

光谱 CT 成像联合影像组学在术前预测肾透明细胞癌 WHO/ISUP 分级的应用

魏江龙, 刘翔, 乔英

【摘要】 目的:探讨光谱 CT 多参数成像联合碘图影像组学在术前预测肾透明细胞癌(ccRCC) WHO/ISUP 分级中的应用价值。**方法:**回顾性分析 2019 年 9 月至 2024 年 6 月本院 130 例 ccRCC 患者,按 WHO/ISUP 分级分为低级别组(92 例)和高级别组(38 例),按 7:3 比例随机分为训练集(91 例)和验证集(39 例)。使用 3D-Slicer 勾画病灶,计算组内相关系数(ICC),采用 LASSO 和 Logistic 回归筛选特征,建立临床、影像组学和联合模型,并通过 AUC 评估性能,DCA 分析其临床实用性。**结果:**临床模型包含横径、皮髓质期 IC、皮髓质期 NIC 3 个特征,影像组学模型由 8 个皮髓质期和 6 个肾造影期特征构成,联合模型为临床特征加影像组学标签构成。在训练集和验证集中,联合模型均具有最优的诊断效能(AUC 分别为 0.91、0.90)。**结论:**光谱 CT 碘图影像组学可有效预测 ccRCC 病理分级,联合光谱 CT 参数的模型可进一步提高预测效能,具有潜在临床价值。

【关键词】 癌,肾细胞;体层摄影术,X 线计算机;肿瘤病理学类型

【中图分类号】 R730.26;R814.4 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2026)02-0188-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of spectral CT imaging combined with radiomics in preoperative prediction for WHO/ISUP grade of clear cell renal cell carcinoma WEI Jiang-long, LIU Xiang, QIAO Ying. Department of Radiology, ShanXi Medical University, Taiyuan 030001, China

【Abstract】 Objective: To explore the value of the preoperative prediction of WHO/ISUP grades of clear cell renal cell carcinoma (ccRCC) by spectral CT multiparametric imaging combined with iodine map radiomics. **Methods:** A retrospective analysis was conducted on 130 patients with ccRCC of our hospital between September 2019 and June 2024. All patients were divided into low-grade group (WHO/ISUP grades I – II, n=92) and high-grade group (WHO/ISUP grades III – IV, n=38), and they were randomly divided into a training set (n=91) and a validation set (n=39) in a ratio of 7:3. The lesions were manually delineated by using 3D-slicer, and feature stability was assessed by the intraclass correlation coefficient (ICC). Feature selection was performed by using LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) and logistic regression. And three models were found, including the clinical model, the radiomics model, and the combined model. Model performance was assessed by the area under the curve (AUC), and clinical utility was evaluated by decision curve analysis (DCA). **Results:** The clinical model comprised three features [the maximum tumor diameter, corticomedullary phase iodine concentration (IC), and normalized iodine concentration (NIC)]. The radiomics model included eight corticomedullary phase features and six nephrographic phase features. The combined model consists of clinical features and the radiomics signature. The combined model demonstrated the best diagnostic performance in both the training cohort (AUC=0.91) and the validation cohort (AUC=0.90). **Conclusion:** Spectral CT-based iodine map radiomics can effectively predict the pathological grade of ccRCC. The combined model can further improve predictive performance and holds potential clinical value.

【Key words】 Carcinoma, renal cell; Tomography, X-ray computed; Histological types of neo-

作者单位: 030001 太原, 山西医科大学 医学影像学院(魏江龙、刘翔); 030001 太原, 山西医科大学第一医院 CT 影像科(乔英)

作者简介: 魏江龙(2000—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事腹部影像学研究工作。

通讯作者: 乔英, E-mail: 15103462912@163.com

plasms

肾细胞癌(renal cell carcinoma, RCC)是成人常见的原发性肾脏恶性肿瘤,其中肾透明细胞癌(clear cell renal cell carcinoma, ccRCC)约占70%~80%,具有高侵袭性并且预后较差^[1-2]。WHO/ISUP 分级系统通过评估核仁突出及横纹肌样/肉瘤样特征,有效减少观察者间差异,已成为 ccRCC 预后评估的重要指标^[3-7]。低级别肿瘤侵袭性较低,可通过保肾手术或微创消融治疗,而高级别患者常需根治性切除及靶向治疗^[8]。目前术前分级主要依赖经皮穿刺活检,但其侵入性、假阴性率及种植转移风险限制了临床应用^[9]。因此,需要一种能够提供更多关于病变信息的非侵入性方法。

双层探测器光谱 CT(dual-layer spectral detector CT, DLCT)通过物质分离技术(如碘浓度、能谱曲线斜率)可定量分析肿瘤血供及成分差异,已在肿瘤分类和分级预测中展示出较好的能力^[10-11]。影像组学是一项新兴技术,它通过将医学图像转换为大量可使用高级建模算法进行分析的定量特征来提供解决方案。影像组学可以提取大量的图像特征,将图像定量分析与机器学习相结合,在肾肿瘤诊断、鉴别诊断、分级、疗效评价等方面显示出了潜力^[12-13]。然而,目前基于 DLCT 放射组学预测 ccRCC 病理分级的报道较少。因此,本研究旨在探索基于光谱 CT 碘图影像组学联合光谱 CT 参数在预测 ccRCC WHO/ISUP 分级中的价值。

材料与方法

1. 资料

回顾性搜集 2019 年 9 月至 2024 年 6 月期间,在本院行泌尿系光谱 CT 动态增强扫描并术后病理证实为 ccRCC 的患者。纳入标准:接受肾癌根治性切除手术,且术后病理证实为 ccRCC;临床资料完整。排除标准:术前 CT 检查距手术日期 1 周以上;患者术前接受放疗、化疗、免疫治疗或其他治疗;图像质量差/光谱数据不全;同时存在其他肿瘤病史。最后纳入 130 例肾透明细胞癌患者的资料,由两名分别拥有 8 年及 12 年经验的病理学家按照 WHO/ISUP 病理分级标准将患者分为低级别组(I-II 级,92 例)和高级别组(III-IV 级,38 例),观察员之间的分歧通过协商一致解决。采用分层随机法将病例按 7:3 分为训练集(91 例,低级别组 63 例,高级别组 28 例)和验证集(39 例,低级别组 29 例,高级别组 10 例)。

2. CT 图像采集

采用双层探测器光谱 CT(IQon Spectral CT, Philips Healthcare, The Netherlands)扫描仪。患者

于仰卧位采集定位像之后,先行泌尿系平扫,后行三期动态增强扫描,扫描范围包括腹部及盆部。扫描参数:管电压 120 kVp,管电流采用自动控制技术调节,旋转速度 0.5 s/r,螺距 0.969。增强扫描时依患者体重注射对比剂碘克沙醇,计算公式为 1~1.2 mL/kg,通过高压注射器于右肘正中静脉注射,流速 2.5~3.5 mL/s,并用相同流速注射 100 mL 生理盐水。在注射对比剂后 25 s、75 s、300 s 分别行皮髓质期、肾造影期和排泄期图像。

3. 图像处理和分析

将光谱 CT 图像(spectral-based imaging, SBI)传输至工作站(IntelliSpace Portal Workstation, Philips Healthcare)进行后处理,生成皮髓质期及肾造影期 40 keV 和 100 keV 单能量图像、碘图、原子序数图和电子密度图。每组图像的层厚与层间距均为 1 mm。

一般征象分析:在不了解患者病理分级结果的情况下,一位有 5 年经验的放射科医生和一位有 15 年经验的放射科医生通过皮髓质期图像分析肾肿瘤,确定每个病灶的影像特征:位置(左/右)、肿瘤最大层面的长径和横径、钙化(有/无)、坏死囊变(有/无)、形态(规则/不规则)、边缘(清楚/不清楚)。如果出现分歧,通过协商达成一致。

定量参数测量:采用感兴趣区域(region of interest, ROI)测量病灶相关光谱定量参数,包括病灶平扫、皮髓质期、肾造影期 CT 值,皮髓质期、肾造影期 40 keV 和 100 keV 单能量图像 CT 值、碘浓度(iodine concentration, IC)及同层面主动脉碘浓度、有效原子序数(effective atomic number, Zeff)、电子密度(electron density, ED)。测量时,选择病灶最大径层面,避开钙化、坏死囊变,并远离病灶边缘,通过复制粘贴的方式保证同一病灶所有参数 ROI 一致。计算能量衰减曲线斜率(λ HU=(40keV CT 值-100keV CT 值)/60)、标准化碘浓度(normalized iodine concentration, NIC)。NIC=病灶碘浓度/同层面主动脉碘浓度。所有数据重复测量 3 次取平均值。

4. 影像组学分析

感兴趣区域分割与特征提取:使用开源软件 3D-Slicer(版本 5.2.2)对图像进行分割,并将皮髓质期和肾造影期的碘图 DICOM 格式图像导入。由一名有 5 年腹部影像诊断经验的医师在对病灶进行手动分割(图 1),选择 ccRCC 整个肿瘤的兴趣体积(VOI),包括囊变坏死和钙化,并排除瘤外组织、瘤外血管和腹膜后淋巴结。

特征选择及模型构建:使用 pyradiomic 包提取感

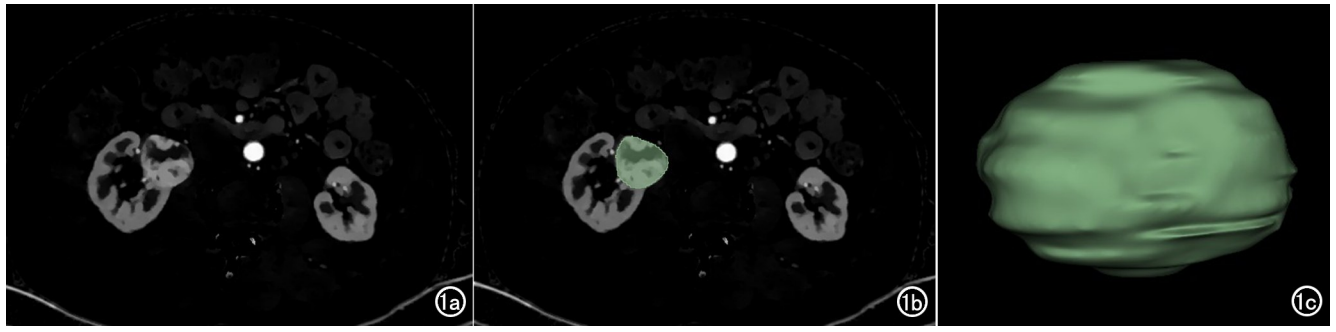


图1 WHO II级肾透明细胞癌患者,男,54岁。a)皮髓质期碘图示肿瘤位于右肾;b)皮髓质期碘图勾画示意图,绿色区域由医师勾画获得;c)全肿瘤三维容积成像。

兴趣区域的影像组学特征,并且所有影像组学特征在进一步分析前均经 Z-score 标准化处理。1 个月后随机选取 30 例患者(高级别组 15 例,低级别组 15 例)重新分割感兴趣区(VOI),通过组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)评估特征的可重复性,保留 $ICC > 0.8$ 的特征用于后续分析。在此基础上对所有保留的影像组学特征进行内部相关性分析,首先进行 Spearman 相关性分析,计算所有特征与目标变量(病理分级标签)的 Spearman 相关系数,剔除与目标变量无显著相关性的特征($P > 0.05$)。同时,针对特征间的多重共线性问题,移除相关系数绝对值 > 0.9 的冗余特征。随后,采用最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)算法特征筛选,采用十折交叉验证法选择最佳的 α 值。最终,对筛选出的特征进行 Logistic 回归分析以构建预测模型。

5. 统计学分析

采用 SPSS 23.0、R(版本 3.6.1)软件进行统计分析。采用 Shapiro-Wilk 检验对定量资料进行正态性检验,符合正态分布的以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用独立样本 t 检验比较不同组间的差异。两组间定性图像特征采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验进行比较。采用 ROC 曲线下面积(area under the curve, AUC)评估 3 种模型的诊断效能,并采用 Delong 检验比较不同诊断模型间 AUC 的差异。通过校正曲线分析预测模型的校正性能,采用临床决策曲线分析计算模型在一定风险阈值范围内的净收益。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

1. 一般资料

本研究共纳入 130 名患者,其中低级别组 92 例,高级别组 38 例。两组间肿瘤长径、横径、皮髓质期 CT 值、肾造影期 CT 值、皮髓质期 IC、皮髓质期 NIC 差异均有统计学意义(P 均 < 0.05 , 表 1);单因素和多因素 Logistic 回归分析结果显示横径、皮髓质期碘浓度(IC)和皮髓质期标准化碘浓度(NIC)是区分 ccRCC 低级别组与高级别组的独立预测因素(表 2)。

2. 诊断模型比较与评估

临床模型(模型C)由横径、皮髓质期 IC、皮髓质

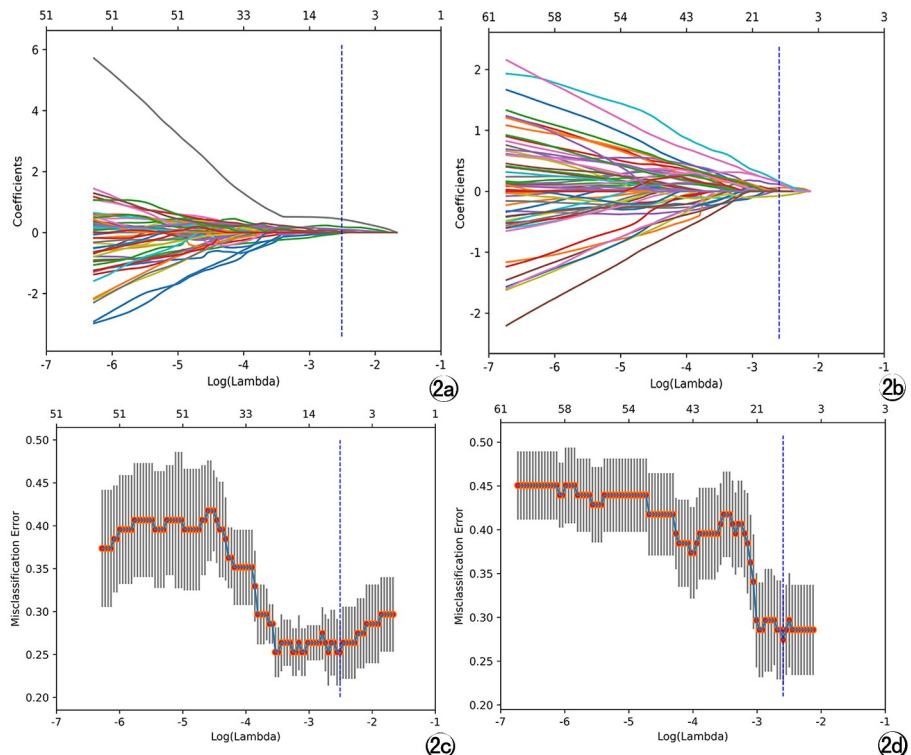


图2 LASSO 回归特征筛选结果。a)皮髓质期特征系数路径图;b)肾造影期特征系数路径图;c)皮髓质期十折交叉验证误差曲线;d)肾造影期十折交叉验证误差曲线。

表1 不同WHO/ISUP分级肾透明细胞癌患者临床影像学特征比较

| 临床影像特征 | 低级别组 N=92 | 高级别组 N=38 | 统计量 | P 值 |
|----------------|--------------|--------------|---------------------|--------|
| 性别 | | | 0.150 ^a | 0.699 |
| 女 | 33 (35.9%) | 15 (39.5%) | | |
| 男 | 59 (64.1%) | 23 (60.5%) | | |
| 年龄(岁) | 59.00±9.50 | 61.74±11.70 | -1.393 ^b | 0.166 |
| 位置 | | | 0.630 ^a | 0.427 |
| 左肾 | 39 (42.4%) | 19 (50.0%) | | |
| 右肾 | 53 (57.6%) | 19 (50.0%) | | |
| 长径(cm) | 4±1.8 | 5.6±2.4 | -4.24 ^b | <0.001 |
| 横径(cm) | 2.9±1.3 | 4.6±1.9 | -5.51 ^b | <0.001 |
| 钙化 | | | | 0.297 |
| 无 | 86 (93.5%) | 33 (86.8%) | | |
| 有 | 6 (6.5%) | 5 (13.2%) | | |
| 坏死囊变 | | | 0.054 ^a | 0.816 |
| 无 | 31 (33.7%) | 12 (31.6%) | | |
| 有 | 61 (66.3%) | 26 (68.4%) | | |
| 形态 | | | 1.77 ^a | 0.184 |
| 规则 | 73 (79.3%) | 26 (68.4%) | | |
| 不规则 | 19 (20.7%) | 12 (31.6%) | | |
| 边缘 | | | 0.006 ^a | >0.9 |
| 清楚 | 55 (59.8%) | 23 (60.5%) | | |
| 不清楚 | 37 (40.2%) | 15 (39.5%) | | |
| 平扫 CT 值(HU) | 33.07±8.79 | 31.29±8.85 | 1.048 ^b | 0.2 |
| 皮髓质期 CT 值(HU) | 148.96±46.89 | 120.74±33.03 | 3.890 ^b | <0.001 |
| 肾造影期 CT 值(HU) | 111.24±26.93 | 98.44±20.28 | 2.636 ^b | 0.009 |
| 皮髓质期 IC(mg/mL) | 4.69±1.95 | 2.84±1.05 | 7.009 ^b | <0.001 |
| 肾造影期 IC(mg/mL) | 2.77±1.09 | 2.79±1.03 | -0.063 ^b | >0.9 |
| 皮髓质期 NIC | 0.67±0.24 | 0.37±0.17 | 6.796 ^b | <0.001 |
| 肾造影期 NIC | 0.73±0.27 | 0.78±0.26 | -0.941 ^b | 0.349 |
| 皮髓质期 Zeff | 8.99±0.73 | 9.14±0.72 | -1.042 ^b | 0.299 |
| 肾造影期 Zeff | 8.63±0.44 | 8.69±0.43 | -0.705 ^b | 0.482 |
| 皮髓质期 λHU | 5.02±2.79 | 5.67±2.57 | -1.241 ^b | 0.217 |
| 肾造影期 λHU | 3.72±1.45 | 4.01±1.48 | -1.027 ^b | 0.306 |
| 皮髓质期 ED | 1.05±0.01 | 1.05±0.01 | -0.001 ^b | >0.9 |
| 肾造影期 ED | 1.04±0.01 | 1.04±0.01 | 1.941 ^b | 0.054 |

注:IC,碘浓度;NIC,标准化碘浓度;Zeff,有效原子序数;λHU,能谱曲线斜率;ED,电子密度;^a为 χ^2 值、^b为 t 值;钙化因期望频数<5,采用Fisher精确检验

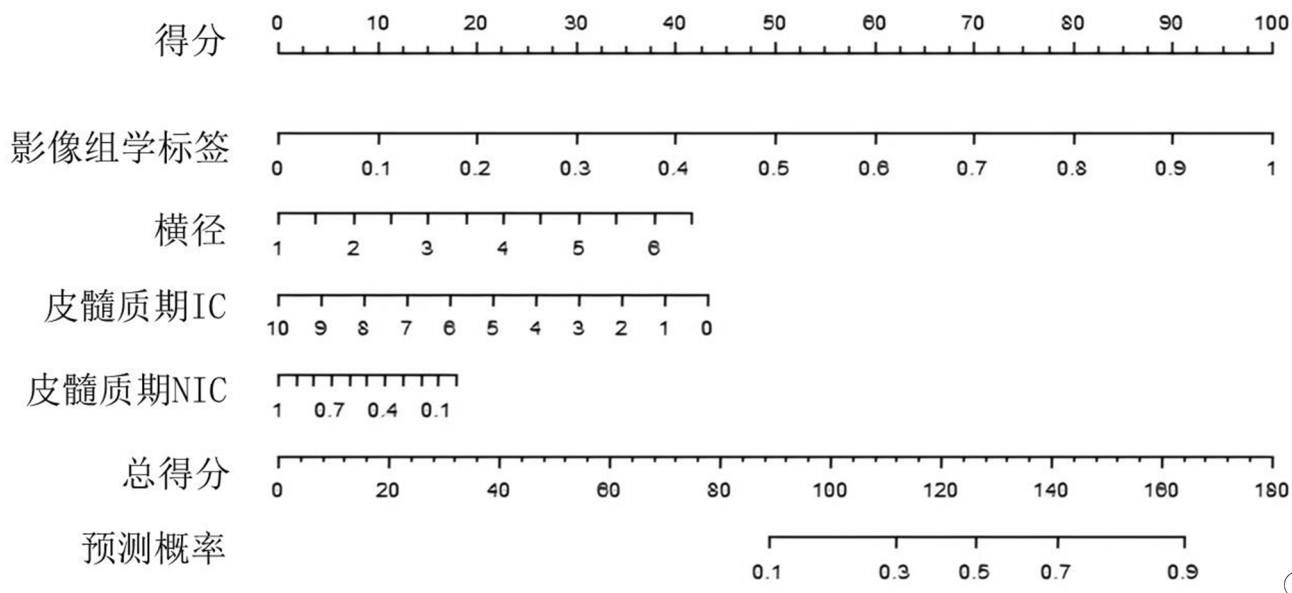


图3 列线图显示了联合模型(模型CR)预测肾透明细胞癌病理分级的临床应用。

表2 预测肾透明细胞癌 WHO/ISUP 分级的单因素与多因素 Logistic 回归分析结果

| 临床影像特征 | 单因素分析 | | 多因素分析 | |
|-----------|------------------|--------|------------------|--------|
| | OR(95%CI) | P 值 | OR(95%CI) | P 值 |
| 长径 | 1.04 (1.02,1.07) | <0.001 | 0.97(0.90,1.02) | 0.274 |
| 横径 | 1.07 (1.04,1.1) | <0.001 | 1.09 (1.01,1.18) | 0.036 |
| 皮髓质期 CT 值 | 0.98 (0.97,0.99) | <0.001 | 1.01 (0.99,1.04) | 0.155 |
| 肾造影期 CT 值 | 0.98 (0.96,0.99) | 0.011 | 1.00 (0.97,1.03) | 0.808 |
| 皮髓质期 IC | 0.47 (0.34,0.65) | <0.001 | 0.64 (0.42,0.97) | 0.034 |
| 皮髓质期 NIC | 0.14 (0.02,0.79) | <0.001 | 0.10 (0.02,0.50) | <0.001 |

注:IC,碘浓度;NIC,标准化碘浓度

表3 不同模型预测效果比较

| 模型 | 训练集 | | | 验证集 | | |
|--------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|
| | AUC(95% CI) | 灵敏度 | 特异度 | AUC(95% CI) | 灵敏度 | 特异度 |
| 临床模型 | 0.80(0.68~0.89) | 0.91 | 0.63 | 0.78(0.57~0.95) | 1.00 | 0.60 |
| 影像组学模型 | 0.85(0.75~0.93) | 0.86 | 0.74 | 0.83(0.65~0.97) | 0.90 | 0.70 |
| 联合模型 | 0.91(0.82~0.97) | 0.91 | 0.81 | 0.90(0.71~1.00) | 0.97 | 0.80 |

期 NIC 和 3 个特征构成,其训练集 AUC 值为 0.80,灵敏度和特异度分别为 0.91、0.63(表 3);影像组学模型(模型 R)包含 14 个组学特征,其中 8 个来自皮髓质期,6 个来自肾造影期(图 2),其训练集 AUC 值为 0.85,灵敏度和特异度分别为 0.86、0.74(表 3);将临床模型中的 3 个特征与影像组学评分构建联合模型(模型 CR),联合模型的列线图(图 3)。3 个模型中联合模

型的诊断效能优于临床模型和影像组学模型,AUC 值在训练集为 0.91(95%CI:0.82,0.97),验证集为 0.90(95%CI:0.71,1.00,表 3),且与临床模型、影像组学模型 AUC 值比较差异有统计学意义(Delong 检验, $P < 0.05$,图 4)。校准曲线显示,联合模型在训练集与验证集的预测结果接近于实际观察值(图 5)。决策曲线显示,联合模型在大多数阈值概率范围内获得了更多的

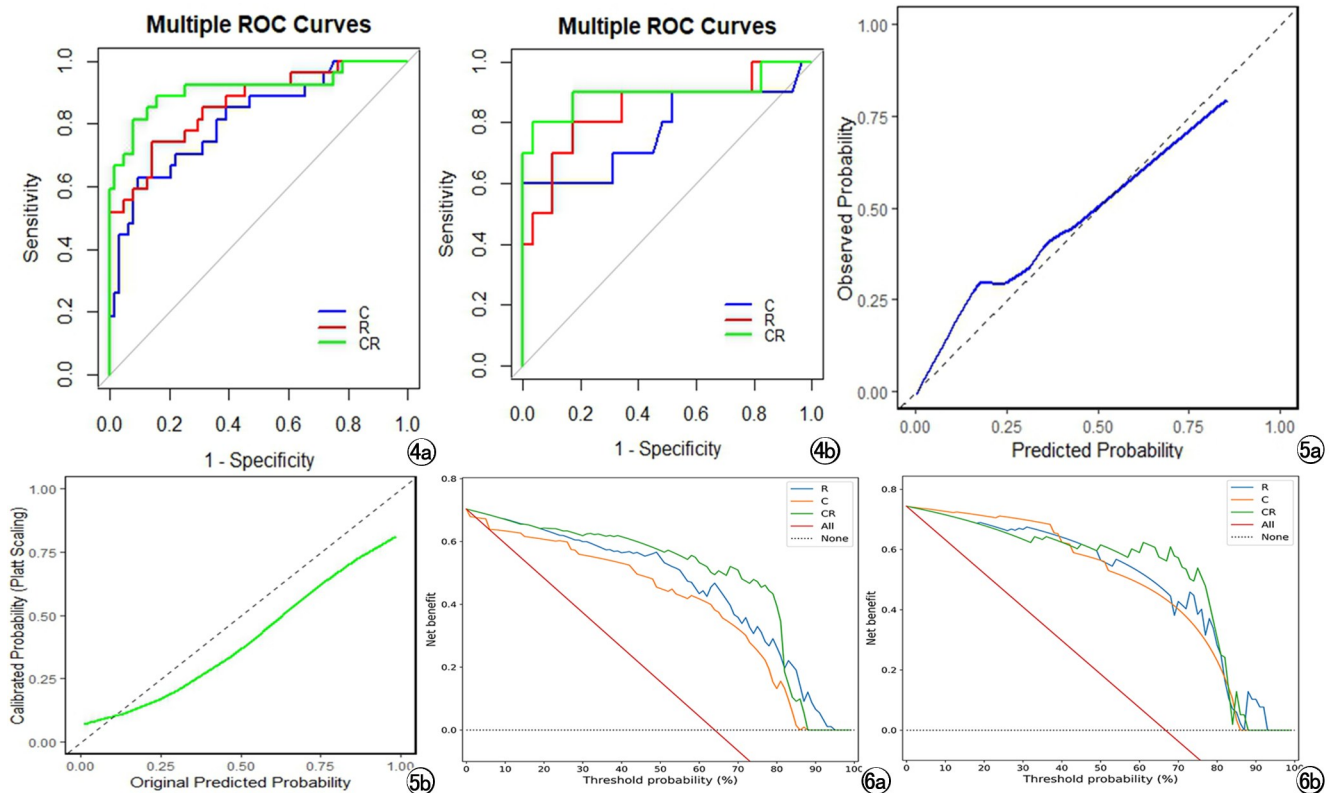


图4 不同模型预测肾透明细胞癌 WHO/ISUP 分级的 ROC 曲线。a)训练集;b)验证集。CR,联合模型;R,影像组学模型;C,临床模型。图5 诺莫图校准曲线分析。a)训练集;b)验证集。X 轴表示预测概率,而 Y 轴表示实际概率。实线表示联合模型的实际预测值,虚线表示理想估计值。图6 不同模型的临床决策曲线分析。a)训练集;b)验证集。CR,联合模型;R,影像组学模型;C,临床模型。X 轴表示阈值概率,Y 轴表示净收益。联合模型阈值范围最宽,且在一定阈值范围内,净收益最高。

净效益(图6)。

讨论

本研究表明光谱CT参数联合影像组学特征可能对术前预测肾透明细胞癌WHO/ISUP分级具有潜在价值。结果显示联合模型的诊断效能优于单独的临床模型和影像组学模型,提示多模态数据整合或可为术前分级提供更全面的信息。

DLCT作为一种先进的影像技术,通过分离和量化不同物质成分(如碘浓度、标准化碘浓度、有效原子序数等),显著提升了影像诊断的敏感性和特异性。与传统CT相比,DLCT对肿瘤特性的识别能力更强,并且提供更丰富的影像信息,如碘图、能谱曲线斜率等,有助于精准表征肿瘤的微观生物学特征^[14-15]。本研究中横径及碘浓度(IC)、标准化碘浓度(NIC)在低级别和高级别ccRCC中具有显著差异,其中高级别肿瘤中IC及NIC值低于低级别肿瘤,这与Zhang等^[11]的研究相似。这可能归因于高级别肿瘤血管生成异常、间质成分改变等病理特性,高级别肿瘤微血管不成熟,缺乏血液供应,可能导致IC值降低^[16-17]。赵金坤等^[18]的研究进一步证实并且骨髓质IC和NIC对高级别ccRCC的诊断AUC分别为0.811和0.935,表现出较好的诊断效能,支持了光谱参数的临床应用潜力。但是仅依靠光谱参数无法对肿瘤更多的信息(如肿瘤异质性)进行研究。

影像组学可通过提取高通量特征量化肿瘤异质性。目前,基于常规CT影像组学预测ccRCC病理分级的研究较多,并且取得了一定的成功^[19-20],然而,部分研究依赖于Furhman分级系统,其预后相关性较差,并且传统CT影像因其分辨率和组织对比度有限,可能影响异质性表征的敏感性。相比之下,光谱CT碘图可以更精确全面地反映肿瘤组织异质性,可能在分级预测中具有更大优势。已有研究表明基于碘图影像组学在恶性肿瘤诊断中表现出较高的准确性和稳定性^[21-22]。因此,本研究在ccRCC分级预测中构建了基于碘图的影像组学模型,利用更先进的成像技术来量化肿瘤内部的微观生物学特征。本研究最终筛选出的影像组学特征主要集中在纹理特征(13个)上,包括灰度共生矩阵(gray level cooccurrence matrix, GLCM)相关特征、灰度游程矩阵(gray level run length matrix, GLRLM)相关特征、灰度尺寸区矩阵(gray level size zone matrix, GLSZM)相关特征、邻近灰度差矩阵(neighboring gray tone difference matrix, NGTDM)相关特征,这与既往研究一致^[23-25],这些纹理特征能够量化CT图像中像素灰度分布及其空间关系,全面反映肿瘤组织的异质性,从而揭示组织异质性与病理分

级之间的联系^[26]。高级别肿瘤通常表现出较强的组织学异质性,这些在影像中以纹理粗糙、灰度分布不均的形式体现,因此纹理特征成为了分级预测的重要指标。

本研究不仅通过光谱CT参数定量分析,评估了不同病理分级肿瘤之间的组织成分差异及血供特性,还通过多尺度影像组学特征全面反映了肿瘤的异质性,表明了光谱CT参数及影像组学特征在ccRCC分级中的潜在临床价值,但仍存在一定局限性:样本量较小,可能限制了特征筛选的广泛适用性,未来研究需在多中心和更大样本中验证这些特征的稳定性;本研究采用手动勾画ROI,比较耗时耗力,未来可结合人工智能和自动分割算法;影像组学特征的可重复性受成像设备及算法的影响较大,建议制定标准化流程,以确保特征的稳定性。

综上所述,本研究通过整合光谱CT参数与影像组学特征,在表征不同病理分级肿瘤微观特性方面表现出较好的效果,为ccRCC的术前评估和个体化治疗提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Motzer RJ, Jonasch E, Agarwal N, et al. Kidney Cancer, Version 3. 2022, NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology [J]. J Natl Compr Canc Netw, 2022, 20(1): 71-90.
- [2] Gong Z, Xie J, Chen L, et al. Integrative analysis of TRPV family to prognosis and immune infiltration in renal clear cell carcinoma [J]. Channels (Austin), 2022, 16(1): 84-96.
- [3] Klatte T, Rossi S H, Stewart GD. Prognostic factors and prognostic models for renal cell carcinoma: a literature review [J]. World J Urol, 2018, 36(12): 1943-1952.
- [4] Delahunt B, Cheville J C, Martignoni G, et al. The International Society of Urological Pathology (ISUP) grading system for renal cell carcinoma and other prognostic parameters [J]. Am J Surg Pathol, 2013, 37(10): 1490-1504.
- [5] Delahunt B, Eble JN, Egevad L, et al. Grading of renal cell carcinoma [J]. Histopathology, 2019, 74(1): 4-17.
- [6] Dagher J, Delahunt B, Rioux-Leclercq N, et al. Clear cell renal cell carcinoma: validation of World Health Organization/International Society of Urological Pathology grading [J]. Histopathology, 2017, 71(6): 918-925.
- [7] Warren AY, Harrison D. WHO/ISUP classification, grading and pathological staging of renal cell carcinoma: standards and controversies [J]. World J Urol, 2018, 36(12): 1913-1926.
- [8] 郭刚, 马鑫. 2020版EAU肾细胞癌诊疗指南更新解读之一 [J]. 中华泌尿外科杂志, 2020, 41(8): 575-577.
- [9] Marconi L, Dabestani S, Lam TB, et al. Systematic review and meta-analysis of diagnostic accuracy of percutaneous renal tumour biopsy [J]. Eur Urol, 2016, 69(4): 660-673.
- [10] 李健文, 周长圣, 张龙江, 等. 双能量CT电子云密度/等效原子系数(Rho/Z)在小肾癌中的应用 [J]. 放射学实践, 2019, 34(2): 163-166.

- [11] Zhang X, Zhang G, Xu L, et al. Prediction of World Health Organization/International Society of Urological Pathology (WHO/ISUP) Pathological Grading of Clear Cell Renal Cell Carcinoma by Dual-Layer Spectral CT[J]. Acad Radiol, 2023, 30(10):2321-2328.
- [12] Ferro M, Crocetto F, Barone B, et al. Artificial intelligence and radiomics in evaluation of kidney lesions: a comprehensive literature review[J]. Ther Adv Urol, 2023, 15:17562872231164803.
- [13] 赵宝连, 萧毅. 肾癌影像组学研究现状及展望[J]. 放射学实践, 2020, 35(8):1068-1072.
- [14] 中华放射学杂志双层探测器光谱 CT 临床应用协作组. 双层探测器光谱 CT 临床应用中国专家共识(第一版) [J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(7):635-643.
- [15] 中华医学会放射学分会, 中国医师协会放射医师分会, 安徽省影像临床医学研究中心. 能量 CT 临床应用中国专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(5):476-487.
- [16] Ouyang AM, Wei ZL, Su XY, et al. Relative computed tomography (CT) enhancement value for the assessment of microvascular architecture in renal cell carcinoma[J]. Med Sci Monit, 2017, 23:3706-3714.
- [17] Jia ZZ, Gu HM, Zhou XJ, et al. The assessment of immature microvascular density in brain gliomas with dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging[J]. Eur J Radiol, 2015, 84(9):1805-1809.
- [18] 赵金坤, 张鹏, 叶兆祥, 等. 能谱 CT 碘浓度鉴别肾透明细胞癌病理 Fuhrman 分级[J]. 临床放射学杂志, 2016, 35(11):1684-1689.
- [19] Luo S, Wei R, Lu S, et al. Fuhrman nuclear grade prediction of clear cell renal cell carcinoma: influence of volume of interest delineation strategies on machine learning-based dynamic enhanced CT radiomics analysis[J]. Eur Radiol, 2022, 32(4):2340-2350.
- [20] Xv Y, Wei Z, Lv F, et al. Multiparameter computed tomography (CT) radiomics signature fusion-based model for the preoperative prediction of clear cell renal cell carcinoma nuclear grade: a multicenter development and external validation study[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(10):7031-7045.
- [21] Zhou Y, Su GY, Hu H, et al. Radiomics analysis of dual-energy CT-derived iodine maps for diagnosing metastatic cervical lymph nodes in patients with papillary thyroid cancer[J]. Eur Radiol, 2020, 30(11):6251-6262.
- [22] Feng FW, Jiang FY, Liu YQ, et al. Radiomics analysis of dual-layer spectral-detector CT-derived iodine maps for predicting tumor deposits in colorectal cancer[J]. Eur Radiol, 2025, 35(1):105-116.
- [23] 陈刚, 杨帆. 肾透明细胞癌的 CT 纹理分析及强化特征与其病理分级的相关性研究[J]. 临床泌尿外科杂志, 2021, 36(7):538-542.
- [24] Alhussaini AJ, Steele JD, Jawli A, et al. Radiomics machine learning analysis of clear cell renal cell carcinoma for tumour grade prediction based on intra-tumoural sub-region heterogeneity[J]. Cancers (Basel), 2024, 16(8):1454.
- [25] 颜蕾, 杨光杰, 苗文杰, 等. CT 影像组学术前预测肾透明细胞癌 Fuhrman 分级的价值[J]. 临床放射学杂志, 2020, 39(11):2267-2271.
- [26] Lubner MG, Smith AD, Sandrasegaran K, et al. CT texture analysis: definitions, applications, biologic correlates, and challenges [J]. Radiographics, 2017, 37(5):1483-1503.

(收稿日期:2025-03-06 修回日期:2025-06-14)