E_{mean}比较($\bar{x}\pm s$) kPa

分类	a点	b点	c点	F值	P值
左肝叶					
术前	8.02±0.26	8.09±0.35	8.05±0.45	0.366	0.694
术后	98.70±6.58*	20.52±3.34*	8.35±0.83	4928.589	<0.001
右肝叶					
术前	8.02±0.13	8.04±0.17	8.07±0.15	0.532	0.550
术后	103.64±8.21*	22.27±2.55*	8.61±0.23	5612.752	<0.001

与同一肝叶术前比较, *P<0.001

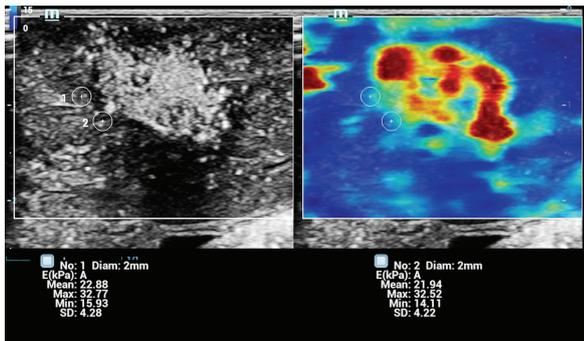
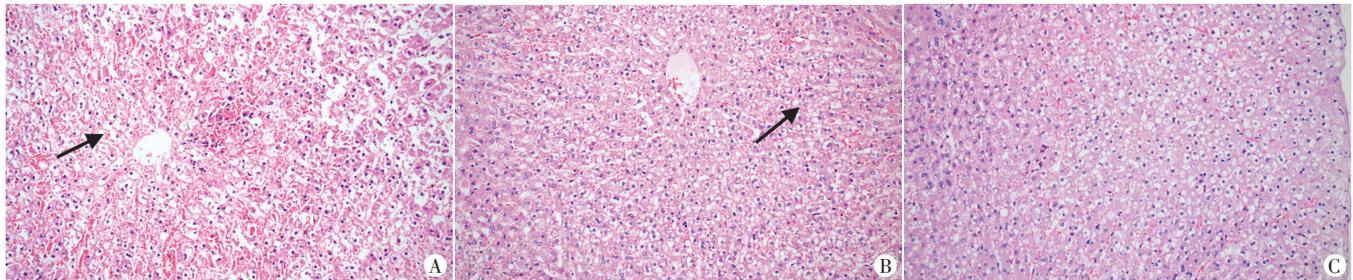


图2 右肝叶术后b点E_{mean}测量图



A: 病理图示a点细胞核固缩性凝固性坏死, 见较多鬼影细胞(箭头示); B: 病理图示b点部分组织凝固性坏死, 部分充血水肿(箭头示); C: 病理图示c点正常肝组织

图3 正常兔肝术后a、b、c点病理图(HE染色, ×200)

酶表达的颗粒数量、E_{mean}与IOD的相关性分析

左肝叶术后a、b、c点E_{mean}与NADH黄递酶表达的颗粒数量、IOD呈负相关($r=-0.733, -0.701$, 均 $P<0.001$); 右肝叶术后a、b、c点E_{mean}与NADH黄递酶表达的颗粒数量、IOD呈负相关($r=-0.721, -0.689$, 均 $P<0.001$)。见图4, 5。

四、术后SWE、超声造影及大体标本测量的左、右肝叶消融区最大径及其垂直径比较

SWE、超声造影及大体标本测量的左、右肝叶消融区最大径及其垂直径比较差异均无统计学意义。见图6和表4。

五、ROC曲线分析

由于左、右肝叶术后b点E_{mean}比较差异无统计学意义, 故将左、右肝叶b点数据合并, ROC曲线分析显示, 当E_{mean}截断值为22.31 kPa时, 判定b点组织凝固性坏死的曲线下面积为0.828(95%可信区间: 0.740~0.917, $P<0.001$), 灵敏度和特异度分别为81.6%、78.9%。见图7。

表2 左、右肝叶术后a、b、c点NADH黄递酶表达的颗粒数量比较($\bar{x}\pm s$)

分类	a点	b点	c点	F值	P值
左肝叶	258.05±24.84	750.77±114.73	1352.85±286.61	357.294	<0.001
右肝叶	175.61±22.63 [#]	749.94±109.17	1349.81±339.27	432.637	<0.001

与左肝叶比较, [#]P<0.001

表3 左、右肝叶术后a、b、c点IOD比较($\bar{x}\pm s$)

分类	a点	b点	c点	F值	P值
左肝叶	710.87±106.98	2842.09±570.29	4303.59±717.37	437.135	<0.001
右肝叶	528.29±91.12 [#]	2856.29±524.36	4307.95±785.92	629.495	<0.001

与左肝叶比较, [#]P<0.001

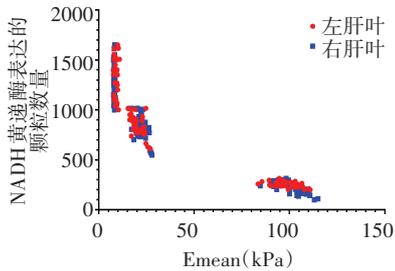


图4 左、右肝叶术后a、b、c点Emean与NADH黄递酶表达的颗粒数量的相关性分析散点图

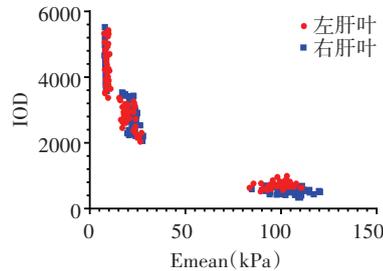
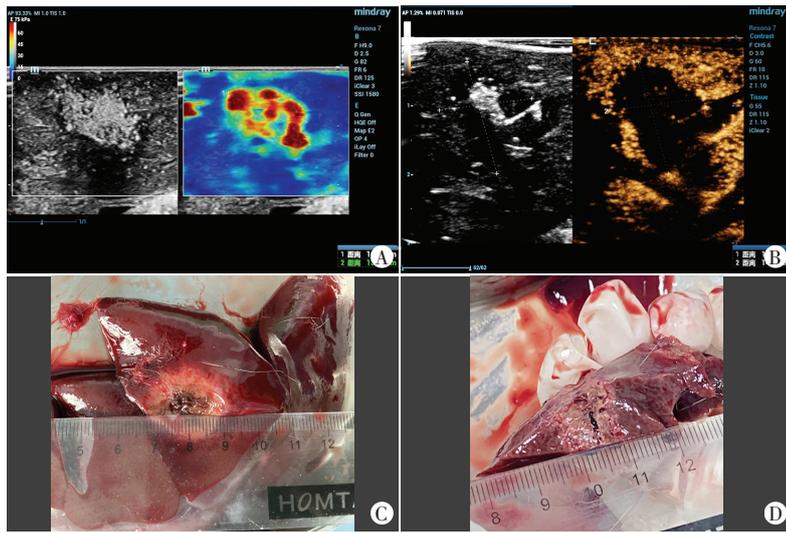


图5 左、右肝叶术后a、b、c点Emean与IOD的相关性分析散点图



A: SWE测量消融区最大径及其垂直径线分别为16.9 mm、13.7 mm; B: 超声造影测量消融区最大径及其垂直径线分别为16.9 mm、14.2 mm; C、D: 大体标本测量消融区最大径及其垂直径线分别为17.1 mm、13.7 mm

图6 同一正常兔左肝叶消融区最大径及其垂直径线SWE、超声造影及大体标本测量图

表4 消融术后SWE、超声造影及大体标本测量的左、右肝叶消融区最大径及其垂直径比较($\bar{x} \pm s$) mm

方法	左肝叶		右肝叶	
	最大径	垂直径线	最大径	垂直径线
大体标本	16.86±3.15	11.25±1.19	20.47±2.85	14.04±2.03
SWE	16.73±2.97	11.51±1.43	21.29±3.87	13.63±2.69
超声造影	17.09±3.25	11.17±1.47	20.76±3.10	14.05±2.59
F值	0.368	0.535	0.892	0.825
P值	0.693	0.587	0.412	0.440

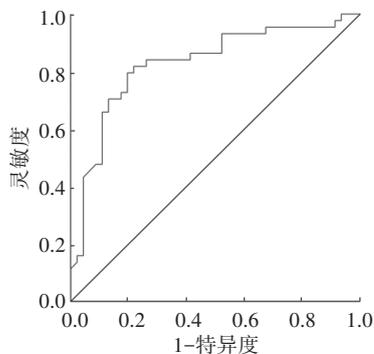


图7 Emean判定b点组织凝固性坏死的ROC曲线图

讨论

根据国家癌症中心2022年统计数据^[5]显示,我国新发恶性肿瘤病例约482.47万例,其中HCC 36.77万例(发病率居第4位),相关死亡病例31.65万例(占恶性肿瘤总死亡数的12.3%),死亡率居第2位。当前肝癌治疗策略涵盖手术切除、消融治疗、肝移植、血管介入、系统抗肿瘤治疗、放疗及中医药疗法,其中手术切除仍被视为根治性治疗金标准。然而,流行病学数据^[6]显示,约52%的HCC患者合并乙型病毒性肝炎相关肝硬化,此类患者常因肝脏代偿功能减退及解剖结构异常失去手术机会。鉴于此,具备微创性及肝功能保护优势的肿瘤消融技术已被纳入原发性肝癌诊疗指南(2022、2024版)和中国肝癌规范诊疗质量控制指标(2022版)^[7-9],成为重要替代治疗方案。消融治疗通过热力学或化学效应诱导肿瘤细胞不可逆损伤^[10],主要包括射频消融、微波消融、无水乙醇注射、冷冻消融、高强度聚焦超声、激光消融及不可逆电穿孔等。其中微波消融凭借以下核心优势占据重要地位:①热效率较射频消融提高30%~50%,显著缩短消融时间;②辐射状热场分布可减少血管热沉效应,提升消融区均质化程度^[11]。影像引导是消融治疗的关键,超声因其实时、价廉及无辐射等优势,成为经皮微波消融的首选影像引导方式。根据相关指南^[7-9]规范,消融范围需覆盖瘤周5.0 mm安全边界,尤其邻近肝门结构的病灶需实时监测热场扩展。但传统二维超声易受伪影干扰,术中显影率下降50%~70%^[12-13];超声造影虽被推荐为术中监测方法,仍存在局限性:①需注射造影剂,可能引发过敏反应(发生率0.01%~0.1%);②微泡稳定性不足导致显影时间短暂(通常<5 min),限制重复评估^[14]。SWE作为新兴生物力学评估技术,通过定量检测组织Emean,可精确区分消融区(凝固性坏死)与存活组织的力学差异^[15]。本实验通过建立活体正常兔肝微波消融模型,比较SWE与超声造影在微波消融术后即刻评估消融区大小的一致性,并绘制ROC曲线获取SWE判定消融边界组织凝固性坏死的截断值,旨在为临床实现无创、实时、量化消融监测提供实验依据。

本实验为了探讨SWE评估消融区范围的可重复性,根据肝脏解剖学特点分为左、右肝叶进行微波消融,结果显示术后即刻左、右肝叶a、b、c点Emean两两比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$),且左、右肝叶

术后 Emean 均以针道为中心,呈从 a 点至 c 点递减的梯度分布。进一步分析发现,左、右肝叶术后 a、b 点 Emean 均较术前基线水平显著升高(均 $P < 0.001$),而 c 点术前、后比较差异无统计学意义。分析原因可能与微波消融瞬时高温导致肝组织凝固性坏死甚至中心碳化有关,与既往研究^[16]报道一致,提示 SWE 可通过组织硬度变化客观评估消融范围。另外,本实验结果显示,左、右肝叶术后 b 点 Emean 比较差异无统计学意义,与魏珊等^[17]研究结果一致,表明 SWE 检测的稳定性不受病灶大小影响,适用于不同体积肿瘤的术中监测。为了更精准评估细胞坏死程度,本实验在常规 HE 染色基础上,进一步采用 NADH 黄递酶组织化学染色进行半定量分析,其较 HE 染色能更确切地反映术后即刻细胞的坏死程度^[4,18],结果显示左、右肝叶术后 a、b、c 点 NADH 黄递酶表达的颗粒数量及 IOD 两两比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$);且左、右肝叶术后 a、b、c 点 Emean 与 NADH 黄递酶表达的颗粒数量、IOD 均呈负相关($r = -0.733$ 、 -0.701 、 -0.721 、 -0.689 ,均 $P < 0.001$)。与朱惠娟和朱才义^[19]研究结果一致,从病理学层面证实 b 点可作为消融区边界,且 SWE 检测的组织硬度与细胞损伤程度具有一定关联。本实验基于病理学“金标准”,通过 ROC 曲线分析获取 Emean 判定 b 点组织凝固性坏死的截断值为 22.31 kPa,该值与既往研究^[17,20]结果相近。此外,本实验结果显示,SWE、超声造影与大体标本测量的左、右肝叶消融区最大径及其垂直径线比较差异均无统计学意义,提示 SWE 评估术后即刻消融区范围与超声造影一致,且均具有较高的准确性。

本研究的局限性:①实验模型采用正常肝组织样本,与肝硬化继发性肝癌的病理微环境存在本质差异,肝硬化背景下肝窦毛细血管化及纤维间隔形成导致的组织异质性,可能对 Emean 截断值的判定产生系统偏移;②动物实验到临床应用存在生物力学特征转化瓶颈。虽然兔肝微波消融模型具有均质化优势,但人体肝脏消融区复杂的细胞外基质重构及病灶异质性,要求通过多中心临床试验建立 SWE 参数的诊断截断值体系。建议后续研究需重点构建肝硬化-肝癌序贯模型,并通过前瞻性队列验证 SWE 参数的病理特异性。

综上所述,SWE 能准确评估兔肝微波消融后的消融区大小,反映其组织的硬度变化,当 Emean 为 22.31 kPa 时表明兔肝细胞失活,组织凝固性坏死;其有望成为微波消融术后监测的有效手段。

参考文献

[1] Sung H, Ferlay J, Siegel RL, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36

Cancers in 185 Countries [J]. CA Cancer J Clin, 2021, 71 (3): 209-249.

[2] 黄浪,张植兰,朱才义.超高速剪切波弹性成像对离体猪肝微波消融效果的评价研究[J].临床超声医学杂志,2016,18(2):73-76.

[3] 张植兰,朱才义,马春燕.剪切波弹性成像评价离体猪肝微波消融实验的初步研究[J].中国医学影像学杂志,2016,24(9):650-653,657.

[4] 朱惠娟,魏珊,朱才义.微波消融灶组织病理变化和超声弹性成像图对比分析[J].中国全科医学,2017,21(s3):408-409.

[5] Zheng RS, Chen R, Han BF, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022 [J]. Zhonghua Zhong Liu Za Zhi, 2024, 46(3):221-231.

[6] 陈倩倩,芮法娟,倪文婧,等.原发性肝癌的流行病学及其危险因素研究进展[J].中国全科医学,2024,27(6):637-642.

[7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会医政医管局.原发性肝癌诊疗指南(2022年版)[J].中华消化外科杂志,2022,21(2):143-168.

[8] 中华人民共和国国家卫生健康委员会医政司.原发性肝癌诊疗指南(2024年版)[J].中华肝脏病杂志,2024,32(7):581-630.

[9] 国家癌症中心,国家肿瘤质控中心肝癌质控专家委员会.中国肝癌规范诊疗质量控制指标(2022版)[J].中华肿瘤杂志,2022,44(7):600-608.

[10] Leuchte K, Staib E, Thelen M, et al. Microwave ablation enhances tumor-specific immune response in patients with hepatocellular carcinoma [J]. Cancer Immunol Immunother, 2021, 70(4):893-907.

[11] Knapen R, Korenblik R, James S, et al. The effect of microwave and radiofrequency ablation (MWA/RFA) on liver volume in patients with primary and secondary liver tumours: a retrospective analysis [J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2023, 46(8):991-999.

[12] Guo Q, Yu Y, Ye R, et al. Clinical value of CEUS with tumour marker monitoring in evaluating the prognosis of HCC after MWA [J]. Adv Med Sci, 2025, 70(1):79-85.

[13] Lekht I, Gulati M, Nayyar M, et al. Role of contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in evaluation of thermal ablation zone [J]. Abdom Radiol (NY), 2016, 41(8):1511-1521.

[14] Shi L, Li X, Liao W, et al. Real-time elastography versus shear wave elastography on evaluating the timely radiofrequency ablation effect of rabbit liver: a preliminary experimental study [J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(6):1145.

[15] Luo C, Li T, Li Z, et al. Evaluation of microwave ablation efficacy by strain elastography and shear wave elastography in ex vivo porcine liver [J]. Ultrasound Med Biol, 2021, 47(9):2636-2645.

[16] Bo XW, Li XL, Xu HX, et al. 2D shear-wave ultrasound elastography (SWE) evaluation of ablation zone following radiofrequency ablation of liver lesions: is it more accurate? [J]. Br J Radiol, 2016, 89(1060):20150852.

[17] 魏珊,田超,林小影,等.剪切波弹性成像评价肝脏微波消融灶边界的实验研究[J].中华医学超声杂志(电子版),2019,16(2):147-153.

[18] 刘大全,吕明德,谭进富,等.不同温度微波消融肝癌效果的酶组织化学检测[J].南方医科大学学报,2006,26(8):1149-1151.

[19] 朱惠娟,朱才义.剪切波弹性成像定量评估微波消融活体兔肝热损伤的实验研究[J].海南医学,2020,31(20):2585-2588.

[20] Mariani A, Kwiecinski W, Pernot M, et al. Real time shear waves elastography monitoring of thermal ablation: in vivo evaluation in pig livers [J]. J Surg Res, 2014, 188(1):37-43.

(收稿日期:2024-05-17)