

肝脏 CT 灌注成像的精准诊疗价值与研究新方向

——基于血流动力学的功能影像学进展

徐翎评^{1,2} 孙艳秋² (通讯作者)

1.青海大学医学院 青海 西宁 810016

2.青海省人民医院 CT 室 青海 西宁 810006

【摘要】：肝脏作为人体代谢核心器官，其功能评估对疾病诊疗至关重要。传统影像学对微循环及血流动力学的表征存在局限性，而 CT 灌注成像（CTP）通过动态捕捉对比剂分布，可定量分析肝动脉灌注量（HAP）、门静脉灌注量（PVP）等关键参数，为肝脏疾病的早期诊断、疗效监测及预后预测提供了功能影像学新范式。本文系统综述 CTP 在肝癌、结直肠癌肝转移（CRLM）、肝硬化等疾病中的研究进展，探讨多模态融合与人工智能驱动下的技术革新方向，以期为肝脏疾病的精准诊疗提供理论依据。

【关键词】：CT 灌注成像；肝脏疾病；多模态成像；医学影像学

DOI:10.12417/2982-3676.25.03.025

引言

肝脏作为人体代谢的核心器官，承担着蛋白质合成、能量储存及毒素代谢等关键功能，其功能异常可引发肝炎、肝硬化、肝癌等疾病^[1]。由于肝脏疾病早期症状隐匿，确诊时多已进展至中晚期，因此开发精准的早期诊断技术至关重要。传统影像学手段虽在肝脏疾病筛查中广泛应用，但对微循环及血流动力学的评估能力有限。近年来，计算机断层扫描灌注成像（Computed Tomography Perfusion, CTP）通过动态捕捉对比剂分布，可定量分析肝脏血流参数，为早期诊断、疗效评估及预后预测提供了新思路^[2]。

1 CTP 在肝癌诊疗中的多维应用

1.1 早期诊断的精准化突破

肝细胞癌（HCC）早期症状隐匿，传统影像学对微循环异常敏感度不足。CTP 通过量化肿瘤血流异质性（如肝动脉灌注量 HAP、门静脉灌注量 PVP 等），可显著提升早期诊断效能^[3]。例如，模糊肿瘤边缘区域（II 型）的 CTP 参数与微血管密度（MVD）呈强相关性（ $r=0.72$, $P<0.01$ ）^[4]，为亚临床病灶的识别提供影像学依据。多模态联合策略进一步优化诊断流程，CTP 与 MRI 结合可将 HCC 诊断敏感性从 83.33% 提升至 97.92%^[5]，印证功能影像学在早期筛查中的核心价值。

1.2 疗效动态评估的实时化革新

在治疗响应监测中，CTP 通过动态捕捉血流参数变化，实现疗效的量化评估。岳晓等学者研究显示，射频消融（RFA）后坏死区（BPE）的 PVP 值显著高于活性肿瘤（ $P<0.05$ ），而肝灌注指数（HPI）则呈反向趋势，提示 CTP 可精准区分治疗反应区域^[6]。此外，Nakamura 等提出，索拉非尼治疗患者的肿瘤动脉灌注比值（Aptumor ratio）与生存期显著相关（ $HR=2.31$, $P=0.003$ ），为个体化治疗调整提供实时依据^[7]，我国学者卢连伟等也发现 CT 灌注可以定量分析经索拉非尼治疗前后肝癌内

的血流动力学变化，进而对索拉非尼的疗效进行早期预测^[8]。

1.3 微血管侵犯（MVI）无创预测与分子分型探索

MVI 是 HCC 术后复发的独立危险因素。Lewin 等基于通透性表面积（PS）构建的放射组学模型，可预测复发风险（Cox $p=0.004$ ）^[9]。此外，CTP 参数与肿瘤边缘微血管密度（MVD）显著相关，尤其在模糊边缘区域（II 型），提示其可间接反映 HCC 血管生成活性^[4]，为分子分型提供一定的影像学依据。

2 CTP 在结直肠癌肝转移（CRLM）中的功能评估革新

2.1 血流动力学特征与治疗反应预测

CRLM 的生物学行为高度依赖肝动脉供血，CTP 通过量化动脉增强分数（AEF）、血流量（BF）及渗透系数（PS）等参数，可精准反映肿瘤血管生成活性。

基线评估：Joo 等研究发现，CRLM 病灶的 AEF 值（ 58.9 ± 18.8 ）显著高于周围肝组织（ 35.5 ± 15.4 ）（ $P<0.001$ ），提示动脉血供优势可作为 CRLM 的影像标志物^[10]。

疗效预测：AEF 值能预测 CRLM 患者化疗的初始反应，低 AEF 值的肝转移瘤对化疗的初始反应更好。Kim 等前瞻性研究显示，化疗后 BF 值下降 $>30\%$ 的患者客观缓解率（ORR）达 68.4%，显著高于 BF 值稳定组（ORR=21.1%， $P=0.002$ ），且肿瘤边缘微血管通透性（Ktrans）变化与无进展生存期（PFS）显著相关（ $HR=0.42$, $P=0.01$ ）^[11]。

靶向治疗指导：Osawa 证实，基线 AEF >58.9 的 CRLM 患者对贝伐珠单抗治疗更敏感，肿瘤体积缩小率提升 29.6%（ $P=0.004$ ）^[12]。曹晋博进一步验证 BF、MTT 及 ADC 可作为评估 CRLM 患者接受靶向治疗疗效评估的潜在功能成像序列^[13]。提示 CTP 可辅助筛选靶向治疗优势人群。

2.2 术后可切除性评估的生理学突破

传统 CT 依赖解剖学体积测量评估肝切除安全性，而 CTP

通过量化残余肝组织的血流代偿能力,提供更精准的生理学依据。

血流代偿评估: van Amerongen 等研究发现,残余肝体积分注指数 (PI) $>45 \text{ mL/min/100 g}$ 的患者术后肝功能衰竭风险降低 72% ($\text{OR}=0.28, P=0.02$), 且 PI 与组织学缺氧标志物 (CA-IX) 呈负相关 ($r=-0.43, P=0.06$)^[14]。

局部复发监测: Meijerink 等采用全肝体积 CTP 技术监测 RFA 后病灶,发现活性复发区域的 HAP $>50 \text{ mL/min/100 g}$ 且 PVP $<10 \text{ mL/min/100 g}$ ($\text{AUC}=0.87, P<0.01$), 较传统 CT 体积测量的敏感度提升 26%^[15]。

2.3 多模态成像的协同增效

CTP 虽在血流动力学评估中优势显著,但需结合代谢影像技术以全面评估肿瘤生物学行为。Caruso 等提出,将 CTP 参数(如 AEF)与 PET-CT 的标准化摄取值 (SUV_{max}) 融合,可构建 CRLM 异质性评分模型 (H-score),其预测化疗耐药的 AUC 达 0.91 ($P<0.001$),显著优于单一模态 (CTP AUC=0.76; PET AUC=0.82)^[16]。该模型不仅可早期识别治疗抵抗病灶,还可指导局部介入治疗(如 RFA 或放疗)的靶区勾画,实现“精准打击”。

3 CTP 在肝纤维化与肝硬化评估中的突破

3.1 肝纤维化的动态监测

肝纤维化的可逆性特征要求早期精准诊断。CTP 通过量化平均通过时间 (MTT)、门静脉灌注量 (PVP) 及总肝灌注量 (TLP) 等参数,可动态区分不同纤维化阶段。Yuefu Zhan 等

学者采用 256 层 CT 灌注成像技术的研究显示,代偿期与失代偿期肝硬化患者的 PVP、TLP 及峰值增强 (PE) 较健康对照组显著下降 ($P<0.05$),而肝灌注指数 (HPI) 和达峰时间 (TTP) 则随病程进展逐渐升高,其中 TTP 对肝硬化分期的诊断效能最高 ($\text{AUC}=0.82$)^[17]。此外, PVP 与 TLP 与肝纤维化程度呈显著负相关 ($r=-0.68, P<0.01$),提示 CTP 参数可作为肝硬化进程的动态监测指标。陈子鑫等学者进一步验证,MTT 阈值设为 13.4 秒时,鉴别轻中度肝纤维化的敏感性与特异性分别为 71% 和 65%,且 MTT 是独立预测因子^[18]。

3.2 肝硬化的血流动力学特征与预后评估

肝硬化失代偿期患者表现为门静脉灌注量 (PVP) 下降 40%、总肝灌注量 (TLP) 减少及达峰时间 (TTP) 延长,提示 CTP 可动态监测肝功能失代偿进程^[17]。Amerongen 等人的研究表明,残余肝灌注指数 (PI) $>45 \text{ mL/min/100 g}$ 可降低术后肝功能衰竭风险 72% ($\text{OR}=0.28, P=0.02$),为外科决策提供关键生理学依据^[14]。

4 结语

CT 灌注成像已从单一的血流可视化工具,发展为集诊断、预后评估及治疗指导于一体的多功能技术。随着双能量 CT、光子计数 CT 等硬件革新,以及人工智能算法的深度整合,CTP 有望突破现有分辨率与计算效率的瓶颈。未来需开展大规模前瞻性队列研究,建立标准化的灌注参数阈值,并探索其在个体化医疗中的应用场景,最终实现从“解剖成像”到“功能-分子一体化成像”的跨越。

参考文献:

- [1] Trefts E, Gannon M, Wasserman DH: The liver. Current biology: CB 2017, 27(21): R1147-r1151.
- [2] Morita K, Nishie A, Asayama Y, Ushijima Y, Takayama Y, Okamoto D, Fujita N, Ikegami T, Yoshizumi T, Ishigami K: Congestion Area of the Right Lobe Graft in Living Donor Liver Transplantation: Quantitative Evaluation of Hemodynamics Using Computed Tomography Perfusion. Transplantation proceedings 2021, 53(5): 1653-1658.
- [3] 吕艳杰, 徐雪梅: 多层螺旋 CT 灌注成像与增强 MRI 对早期肝癌诊断效能对比分析 [J] CT 理论与应用研究. 2024, 33(S1): 137-140.
- [4] Bai RJ, Li JP, Ren SH, Jiang HJ, Liu XD, Ling ZS, Huang Q, Feng GL: A correlation of computed tomography perfusion and histopathology in tumor edges of hepatocellular carcinoma. Hepatobiliary & pancreatic diseases international: HBPDI 2014, 13(6): 612-617.
- [5] Lu W, Xu D: Comparison of CT and MRI in the Diagnosis of Liver Tumors: A Retrospective Case-Control Analysis. Current medical imaging 2024, 20(1): e15734056267873.
- [6] Yue X, Dong X, Huang M, Yang H, Qian K, Yi C, Alwalid O, Ren Y, Han P, Li Q: Early Assessment of Response to Radiofrequency Ablation With CT Perfusion Imaging in Rabbit VX2 Liver Tumor Model. Frontiers in oncology 2021, 11: 728781.
- [7] Nakamura Y, Kawaoka T, Higaki T, Fukumoto W, Honda Y, Iida M, Fujioka C, Kiguchi M, Aikata H, Chayama K et al: Hepatocellular carcinoma treated with sorafenib: Arterial tumor perfusion in dynamic contrast-enhanced CT as early imaging biomarkers for survival. European journal of radiology 2018, 98: 41-49.
- [8] 卢连伟, 谢平, 牛迎春, 袁耀芳, 魏敏: CT 联合 MRI 评估原发性肝癌患者索拉非尼联合微波冻融短期疗效及转移的价值 [J] 黑龙江医药科学. 2025, 48(02): 81-85.

- [9] Lewin M,Laurent-Bellue A,Desterke C,Radu A,Feghali JA,Farah J,Agostini H,Nault JC,Vibert E,Guettier C:Evaluation of perfusion CT and dual-energy CT for predicting microvascular invasion of hepatocellular carcinoma.Abdominal radiology(New York)2022,47(6):2115-2127.
- [10] Joo I, Lee JM, Kim KW, Klotz E, Han JK, Choi BI: Liver metastases on quantitative color mapping of the arterial enhancement fraction from multiphasic CT scans: evaluation of the hemodynamic features and correlation with the chemotherapy response. European journal of radiology 2011, 80(3): e278-283.
- [11] Kim DH, Kim SH, Im SA, Han SW, Goo JM, Willmann JK, Lee ES, Eo JS, Paeng JC, Han JK et al: Intermodality comparison between 3D perfusion CT and 18F-FDG PET/CT imaging for predicting early tumor response in patients with liver metastasis after chemotherapy: preliminary results of a prospective study. European journal of radiology 2012, 81(11): 3542-3550.
- [12] Osawa G, Yoshimatsu K, Yokomizo H, Okayama S, Sagawa M, Naritaka Y: Correlation between response to chemotherapy with concomitant bevacizumab for hepatic metastasis of colorectal cancer and degree of enhancement using contrast-enhanced computed tomography. Cancer chemotherapy and pharmacology 2013, 72(1): 209-215.
- [13] 曹晋博:结直肠癌肝转移局部灌注化疗联合靶向药物治疗的影像学评估及预后研究.广州医科大学.2023.
- [14] van Amerongen MJ, Vos AM, van der Woude W, Nagtegaal ID, de Wilt JHW, Fütterer JJ, Hermans JJ: Does perfusion computed tomography correlate to pathology in colorectal liver metastases? PloS one 2021, 16(1): e0245764.
- [15] Meijerink MR, van Waesberghe JH, van der Weide L, van den Tol P, Meijer S, Comans EF, Golding RP, van Kuijk C: Early detection of local RFA site recurrence using total liver volume perfusion CT initial experience. Academic radiology 2009, 16(10): 1215-1222.
- [16] Caruso M, Stanzione A, Prinster A, Pizzuti LM, Brunetti A, Maurea S, Mainenti PP: Role of advanced imaging techniques in the evaluation of oncological therapies in patients with colorectal liver metastases. World journal of gastroenterology 2023, 29(3): 521-535.
- [17] Zhan Y, Wu Y, Chen J, Liu F, Han X: [Value of liver perfusion imaging of 256-slice CT_{sep} in evaluation of the cirrhosis]. Zhong nan da xue xue bao Yi xue ban=Journal of Central South University Medical sciences 2016, 41(1): 44-50.
- [18] 陈子鑫,侯贵松,黄伟鹏,曾丽婷.肝脏 CT 灌注成像的临床应用及研究进展[J]实用医学影像杂志.2023,24(04):309-312.