·临床研究·

基于 HCC 患者 TACE 前 DCE-MRI 减影参数构建决策树模型预测其疗效的价值

缪纤儿，李辉，徐双月

【摘要】目的 探讨基于原发性肝细胞癌（HCC）患者经动脉化疗栓塞术（TACE）前动态增强磁共振成像（DCE-MRI）减影参数构建决策树模型预测 TACE 疗效的价值。**方法** 本研究为回顾性病例对照研究。收集 2023 年 1 月至 2024 年 12 月丽水市人民医院收治的行 TACE 治疗的 HCC 患者 126 例，根据术后疗效评估分为有效组（n=79）和无效组（n=47）。采用二元 Logistic 回归分析影响因素，建立决策树模型并经受试者工作特征（ROC）曲线分析预测效能。**结果** 肿瘤最大径、有门静脉癌栓、门静脉期对比噪声比（CNR）、容积转运常数（Ktrans）及组织间隙-血浆速率常数（Kep）均是影响 HCC 患者 TACE 疗效的独立危险因素（均 $P < 0.05$）。影响 HCC 患者 TACE 疗效的决策树模型共 4 层，6 个节点，模型选择了肿瘤最大径、有无门静脉癌栓、门静脉期 CNR、Ktrans、Kep 五个解释变量，其中以 Ktrans 为 HCC 患者 TACE 疗效最为重要的影响因素。决策树模型的 ROC 曲线下面积（AUC）为 0.860（$P < 0.05$），取临界值时，对应的敏感度为 0.809，特异度为 0.810。Delong 检验显示决策树模型的 AUC 高于各单项影响因素（均 $P < 0.05$）。**结论** 基于 TACE 前 DCE-MRI 减影参数的决策树模型能有效预测 HCC 患者 TACE 疗效，为临床个体化治疗提供依据。

【关键词】 肝细胞癌；肝动脉化疗栓塞术；核磁共振成像；模型
DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.04.007
【中图分类号】 R735.7；R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-0800(2026)04-0372-04

经导管肝动脉化疗栓塞术（transcatheter arterial chemoembolization，TACE）是中晚期原发性肝细胞癌（hepatocellular carcinoma，HCC）的标准治疗手段之一，其疗效存在显著个体异质性[1]。因此，术前精准预测 TACE 疗效对优化治疗策略、改善患者预后至关重要。目前疗效评估多依赖临床分期系统或实验室指标，难以反映肿瘤生物学行为及微环境特征[2]。磁共振成像等影像学技术通过评估肿瘤血供、坏死程度等辅助疗效判断，存在一定主观性且缺乏量化标准[3]。动态对比增强磁共振成像（dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging，DCE-MRI）可定量分析肿瘤血流灌注，为术前评估提供功能影像依据[4]。决策树模型作为一种直观高效的机器学习方法，在医学预测中具有独特优势[5]。本研究拟基于 TACE 前 DCE-MRI 减影参数构建决策树模型，探讨其预测 HCC 患者 TACE 疗效的价值，报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究为回顾性病例对照研究。收集 2023 年 1 月至 2024 年 12 月丽水市人民医院收治的行 TACE 治疗的 HCC 患者 126 例，纳入标准：（1）经病理学检查确诊为 HCC，（2）首次接受经股动脉入路 TACE 治疗，（3）临床资料完整，（4）TACE 治疗前 1 周内完成 DCE-MRI 检查。排除标准：（1）合并其他恶性肿瘤者，（2）既往接受过抗肿瘤治疗者，（3）存在 MRI 检查禁忌证者，（4）图像质量不佳影响分析者。本研究获得丽水市人民医院科研伦理委员会批准（伦理号：2025-08-06），免除/豁免知情同意。

TACE 术后 1 个月采用改良实体瘤反应评估标准（modified RECIST，mRECIST）[6]进行疗效评价，其中有效 79 例（完全缓解+部分缓解，有效组），无效 47 例（病情稳定或进展，无效组）。

1.2 方法

1.2.1 资料收集 从医院电子病历信息系统收集患者一般资料，包括患者基本信息，如性别、年龄、体质量指数（BMI）及 Child-Pugh 分级等；肿瘤特征，如肿瘤最大径、肿瘤数目、肿瘤位置、有无门静脉癌栓及有无肝外转移等；实验室检查指标，如甲胎蛋白（AFP）、丙氨酸氨基转移酶（ALT）、总胆红素（TBIL）及血小板计数（PLT）。

1.2.2 DCE-MRI 影像 采用 GE SIGNA HDx 3.0 T

作者单位： 323000 丽水，丽水市人民医院
通信作者： 缪纤儿，Email：15067570593@163.com

MRI 扫描仪，患者检查前禁食 2 ～ 4 h。扫描时取仰卧位，双臂上举固定，配备 8 通道相控阵体部线圈行全肝覆盖扫描。肝脏容积快速采集成像（liver acquisition with volume acceleration，LAVA）序列扫描，采集常规 MRI、DCE-MRI。LAVA 序列参数：重复时间（TR）/回波时间（TE）为 3.5 ms/1.5 ms，层厚 5 mm、层距 2 mm（46 ～ 64 层），FOV 400 mm× 320 mm，矩阵 128×128，经高压注射器静脉团注钆贝葡胺（0.1 mmol/kg，注射速率 2.0 ml/s）后同步采集腹主动脉时间-信号曲线作为动脉输入函数（arterial input function，AIF），启动 5 期动态扫描（单期 15 s），包括蒙片、动脉期（30 s）、门静脉期（60 s）、平衡期（100 s）与延迟期（150 s）。图像后处理通过蒙片减影技术消除背景干扰，手动勾画肿瘤感兴趣区（region of Interest，ROI）计算动脉期/门静脉期对比噪声比（contrast-to-noise ratio，CNR），并采用 Tofts 双室单血供模型联合 AIF 拟合得出容积转运常数（volume transfer constant，Ktrans）、血浆容积分数（plasma volume fraction，Vp）及组织间隙-血浆速率常数（rate constant，Kep），所有参数计算均需满足信噪比＞ 10 且 ROI 重复测量组内相关系数＞ 0.85，扫描全程采用呼吸同步触发技术减少伪影。

为确保 DCE-MRI 参数测量的可靠性，由两名具有 5 年以上腹部影像诊断经验的放射科医师分别独立完成所有患者 ROI 勾画与参数提取，并进行观察者间一致性评估。对连续两次测量结果进行组内相关系数（*ICC*）分析，结果显示各参数观察者间 *ICC* 值均大于 0.85，表明测量结果具有良好的一致性。

1.3　统计方法　数据采用 SPSS 26.0 软件分析，计数资料以例数表示，采用 χ^2 检验。采用二元 Logistic 回归分析并进行共线性诊断，分析影响 TACE 疗效的独立危险因素。依据多因素分析结果，构建影响 HCC 患者 TACE 疗效的决策树模型；通过绘制受试者工作特征（ROC）曲线，分析各独立危险因素与决策树模型在预测 HCC 患者 TACE 疗效方面的效能。$P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2　结果

2.1　影响 HCC 患者 TACE 疗效的单因素分析　分析显示，两组肿瘤最大径、有无门静脉癌栓、AFP、门静脉期 CNR、Ktrans 及 Kep 差异均有统计学意义（均 $P < 0.05$），见表 1。

2.2　影响 HCC 患者 TACE 疗效的多因素分析　以 HCC 患者 TACE 疗效为因变量，以肿瘤最大径、有无门静脉癌栓、AFP、门静脉期 CNR、Ktrans、Kep 为自变量并赋值，纳入二元 logistic 回归分析。结果显示，肿瘤最大径、有门静脉癌栓、门静脉期 CNR、Ktrans、Kep 均是影响 HCC 患者 TACE 疗效的独立

表 1　影响 HCC 患者 TACE 疗效的单因素分析　例

指标		无效组（n=47）	有效组（n=79）	χ^2 值	P 值
性别	男	25	45	0.17	＞ 0.05
	女	22	34		
年龄	≥60 岁	21	33	0.10	＞ 0.05
	＜ 60 岁	26	46		
BMI	≥25 kg/m^2	19	28	0.31	＞ 0.05
	＜ 25 kg/m^2	28	51		
Child-Pugh 分级	A 级	37	66	0.45	＞ 0.05
	B 级	10	13		
肿瘤最大径	≥5 cm	26	22	9.43	＜ 0.05
	＜ 5 cm	21	57		
肿瘤数目	≥2 个	18	27	0.21	＞ 0.05
	＜ 2 个	29	52		
肿瘤位置	肝左叶	28	43	0.37	＞ 0.05
	肝右叶	19	36		
门静脉癌栓	有	15	7	10.86	＜ 0.05
	无	32	72		
肝外转移	有	8	6	2.65	＞ 0.05
	无	39	73		
AFP	≥400 ng/ml	28	25	9.43	＜ 0.05
	＜ 400 ng/ml	19	54		
ALT	≥70 U/L	12	17	0.26	＞ 0.05
	＜ 70 U/L	35	62		
TBIL	≥30 μmol/L	11	16	0.17	＞ 0.05
	＜ 30 μmol/L	36	63		
PLT	≥100×10^9/L	14	21	0.15	＞ 0.05
	＜ 100×10^9/L	33	58		
动脉期 CNR	≥1.5	22	35	0.07	＞ 0.05
	＜ 1.5	25	44		
门静脉期 CNR	＜ 1.0	33	33	9.55	＜ 0.05
	≥1.0	14	46		
Ktrans	≥0.15/min	30	26	11.40	＜ 0.05
	＜ 0.15/min	17	53		
Vp	≥0.1	25	38	0.30	＞ 0.05
	＜ 0.1	22	41		
Kep	≥0.3/min	27	24	8.96	＜ 0.05
	＜ 0.3/min	20	55		

注：HCC 为肝细胞癌，TACE 为经导管肝动脉化疗栓塞术，BMI 为体质量指数，AFP 为甲胎蛋白，ALT 为丙氨酸氨基转移酶，TBIL 为总胆红素，PLT 为血小板计数，CNR 为对比噪声比，Ktrans 为容积转运常数，Vp 为血浆容积分数，Kep 为组织间隙-血浆速率常数

危险因素（均 $P < 0.05$）。5 个危险因素行共线性检验，*VIF* 均小于 5，提示无共线性，可纳入模型构建，见表 2。

2.3　决策树模型构建　以 HCC 患者 TACE 疗效为因变量，将多因素分析确定的 5 个独立预测变量纳入 SPSS 的 CRT 模块建模。结果显示，经过代价复杂度剪枝与交叉验证确定的最优决策树模型共包含 4 个层级和 6 个终端节点。其中，Ktrans 被选为根节点（首要分裂变量）。该模型的树状结构清晰地展示了从根节点到终端节点的分类规则，见封三图 1。模型在训练集上展现了良好的判别效能。

2.4　模型预测价值分析　各影响因素及决策树模型的 ROC 曲线下面积（*AUC*）分别为 0.637、0.615、0.642、0.655、0.635 及 0.860。取临界值时，对应的敏感度分别为 0.553、0.319、0.702、0.638、0.574 及 0.809，特异度分别为 0.722、0.911、0.582、0.671、0.696 及 0.810。对预测价值进行 Delong 检验，结果显示，决策树模型的 *AUC* 高于各单项影响因素（均 $P < 0.05$），见表 3 及图 1。

3　讨论

TACE 是 HCC 的重要治疗手段，但患者疗效存在显著异质性，部分患者可能出现肿瘤残留或早期进展[7]。准确预测 TACE 疗效对于优化个体化治疗策略、改善患者预后至关重要。DCE-MRI 减影技术可定量评估肿瘤血流动力学特征，其中 Ktrans、Kep 等参数能反映肿瘤血管通透性及灌注状态，而门静脉期 CNR 可间接提示肿瘤血供情况[8]。相较于传统计算机断层扫描或超声，DCE-MRI 通过动态增强序列捕捉肿瘤微循环的实时变化，其参数（如 Ktrans、Kep）直接关联肿瘤血管内皮功能及组织灌注水平[9]。

本研究通过决策树模型筛选出肿瘤最大径、门静脉癌栓、门静脉期 CNR、Ktrans 及 Kep 5 个独立预测因素，其中 Ktrans 作为首要节点变量，提示肿瘤血管通透性是影响 TACE 疗效的核心因素。Ktrans 反映肿瘤血管渗透性，其值升高通常提示新生血管丰富、血供活跃，而此类病灶在 TACE 治疗后更易因栓塞不完全或侧支循环形成导致疗效不佳[10]。肿瘤最大径对 TACE 疗效的影响可能通过多重机制实现：一方面，较大肿瘤往往存在中央坏死区，导致栓塞剂分布不均；另一方面，其血供来源更为复杂，常同时接受肝动脉及门静脉双重供血，使得单纯肝动脉栓塞难以实现完全去血管化[11]。门静脉癌栓的存在可能限制化疗药物在肿瘤内的均匀分布，同时增加肝内转移风险，进而降低 TACE 的局部控制率[12]。门静脉期 CNR 降低提示肿瘤与肝实质对比度差，可能反映病灶内

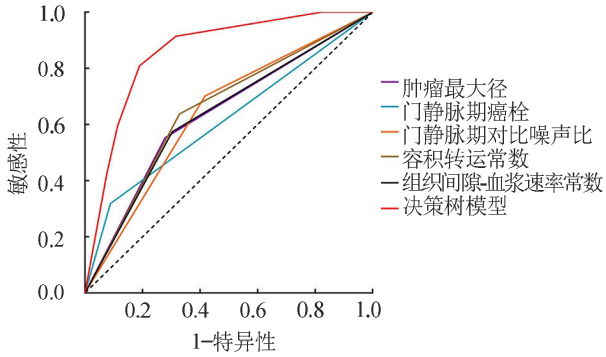


图 1　各项因素及决策树模型预测肝细胞患者经导管肝动脉化疗栓塞术治疗效果的 ROC 曲线

表 2　影响肝细胞癌患者经导管肝动脉化疗栓塞术疗效的多因素分析与共线性诊断

变量	*β* 值	*SE* 值	Wald χ^2 值	*P* 值	*OR* 值（95%*CI*）	*VIF* 值
肿瘤最大径	1.077	0.493	4.77	＜0.05	2.937（1.118 ～ 7.720）	1.062
门静脉癌栓	2.171	0.684	10.08	＜0.05	8.770（2.295 ～ 33.504）	1.029
甲胎蛋白	0.792	0.486	2.65	＞0.05	2.207（0.851 ～ 5.724）	—
门静脉期对比噪声比	2.002	0.546	13.41	＜0.05	7.401（2.536 ～ 21.599）	1.020
容积转运常数	1.438	0.507	8.02	＜0.05	4.212（1.558 ～ 11.388）	1.085
组织间隙-血浆速率常数	1.216	0.495	6.04	＜0.05	3.374（1.280 ～ 8.896）	1.052

表 3　ROC 曲线分析预测价值

指标	*AUC*	*SE 值*	*P* 值	95%*CI*	临界值	约登指数	敏感度	特异度
肿瘤最大径	0.637	0.052	＜0.05	0.535 ～ 0.739	0.500	0.275	0.553	0.722
门静脉癌栓	0.615	0.054	＜0.05	0.510 ～ 0.721	0.500	0.230	0.319	0.911
门静脉期对比噪声比	0.642	0.051	＜0.05	0.543 ～ 0.742	0.500	0.284	0.702	0.582
容积转运常数	0.655	0.051	＜0.05	0.555 ～ 0.754	0.500	0.309	0.638	0.671
组织间隙-血浆速率常数	0.635	0.052	＜0.05	0.534 ～ 0.737	0.500	0.270	0.574	0.696
决策树模型	0.860	0.034	＜0.05	0.794 ～ 0.926	0.479	0.619	0.809	0.810

纤维化或脂肪变性，这些改变会影响化疗药物的渗透与滞留[13]。Kep 值升高则表明对比剂洗出加快，可能与肿瘤细胞外间隙高压、淋巴回流受阻或酸性微环境相关，这种异常代谢状态可能增强肿瘤细胞对缺血缺氧的耐受性，从而降低 TACE 诱导的坏死程度[14]。

本研究构建的决策树模型的 *AUC* 达 0.860，敏感度与特异度均超过 0.80，显著优于单一参数预测效能，表明其能够整合多参数优势，更精准地识别 TACE 潜在无效患者。在模型策略上，Lan 等[15]基于常规 MRI 序列结合临床特征构建的列线图模型（训练集 *AUC*=0.692），以及 Liu 等[16]利用影像组学特征建立的 TACE 疗效预测模型（验证集 *AUC*=0.798），均显示了良好的预测潜力。然而，这些模型大多依赖于形态学或宏观纹理特征。本研究聚焦于 DCE-MRI 减影技术获取的定量血流动力学参数，所构建的决策树模型（*AUC*=0.860）在预测效能上展现出一定优势。这提示直接反映肿瘤血管生成与通透性的 Ktrans、Kep 等功能学参数，在刻画肿瘤异质性及预测其对于栓塞治疗的响应方面，可能比单纯的形态学特征包含更多具有判别价值的信息。临床适用性方面，与需要复杂计算或“黑箱”操作的人工智能深度学习模型相比[17]，本研究的决策树模型具有结构直观、可解释性强的突出优点。它能够生成清晰的临床决策路径，首要依据 Ktrans 值进行分层，使放射科与介入科医师能够直接理解模型的决策逻辑，并将其快速转化为术前评估的参考工具，这对于在临床实践中推广和应用具有重要意义。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明　缪纤儿：酝酿和设计实验，实施研究，采集数据，分析/解释数据，文章撰写，统计分析；获取研究经费；行政、技术或材料支持，指导，支持性贡献；李辉：实施研究，采集数据，分析/解释数据，文章撰写，统计分析；徐双月：实施研究，采集数据，分析/解释数据，文章撰写，统计分析

参　考　文　献

[1] Sangro B, Kudo M, Erinjeri J P, et al. Durvalumab with or without bevacizumab with transarterial chemoembolisation in hepatocellular carcinoma (EMERALD-1): A multiregional, randomised, double blind, placebo-controlled, phase 3 study[J]. Lancet, 2025, 405 (10474): 216-232.

[2] 刘刚,刘成环,解晓婷,等.CT 引导下经皮微波消融术治疗肝细胞癌的近远期疗效观察[J].实用放射学杂志,2024,40(12): 2058-2061.

[3] 翁炜,吕秀玲,张倩倩,等.基于磁共振影像组学技术对肝癌经肝动脉化疗栓塞术后短期疗效的预后价值分析[J].中华医学杂志,2020,100(11):828-832.

[4] Torres L A, Lee K E, Barton G P, et al. Dynamic contrast enhanced MRI for the evaluation of lung perfusion in idiopathic pulmonary fibrosis[J]. Eur Respir J, 2022, 60(4): 2102058.

[5] 刘松,田超,任涛,等.CT 血管造影影像组学评估基底动脉尖动脉瘤破裂风险[J].中国医学影像技术,2025,41(1):20-24.

[6] 于程程,张贺诚,邓海燕.MRI 对肝细胞癌 SBRT 的疗效评价及预测因素研究[J].中国医疗设备,2022,37(12):91-94.

[7] Kudo M, Ren Z G, Guo Y B, et al. Transarterial chemoembolisation combined with lenvatinib plus pembrolizumab versus dual placebo for unresectable, non-metastatic hepatocellular carcinoma (LEAP-012): A multicentre, randomised, double-blind, phase 3 study[J]. Lancet, 2025, 405(10474): 203-215.

[8] 陆国芬,温中炎,马德奎.DCE-MRI 联合外周血循环肿瘤细胞预测乳腺癌术后复发、转移的价值[J].中国 CT 和 MRI 杂志,2025,23(5):85-88.

[9] Grey A D R, Scott R, Shah B, et al. Multiparametric ultrasound versus multiparametric MRI to diagnose prostate cancer (CADMUS): A prospective, multicentre, paired-cohort, confirmatory study[J]. Lancet Oncol, 2022, 23(3): 428-438.

[10] Fan W Z, Zhu B W, Chen S L, et al. Survival in patients with recurrent intermediate-stage hepatocellular carcinoma: Sorafenib plus TACE *vs* TACE alone randomized clinical trial[J]. JAMA Oncol, 2024, 10 (8): 1047-1054.

[11] 陈艳,田启凤,陈诚,等.晚期肝细胞癌经动脉化疗栓塞术后栓塞综合征风险网络计算器及预后分析[J].肝癌电子杂志,2025,12(1): 33-38.

[12] 郎旭,刘博宇.TACE 联合仑伐替尼及 PD-1 抑制剂治疗伴门静脉癌栓的肝细胞癌患者的疗效及安全性[J].中国临床药理学与治疗学,2025,30(5):648-656.

[13] 周雨,陈泽乐,周方程,等.DCE-MRI 减影联合血清 miR-133a-3p 及 CCR3 预测 TACE 治疗肝细胞癌早期效果[J].中国介入影像与治疗学,2023,20(3):134-138.

[14] 高万春,李小军,陈金叶,等.3.0 TMR 动态增强扫描参数分析肝癌患者经导管肝动脉化疗栓塞术后疗效评估的价值研究[J].实用医院临床杂志,2020,17(2):210-213.

[15] Lan Y F, Chen L X, Tang L L, et al. MRI imaging features for evaluating the efficacy and prognosis of TACE combined with targeted immunotherapy in unresectable hepatocellular carcinoma[J]. Eur J Radiol, 2025, 191: 112296.

[16] Liu D, Liu F, Xie X Y, et al. Accurate prediction of responses to transarterial chemoembolization for patients with hepatocellular carcinoma by using artificial intelligence in contrast-enhanced ultrasound[J]. Eur Radiol, 2020, 30(4): 2365-2376.

[17] Peng J, Huang J H, Huang G J, et al. Predicting the initial treatment response to transarterial chemoembolization in intermediate-stage hepatocellular carcinoma by the integration of radiomics and deep learning[J]. Front Oncol, 2021, 11: 730282.

收稿日期：2025-10-31

（本文编辑：钟美春）