

## 论 著

## 基于CT影像组学对肾透明细胞癌肾包膜浸润状态的研究

邓晓丽<sup>1,2</sup> 江桂华<sup>1,2,\*</sup>1.南方医科大学第二临床医学院  
(广东广州 510280)2.暨南大学附属广东省第二人民医院  
影像中心 (广东广州 510317)

**【摘要】目的** 探讨基于CT影像组学多种单一模型和融合模型对肾透明细胞癌肾包膜浸润状态的预测价值。**方法** 回顾性分析肾透明细胞癌患者204例,根据术后病理肾包膜浸润状态分为无肾包膜浸润组(n=120)和有肾包膜浸润组(n=84)。从术前CT增强扫描动脉期图像获得瘤内、瘤周多个感兴趣区(ROI)并提取、筛选影像组学特征集,联合筛选后的临床特征和影像组学特征,选用逻辑回归机器学习算法构建单一模型和融合模型共9种,采用受试者工作特征曲线下面积(AUC)和精准率-召回率曲线下面积(AUPRC)评估模型性能。**结果** 瘤周1-3mm模型在单一模型中表现最佳。所有融合模型的性能均优于单一模型,临床-多尺度融合模型AUPRC(0.70, 0.81)、AUC(0.77, 0.70),模型表现最稳定,经筛选特征融合模型AUPRC(0.70, 0.81)、AUC(0.78, 0.68),模型泛化能力最强。**结论** 基于术前CT影像组学构建的融合模型有助于预测肾透明细胞癌患者术前肾包膜浸润状态,辅助临床医师为患者制定更优的手术方案。

**【关键词】** 肾脏; 透明细胞癌; 肾包膜浸润; 体层摄影术; X线计算机; 影像组学; 机器学习

【中图分类号】R737.11; R814.42

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.03.030

## A Study of CT-Based Radiomics in Predicting Renal Capsule Invasion Status in Clear Cell Renal Cell Carcinoma

DENG Xiao-li<sup>1,2</sup>, JIANG Gui-hua<sup>1,2,\*</sup>

1.The Second School of Clinical Medicine, Southern Medical University, Guangzhou 510280, Guangdong Province, China

2.Department of Medical Imaging, Guangdong Second Provincial General Hospital Affiliated to Jinan University, Guangzhou 510317, Guangdong Province, China

## ABSTRACT

**Objective** To explore the predictive value of multiple single models and fusion models based on CT radiomics for the renal capsule invasion status of clear cell renal cell carcinoma (ccRCC). **Methods** A total of 204 patients with ccRCC who underwent surgical resection in two centers were retrospectively analyzed. According to the renal capsule invasion status confirmed by postoperative pathology, the patients were divided into the non-renal capsule invasion group (n=120) and the renal capsule invasion group (n=84). Multiple regions of interest (ROIs) were obtained from the intratumoral and peritumoral areas of preoperative enhanced CT arterial phase images, and radiomic feature sets were extracted and selected. Combined with the selected clinical features and radiomic features, a total of 9 single models and fusion models were constructed using the logistic regression machine learning algorithm. The area under the receiver operating characteristic curve (AUC) and the area under the precision-recall curve (AUPRC) were used to evaluate the model performance. **Results** Among the single models, the peritumoral 1-3mm model showed the best performance in terms of AUC. The performance of all fusion models was higher than that of single models. The clinical-multiscale fusion model had the most stable performance with AUPRC (0.70, 0.81) and AUC (0.77, 0.70), while the fusion model with selected features had the strongest generalization ability with AUPRC (0.70, 0.81) and AUC (0.78, 0.68). **Conclusion** The fusion model constructed based on preoperative CT radiomics is helpful for predicting the preoperative renal capsule invasion status of patients with ccRCC, and assists clinicians in formulating better surgical plans for patients.

**Keywords:** Kidney; Clear Cell Carcinoma; Renal Capsule Invasion; Tomography; X-ray Computed; Radiomics; Machine Learning

肾细胞癌(renal cell carcinoma, RCC)是源于肾皮质的肾小管上皮恶性肿瘤,在2022版WHO RCC分类标准中,透明细胞性肾细胞癌(ccRCC)占70%~90%<sup>[1]</sup>。欧洲泌尿外科学会(European Association of Urology, EAU)指南显示, I~IV期5年肿瘤特异生存(cancer specific survival, CSS)分别为91%、74%、67%、32%,早诊早治可明显提高生存率<sup>[2]</sup>。CT检查是RCC患者术前诊断、分期及术后随访最常用的检查方法,手术治疗是RCC的主要根治手段,手术方式分为肾部分切除术和根治性肾切除术,对于部分早期肾癌可首选肾部分切除术<sup>[3]</sup>。肾包膜是包绕在肾实质表面的纤维薄膜,可阻止肿瘤播散到邻近组织,肾包膜浸润是癌症扩散的早期信号。多项大型研究表明<sup>[4-6]</sup>,发生肾包膜浸润的患者预后低于无浸润者。因此,准确识别肾包膜的浸润状态,可以为外科医师制定个体化手术方案提供重要参考,进而改善患者的预后。

传统影像学方法基于影像医师的肉眼观察,容易受主观意识和临床经验影响,诊断准确性存在局限。既往研究证实<sup>[7]</sup>,CT影像可能会低估RCC的TNM分期,且存在肾包膜浸润但无肾周脂肪浸润的情况<sup>[8]</sup>。影像组学<sup>[9]</sup>可以高通量地提取并分析影像学特征,能够识别人眼无法分辨的细微影像差异,具有无创、定量、高效的优点,可有效辅助临床诊断。目前,关于RCC肾包膜浸润的影像组学研究相对较少,基于此,本研究旨在探讨基于瘤内和瘤周CT影像组学的多种单一模型和融合模型对肾透明细胞癌肾包膜浸润状态的预测价值,辅助临床医师决策手术方式。

## 1 资料与方法

**1.1 研究对象** 回顾性收集双中心2017年1月至2025年12月收治的经外科手术切除的肾透明细胞癌患者作为研究对象共204例,其中中心一123例,中心二81例。根据术后病理结果将患者分为无肾包膜浸润组(n=120)和有肾包膜浸润组(n=84)。

**纳入标准:** 术后病理确诊为ccRCC患者;术前完成肾脏CT增强扫描;接受肾部分切除术或根治性肾切除术。排除标准:术前接受过消融、介入栓塞、放疗、化疗等治疗;CT图像存在伪影,影响肿瘤感兴趣区(region of interest, ROI)勾画;临床和影像学资料不全。本研究为回顾性研究性质,医院伦理委员会同意豁免患者知情同意。

## 1.2 方法

**1.2.1 仪器和扫描方法** 患者扫描前签署知情同意书,采用飞利浦 Brilliance 256 排 CT、联影 uCT 960+ CT、联影 uCT 320 CT及西门子 SOMATOM Force 第3代双源 CT进行仰卧位扫描,经肘正中静脉高压注射非离子型对比剂,剂量1.5mL/kg、流速3.0~3.5mL/

【第一作者】邓晓丽,女,主治医师,主要研究方向:影像组学。E-mail: 1020363469@qq.com

【通讯作者】江桂华,男,主任医师,主要研究方向:神经影像。E-mail: GH.jiang2002@163.com

s, 扫描范围为肾上极至肾下极。扫描参数: 管电压120kV, 管电流自动调制, 矩阵512×512。扫描期相包括平扫期、动脉期(25s~30s)、实质期(80s~90s)、排泄期(肾盂期, 180s~420s)。

1.2.2 临床资料 收集患者的年龄、性别资料, 参照三大肾肿

瘤术前评估系统之一的肾脏R.E.N.A.L评分系统(R.E.N.A.L. Nephrometry Score), 纳入肿瘤的最大直径(radius)、外凸率、肿瘤位置3项指标, 上述5项指标共同构建临床特征集。

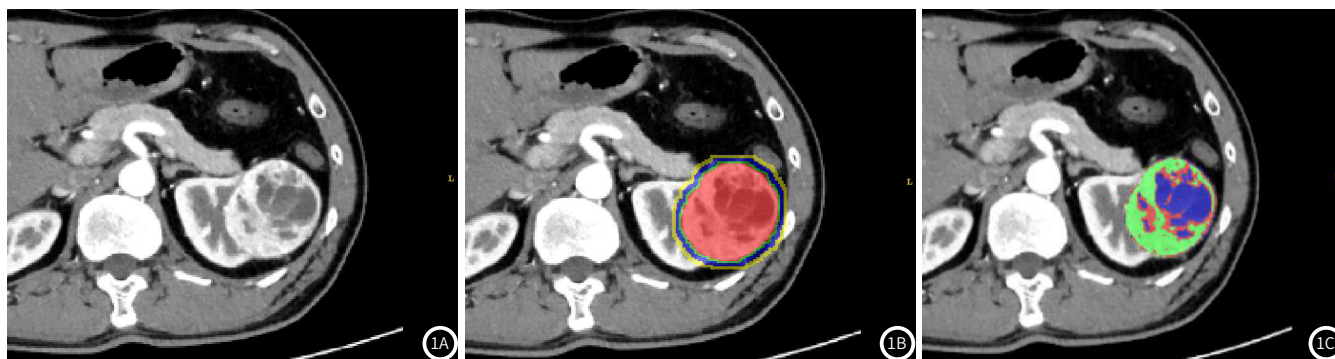


图1 肾透明细胞癌患者的术前动脉期增强CT原始图像及多个ROI。1A: 原始图像; 1B: 最内为瘤内ROI(红色), 依次向外为瘤周1mm ROI(绿色)、瘤周1~3mm ROI(蓝色)、瘤周3~5mm ROI(黄色); 1C: 瘤内3个生境亚区ROI(红色、绿色、蓝色)。

### 1.3 影像组学分析

1.3.1 图像分割 导出患者术前CT影像进行重采样、统一窗宽窗位(窗宽50HU, 窗位350HU), 避免引入主观差异及人为误差。由两名影像主治医师采用双盲法, 对肿瘤的轮廓进行综合评估, 通过ITK-SNAP 3.8.0在动脉期肾窗轴位相上沿肿瘤轮廓进行逐层勾画获得瘤内ROI。根据瘤内ROI的CT值进行K-means聚类并划分出3个亚区得到瘤内生境1、2、3亚区的ROI; 采用Python工具, 在瘤内ROI基础上自动逐步拓展, 获得瘤周1mm ROI、瘤周1~3mm ROI、瘤周3~5mm ROI(见图1)。最终获得7个区域的ROI, 包括瘤内ROI、瘤内生境3个亚区ROI和瘤周3个范围ROI。

1.3.2 影像组学特征提取和筛选 对7个区域的ROI采用PyRadiomics特征库提取6类共107个特征, 总计749个影像组学特征; 6类特征包括一阶统计特征(firstorder)、灰度共生矩阵特征(glcm)、灰度游程长度矩阵特征(glrlm)、灰度大小区域矩阵特征(glszm)、邻域灰度差矩阵特征(ngtdm)、灰度依赖矩阵特征(gldm)。将瘤内生境3个亚区的特征融合为1组瘤内生境特征集, 最终获得5组影像组学特征集, 分别为瘤内、瘤内生境、瘤周1mm、瘤周1~3mm、瘤周3~5mm特征集。设定中心1的123例患者为训练集, 中心2的81例患者作为测试集; 特征筛选和模型构建均在训练集上完成。对提取的特征集进行Z-score归一化处理方差分析、最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)算法结合10折交叉验证, 进行特征筛选、降维。

1.3.3 构建模型 采用逻辑回归(logistic regression, LR)的机器学习算法, 构建9个模型, 分别为临床模型(clinical)、瘤内模

型(radiomics mask model)、瘤周1mm模型(radiomics 1mm model)、瘤周1~3mm模型(radiomics 1-3mm model)、瘤周3-5mm模型(radiomics 3-5mm model)、瘤内生境模型(habitat model)、临床-瘤内融合模型(fusion\_clinical mask model)、临床-多尺度融合模型(fusion clinical multiscale)、经筛选特征模型(fusion selected feature model)。对各模型的预测性能进行分析比较, 并将结果进行可视化。

1.4 统计学方法 使用SPSS 26.0、Python 3.9.21进行统计学分析。符合正态分布的计量资料以(均数±标准差)表示, 组间比较采用独立样本t检验; 计数资料以(例)表示, 分类变量资料采用卡方检验, 有序变量资料采用Mann-Whitney U 检验分析。P<0.05为差异具有统计学意义。采用受试者工作特征曲线(ROC曲线)计算曲线下面积(AUC), 评估各模型的性能; 采用精准率-召回率曲线(PR曲线)计算曲线下面积(AUPRC), 评估模型对阳性病例的精准识别率。

## 2 结果

2.1 临床特征分析结果 204例患者的5个临床特征详见表1。单因素Logistic回归分析显示, 肿瘤最大直径在两组间(训练集P=0.003, 测试集P=0.023)具有统计学差异。采用LASSO回归和10折交叉验证对临床特征进行筛选、降维后, 最终保留年龄和最大直径(Radius)2项特征用于构建临床模型, 其中肿瘤最大直径在模型中占主要权重(见图2)。

表1 训练集和测试集的临床因素与CT影像特征比较

临床特征	训练集(n=123)		x <sup>2</sup> /t/Z	P值	测试集(n=81)		x <sup>2</sup> /t/Z	P值
	有浸润组 (n=35)	无浸润组 (n=88)			有浸润组 (n=49)	无浸润组 (n=32)		
性别(例)								
男性	14	32	x <sup>2</sup> =0.03	0.865	35	26	x <sup>2</sup> =0.55	0.46
女性	21	56			14	6		
年龄(岁)	60.3±9.6	56.8±11.4	t=1.65	0.102	57.2±11.6	52.1±14.0	t=1.76	0.083
最大直径(例)								
≤4cm	11	45	Z=2.72	0.003	25	20	Z=2.27	0.023
>4cm, ≤7cm	11	35			16	11		
>7cm, ≤10cm	9	7			2	0		
≥10cm	1	1			2	1		
肾周其它结构侵犯	3	0			4	0		
外凸率(例)								
外凸<肾脏轮廓50%	9	34	x <sup>2</sup> =4.12	0.128	19	17	x <sup>2</sup> =3.14	0.208

外凸>肾脏轮廓50%	25	46	29	12
在肾脏轮廓内生长	1	8	1	3
肿瘤位置(例)			$\chi^2=0.04$	0.980
腹侧	17	41	23	17
背侧	15	39	21	10
介于两者之间	3	8	5	5

$\chi^2=0.39$     0.823

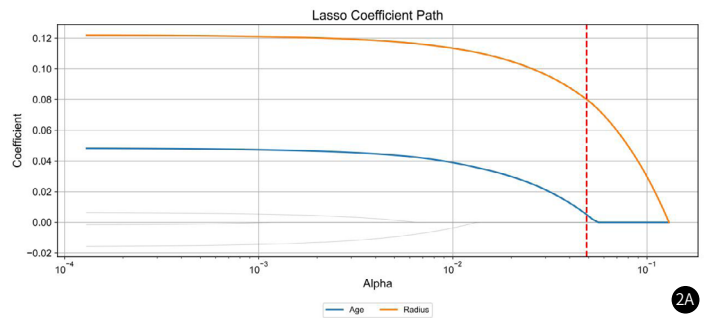
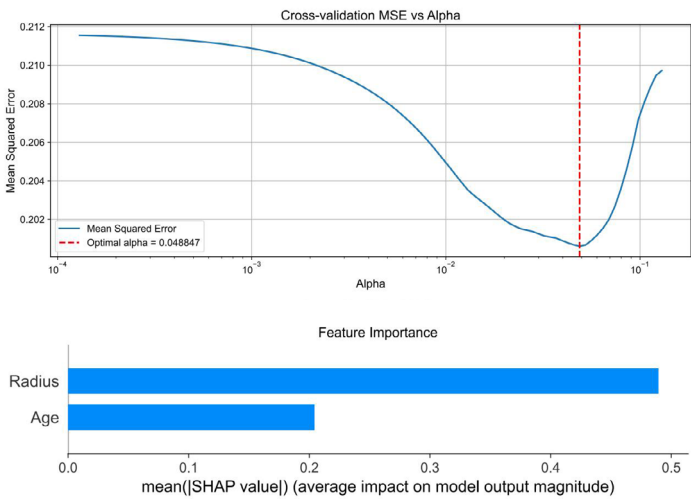


图2 经LASSO回归分析筛选临床特征和筛选后临床特征的SHAP值。  
图2A: 经LASSO回归分析筛选临床特征; 图2B: 筛选后临床特征的SHAP值。

**2.2 影像组学特征分析结果** 以瘤周1~3mm ROI提取的107个影像组学特征为例, 经方差分析筛选后保留64个特征, 进一步经过 LASSO回归结合10折交叉验证, 最终保留4个特征用于模型构建。瘤内、瘤内生境、瘤周1mm、瘤周1~3mm、瘤周5mm 5组影像组学特征集, 经过上述筛选后分别保留2、3、7、4、4个特征, 用于构建对应的单一影像组学模型; 经LASSO回归筛选的瘤周1~3mm模型所含特征值详见图3。融合筛选后的临床特征和瘤内、瘤周3个范围的影像组学特征, 共13个特征构建临床-多尺度融合模型, 融合筛选后的临床特征和所有影像特征, 共16个特征构建经筛选特征融合模型。

**2.3 模型效能检验和分析** 9种模型在训练集和测试集的效能详见图4。鉴于训练集和测试集的数据类别不平衡问题, 而AUPRC在评估类别不平衡数据的预测精准性与召回率方面更具可靠性, 故

本研究优先采用AUPRC作为模型性能的核心评估指标, 同时结合AUC进行辅助分析。结果显示, 在6种单一模型中, 瘤周1~3mm模型表现最佳, 在训练集中AUPRC=0.60、AUC=0.70, 在测试集中AUPRC=0.77、AUC=0.67。在3种融合模型中, 临床-多尺度融合模型在训练集中AUPRC=0.70、AUC=0.77, 在测试集中AUPRC=0.81、AUC=0.70, 表现最稳定, 临床获益显著; 经筛选特征融合模型在训练集中AUPRC=0.70、AUC=0.78, 在测试集中AUPRC=0.81、AUC=0.68, 是泛化能力最强的模型。整体而言, 所有融合模型中的各项评估指标均优于单一模型。融合模型通过剔除冗余特征, 在测试集上实现了最高的AUPRC, 表现出更优的区分度、临床获益和预测可靠性, 进一步证实了特征筛选流程在模型构建中的重要性。

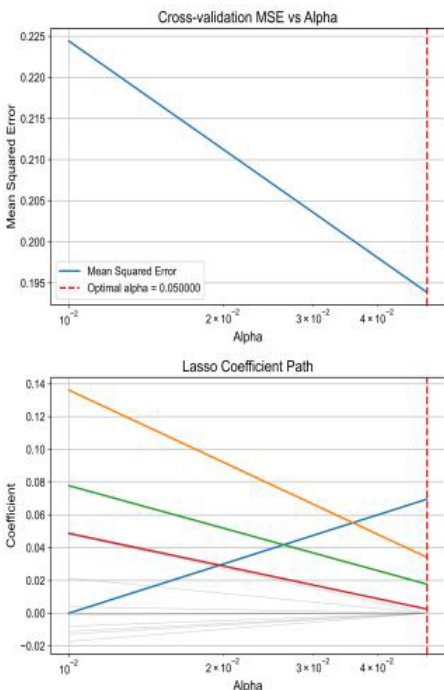


图3 经LASSO回归分析筛选的瘤周1~3mm ROI影像组学特征。

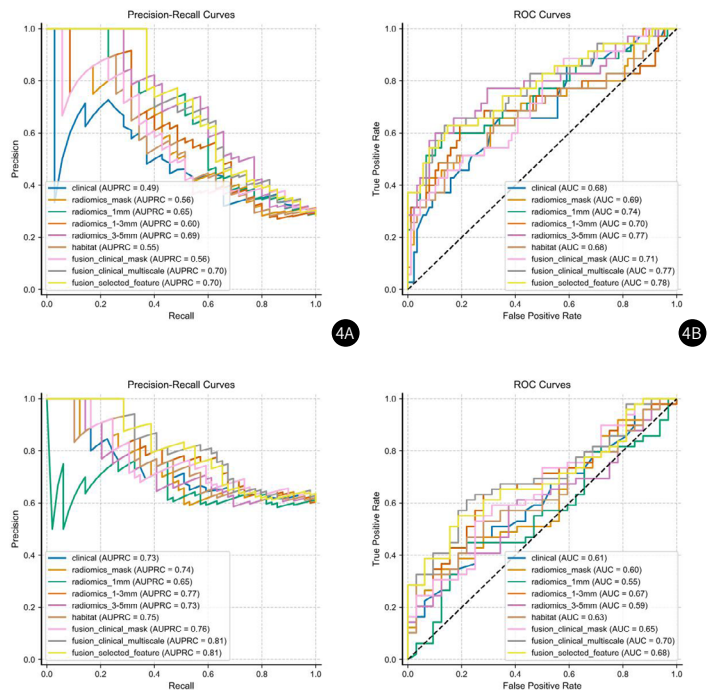


图4 各模型训练集和测试集ROC和AUPRC曲线。图4A: 训练集AUPRC曲线; 图4B: 训练集ROC曲线; 图4C: 测试集AUPRC曲线; 图4D: 测试集ROC曲线。

### 3 讨论

本研究回顾性分析双中心204例肾透明细胞癌(ccRCC)患者术前增强CT影像,筛选临床与影像学特征构建多个单一及融合影像模型,研究表明,融合模型可提高肾包膜浸润状态预测准确性,为临床手术决策提供重要参考。

近年来,影像学在ccRCC的研究主要集中于病理核分级、TNM分期及预后预测,涵盖单一模型与多尺度融合模型。Zhang YD<sup>[10]</sup>等研究显示,CT增强动脉期瘤内影像学模型预测肾包膜浸润效能良好,训练集和验证集AUC分别为0.83和0.74;该研究纳入肿瘤最大径构建临床模型,本研究筛选的临床特征亦包含肿瘤最大径,其在临床模型中SHAP(Shapley Additive exPlanations)值约0.48,SHAP值可解释和量化机器学习模型中特征的重要性<sup>[11]</sup>,直观证实其核心作用。梅超<sup>[12]</sup>等评估CT增强三期影像学模型对ccRCC分级的诊断效能,发现动脉期模型效能优于三期联合,这与ccRCC动脉期强化更显著的影像学特征一致,亦是本研究选定动脉期为研究期相的原因。

目前瘤周最佳范围研究结论不一:Liu J<sup>[13]</sup>等在预测RCC肾周脂肪浸润的研究中,发现瘤周3mm模型效能最高(AUC=0.926);Yang L<sup>[14]</sup>等研究显示,动脉期瘤内模型效能高于瘤周3mm(AUC=0.81);Xia YH<sup>[15]</sup>等构建动脉期瘤内、瘤周多种模型预测ccRCC病理T分期,发现瘤内联合瘤周0~5mm模型最佳(训练集、验证集、测试集AUC分别为0.91、0.85、0.873),且优于放射科医师诊断;张晨阳<sup>[16]</sup>等系统性评估了瘤周1~6mm范围的6个区域,结果显示瘤周3mm模型最优,但该研究为单中心,未验证模型跨中心泛化能力。

结合既往研究,本研究选定瘤周1mm、1~3mm、3~5mm三个尺度分析,结果显示单一瘤周模型中瘤周1~3mm效能最高,与既往研究一致;本研究双中心设计,可在一定程度上验证该模型的跨中心泛化能力。

此外, Yang L<sup>[14]</sup>等研究中肾包膜未受侵者病例数多于肾包膜受侵者,张晨阳<sup>[16]</sup>等研究则相反。Ma J<sup>[17]</sup>等表明阳性样本偏低会影响CT在肾细胞癌患者肾周脂肪浸润的准确率,CT的诊断性能受到了限制。本研究训练集与测试集肾包膜浸润者比例失衡,推测为模型AUC偏低的原因,因此采用AUPRC指标评估模型性能更合理,后续需扩大样本量、平衡组间数据以提升模型性能。

本研究局限性:(1)虽为双中心,但样本分布不平衡且均来自同一省份,需增加多区域中心数据优化模型泛化能力;(2)手工勾画ROI耗时耗力,后续需开发全自动深度学习分割流程,提高分割速度和一致性;(3)回顾性研究无法避免偏倚风险,未来需纳入前瞻性队列,提升模型临床普适性与可靠性。

综上所述,我们通过分析ccRCC患者术前增强CT的单一模型及融合模型,探讨其对肾包膜浸润状态的预测价值,结果表明融合模型效能最佳,可辅助临床医师制定更优手术方案,降低术后近远期并发症发生率,改善患者预后及生存质量。

### 参考文献

- [1] Moch H, Amin MB, Berney DM, et al. The 2022 World Health Organization classification of tumours of the urinary system and male genital organs—part a: renal, penile, and testicular tumours [J]. *European Urology*, 2022, 82(4): 458–468.
- [2] EAU Guidelines Office. EAU guidelines on renal cell carcinoma 2025 [J]. *European Urology*, 2025, 87(3): 321–345.
- [3] 国家卫生健康委员会. 肾癌诊疗指南(2022年版) [EB/OL]. 2022-04-11.
- [4] Ha US, Lee KW, Jung JH, et al. Renal capsular invasion is a prognostic biomarker in localized clear cell renal cell carcinoma [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 202.
- [5] May M, Brookman-Amisshah S, Roigas J, et al. Evaluation of renicapsular involvement in stages I and II renal cell carcinoma from the morphological and prognostic point of view [J]. *Urologic Oncology*, 2010, 28(3): 274–279.
- [6] Jeong IG, Jeong CW, Hong SK, et al. Prognostic implication of capsular invasion without perinephric fat infiltration in localized renal cell carcinoma [J]. *Urology*, 2006, 67(4): 709–712.
- [7] 王志芳. 采用CT三期增强扫描评估肾透明细胞癌术前T分期的准确性研究 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2022, 20(3): 3.
- [8] Zhang YM, Tian H, Zhang SQ, et al. Multislice spiral computed tomography signs of invasion of the renal capsule by renal cell carcinoma [J]. *Medicine*, 2018, 97(44): e13075.
- [9] Lambin P, Rios-Velazquez E, Leijenaar R, et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis [J]. *European Journal of Cancer*, 2012, 48(4): 441–446.
- [10] Zhang YD, Zhao JK, Li ZJ, et al. Preoperative prediction of renal fibrous capsule invasion in clear cell renal cell carcinoma using CT-based radiomics model [J]. *British Journal of Radiology*, 2024, 97(1161): 1557–1567.
- [11] Lundberg SM, Lee SI. A unified approach to interpreting model predictions [C]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017: 30.
- [12] 梅超, 朱庆强, 叶靖, 等. 增强CT影像学对肾透明细胞癌恶性程度的鉴别 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22(4): 112–115.
- [13] Liu J, Lin Z, Wang K, et al. A preliminary radiomics model for predicting perirenal fat invasion on renal cell carcinoma with contrast-enhanced CT images [J]. *Abdominal Radiology (NY)*, 2023, 48(2): 649–658.
- [14] Yang L, Gao L, Arefan D, et al. A CT-based radiomics model for predicting renal capsule invasion in renal cell carcinoma [J]. *BMC Medical Imaging*, 2022, 22(1): 15.
- [15] Xia YH, Sun ZH, Wang ZY, et al. Intra- and peritumoral CT-based radiomics for assessing pathologic t-staging in clear cell renal cell carcinoma: a multicenter study [J]. *Annals of Surgical Oncology*, 2025, 32(6): 4550–4561.
- [16] 张晨阳, 贺俊红, 王鹏飞, 等. 瘤内及瘤周CT影像学联合临床及影像学特征预测透明细胞肾细胞癌侵犯肾被膜 [J]. *中国医学影像技术*, 2025, 41(3): 447–451.
- [17] Ma J, Yuan E, Feng S, et al. Diagnostic performance of CT for extrarenal fat invasion in renal cell carcinoma: a meta-analysis and systematic review [J]. *Insights into Imaging*, 2025, 16(1): 1–13.

(收稿日期: 2026-02-23) (校对: 赵望淇 排版: 张鸿燊)