



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.240648
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.240648
China Journal of General Surgery, 2025, 34(1):40-46.

· 述评 ·

影像组学赋能肝细胞癌智慧诊疗的初步探索进展

李永海¹, 钱桂香¹, 荚卫东²

(1. 安徽省合肥市第一人民医院 普通外科, 安徽 合肥 230001; 2. 中国科学技术大学附属第一医院 肝脏外科/肝胆胰外科 安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230001)



荚卫东

摘要

肝细胞癌(HCC)是最常见的原发性肝癌,也是全球癌症相关死亡的第三大原因。尽管近年来诊疗技术不断进步,HCC的总体治疗效果仍待提升。随着人工智能的发展,影像组学通过从医学影像中提取肉眼无法识别的定量特征,构建预测模型,为HCC的诊断、治疗决策、疗效评估和预后预测提供新路径,助力精准诊疗。本文结合最新研究进展,系统探讨影像组学在HCC智慧诊疗中的应用,以期推动综合诊疗水平的提升。

关键词

癌,肝细胞;人工智能;影像组学
中图分类号:R735.7

Preliminary explorations and advances in radiomics empowering the intelligent diagnosis and treatment of hepatocellular carcinoma

LI Yonghai¹, QIAN Guixiang¹, JIA Weidong²

(1. Department of General Surgery, Hefei First People's Hospital, Hefei 230001, China; 2. Department of Hepatic Surgery/Anhui Key Laboratory of Hepatobiliary and Pancreatic Surgery, the First Affiliated Hospital of the University of Science and Technology of China, Hefei 230001, China)

Abstract

Hepatocellular carcinoma (HCC) is the most common primary liver cancer and the third leading cause of cancer-related deaths worldwide. Despite continuous advancements in diagnostic and therapeutic technologies in recent years, the overall treatment outcomes for HCC remain to be improved. With the advancement of artificial intelligence, radiomics has emerged as an innovative approach by extracting quantitative features from medical images imperceptible to the naked eye, enabling predictive modeling for the diagnosis, treatment decision-making, therapeutic evaluation, and prognostic prediction of HCC. This article systematically reviews the application of radiomics in the intelligent management of HCC, based on the latest research progress, aiming to enhance comprehensive treatment strategies.

Key words

Carcinoma, Hepatocellular; Artificial Intelligence; Radiomics

CLC number: R735.7

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202104j07020048)。

收稿日期: 2024-12-11; 修订日期: 2025-01-15。

作者简介: 荚卫东, 中国科学技术大学附属第一医院主任医师, 主要从事肝脏外科方面的研究。

通信作者: 荚卫东, Email: jwd1968@ustc.edu.cn

肝细胞癌 (hepatocellular carcinoma, HCC) 是全球常见的恶性肿瘤, 发病率居全球第6位, 病死率居第3位^[1]。我国的HCC发病率和病死率均占全球50%以上, HCC具有异质性强、易转移复发和预后差等特点, 未来10年内, HCC仍是严重威胁我国人民生命健康的重大疾病^[2]。21世纪, 肝脏外科进入精准时代, 亟待优化诊疗策略以提升HCC患者的总生存 (overall survival, OS) 率^[3-4]。

人工智能 (artificial intelligence, AI) 正在迅速改变传统医疗, 尤其是在HCC的诊断和治疗上发挥着越来越重要的作用^[5]。智慧诊疗聚焦传统方法难以解决的问题, 通过临床诊疗信息与AI的创新融合, 催生出重大疾病的诊疗新策略。影像组学概念由荷兰学者Lambin等^[6-7]于2012年提出, 通过从放射影像中高通量提取大量特征, 并利用统计学和AI算法筛选出最有价值的特征构建肿瘤预测模型, 用于疾病诊疗和预后评估, 逐渐成为智慧诊疗的重要组成部分, 为HCC诊治提供了新机遇。影像组学研究主要基于超声 (ultrasound, US)、计算机扫描 (computed tomography, CT) 和磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI), 其中US在小HCC诊断中的性能与CT相当, 但应用受限, 而CT和MRI更常用于HCC的诊断和复发预测, 且两者具有相似的预测性能^[8]。本文结合影像组学的近期研究成果对HCC诊断、治疗决策、疗效判断及预后预测作一概述, 同时探讨当前面临的挑战及未来展望。

1 影像组学在HCC诊断中的应用

1.1 影像组学在HCC诊断及鉴别诊断中的应用

传统的HCC筛查工具中, US虽然应用广泛, 但其对早期HCC的敏感度仅为47%, 尤其在小病灶的准确识别方面存在明显不足。尽管CT和MRI具有较高的分辨率, 但对早期病变的识别依然受限, 尤其是在精准评估病变的异质性特征方面。影像组学技术通过量化深层次影像信息, 筛选出与疾病相关的重要特征, 为HCC的早期诊断和鉴别诊断提供了新的可能性。

基于影像组学的诊断模型在性能上与经验丰富的影像学专家相当, 甚至在某些应用场景中表现更优^[9]。Bharti等^[10]提出基于US图像的神经网络模型, 用于区分HCC发病的四个阶段 (正常肝脏、

慢性肝病、肝硬化和HCC), 分类准确率达到96.6%。此外, Popa等^[11]研究显示, 基于增强US、CT及MRI构建的影像组学模型在区分良恶性局灶性肝病方面表现突出。Guo等^[12]开发了结合三期相CT影像组学特征和临床变量的深度学习模型, 成功预测了肝硬化短期内进展为HCC的风险, 其在训练集、验证集和外部验证集中的曲线下面积 (area under the curve, AUC) 分别为0.929、0.902和0.918, 可早期预警肝硬化癌变患者。Deng等^[13]基于MRI的影像组学在术前鉴别HCC与肝细胞-胆管癌中展现出可靠的性能, 动脉期融合模型的AUC达0.878。在HCC与肝转移癌的鉴别诊断方面, Ravina等^[14]研究显示基于正电子发射断层扫描/射线计算机断层成像图像的纹理分析能够有效区分HCC和肝转移癌, 显示出其作为肝肿瘤无创鉴别诊断工具的应用潜力。随着影像组学技术的进一步发展, 特别是多模态影像数据融合和机器学习方法的优化, 将持续推动HCC的精准诊断与鉴别诊断, 提高早期诊断的准确率。

1.2 影像组学在术前预测HCC病理诊断中的应用

HCC的组织病理学特征是评估患者预后及复发风险的关键信息^[15]。然而, 病理诊断依赖术后标本分析, 难以在术前为治疗决策提供指导。影像组学技术的发展为术前无创评估HCC病理特征带来了可能, 并协助优化诊疗方案。

首先, 在预测HCC组织病理学分级方面, 影像组学模型表现出卓越的预测能力^[16]。Wei等^[17]通过从HCC患者的增强CT图像中提取肿瘤及其周围组织的影像组学特征, 开发了一种深度学习影像组学模型, 结果表明瘤周区域的特征在反映肿瘤微环境方面具有重要价值, 并与组织学分级密切相关。此外, 基于钆塞酸增强MRI的影像组学模型能够有效区分低级别和高级别HCC, 其中, 基于肝胆期的影像组学模型表现最佳 (模型的内、外部验证AUC分别为0.80、0.70)^[18]。其次, 伴有微血管浸润 (microvascular invasion, MVI) 的HCC预后较差, 易复发和转移, 影像组学模型在预测MVI方面也展现了出色的性能。笔者团队^[19]基于增强CT影像组学特征及临床因素构建的多变量模型, 不仅成功预测了乙肝病毒相关HCC患者的MVI, 验证集AUC达0.768, 还精准识别了高风险亚组 (M2), AUC达0.798。Liu等^[20]基于非增强T2加权MRI影像组学特征的预测模型有效预测了

HCC的MVI, 验证集的AUC为0.820。该简单快速的模型为预测MVI提供了客观支持, 具有实际应用潜力。最后, 影像组学技术在分子分型和免疫组化标志物预测中同样具有广阔前景。基于术前影像组学特征的模型在预测HCC关键分子标志物(如CK-19、GPC3等)方面表现优异, 结合多序列影像组学特征和临床因素的模型进一步提升了预测效果, 为个体化治疗提供了重要支持^[21-22]。

2 影像组学在HCC治疗决策中的应用

HCC的高度异质性使得相同的治疗方案可能产生截然不同的治疗效果。因此, 准确识别对于特定治疗方案敏感和获益患者显得尤为重要, 影像组学技术在HCC个体化治疗决策的制定中展现出重要价值。Liu等^[23]对419例早期HCC患者进行回顾性分析, 利用增强US结合深度学习的影像组学模型预测射频消融(radio frequency ablation, RFA)和手术切除后的无进展生存期(progression-free survival, PFS), 结果显示, 基于影像组学模型优化的治疗策略, 可将RFA和手术切除患者的2年PFS率提升12%~15%。

在不可切除HCC的治疗决策中, 影像组学同样可发挥关键作用。影像组学在经动脉化疗栓塞(transarterial chemoembolization, TACE)治疗中的应用展现出一定的潜力。Li等^[24]结合增强MRI的肿瘤生长模式、肿瘤及瘤周区域的影像组学特征以及白蛋白-胆红素评分, 可以实现对HCC患者TACE疗效的非侵入性和个性化预测, 这凸显了影像组学在指导治疗决策中的潜力, 为筛选适合TACE治疗的患者提供了依据。此外, Jin等^[25]基于术前影像组学模型, 预测了TACE治疗后肝外播散和血管侵犯的风险, 可协助筛选出不适合TACE治疗的患者。Lin等^[26]开发了一种基于影像组学的治疗决策模型, 用于指导不可切除HCC患者在TACE与肝动脉灌注化疗两种治疗方式之间做出最佳的选择, 该模型的AUC优于临床模型和ResNet模型。另一项研究^[27]则构建了影像组学模型来评估HCC患者接受TACE治疗后的预后, 并优化靶向序贯治疗策略, 结果表明, 无论是BCLC-B期高危患者还是低危患者, 靶向序贯治疗均显著改善了生存获益($P=0.018$, $P=0.012$), 影像组学模型可有效识别潜在的受益人群。

3 影像组学在HCC疗效判断中的应用

3.1 影像组学评估局部治疗反应

局部治疗方法如RFA、TACE、选择性内放射治疗等是HCC治疗的重要手段。然而, 由于患者间生物学特征的异质性, 其疗效存在显著个体差异。影像组学通过提取和量化医学影像的高阶特征, 为局部治疗的疗效判断提供了更精准的工具。

在RFA疗效评估的预测模型研究中, Horvat等^[28]利用术前MRI建立影像组学模型来预测HCC患者RFA治疗后是否完全缓解, 结果显示该模型的AUC达到0.76, 具有一定的预测能力。针对TACE, 影像组学的潜力已在多项研究中得到验证。Shi等^[29]基于瘤周10 mm影像组学特征和临床指标构建影像组学-临床综合模型能有效预测HCC患者首次接受TACE治疗的疗效, 该模型在验证集中表现出较高的预测准确性, AUC达0.949, 同时, 该综合模型还可将患者分为高风险和低风险组, 验证了瘤周影像组学在疗效评估中的应用。Yang等^[30]对111例TACE耐药后继续接受TACE治疗的HCC患者进行研究, 基于治疗前增强MRI的全肝影像组学特征的模型可有效评估患者的治疗反应, 模型的AUC为0.87, 展示了影像组学对疗效预测的价值。此外, 结合CT影像组学和临床-影像学特征的综合模型在预测HCC患者首次药物洗脱珠TACE的客观反应中表现出高预测准确性(AUC为0.927)和临床实用性, 该模型在验证集中敏感度为0.875, 特异度为0.833, 优于单一模型^[31]。在选择性内放射治疗疗效评估方面, Mahmoud等^[32]利用MRI影像组学特征评估接受钇-90放射性栓塞治疗的HCC患者的治疗反应。结果表明影像组学特征能够显著区分有反应者与无反应者, 并能预测早期治疗反应。

3.2 影像组学评估系统治疗疗效反应

影像组学在系统治疗疗效评估中同样具有重要价值, 可帮助筛选系统治疗获益最大的患者群, 提高治疗的靶向性。Xie等^[33]基于自监督对比学习的深度学习模型能够准确预测HCC患者的PD-1(AUC=0.867)和PD-L1(AUC=0.834)表达, 该无创方法可为HCC患者免疫检查点抑制剂的精准应用提供指导。此外, 基于低氧-免疫应激指数分层的影像组学模型已被证明能够成功识别初始免疫检查点抑制剂治疗的反应者, 为个体化免疫治疗

提供了进一步支持^[34]。Wen等^[35]开发了一种影像组学模型,用于预测不可切除HCC经新辅助转化治疗后的病理反应。研究显示,该模型在预测病理学完全缓解方面表现出较高的预测能力,训练集和验证集的AUC分别达到0.889和0.843。

4 影像组学在预测HCC预后中的应用

4.1 预测术后复发

尽管根治性治疗如手术切除和RFA能够显著改善HCC患者的OS率,但术后复发率依然居高不下,而影像组学可有效预测复发风险的大小。Peng等^[36]基于MRI建立的影像组学模型能够有效预测HCC经RFA后的早期复发(AUC为0.733~0.801)。笔者团队构建的机器学习模型通过整合影像组学和临床特征,在肝硬化背景下成功预测HCC肝切术后早期复发,验证集AUC达0.790^[37]。此外,Xie等^[38]开发的增强CT影像组学模型,结合临床特征、影像组学特征和病理组学特征的多模态模型,在预测早期HCC切除术后复发方面表现出较高的准确性,验证集AUC达0.863,并提供了可靠的风险分层支持。早期复发导致HCC患者在肝移植后预后不良,Zhao等^[39]基于CT的影像组学列线图能够有效预测HCC患者肝移植后的早期复发风险,其训练集和验证集AUC分别为0.882、0.917。校准曲线和决策曲线分析显示,该列线图的预测性能和临床实用性均优于临床模型。

4.2 预测生存预后

影像组学在预测HCC生存预后的评估中同样具有显著价值。基于MRI特征的影像组学研究表明,利用肿瘤及其周围区域的影像特征可有效预测早期HCC患者在RFA治疗后的PFS^[40]。此外,一项基于增强MRI影像组学和临床病理因素研究^[41]开发了预测HCC患者经肝切术后3年OS的模型,其C指数在训练集和验证集中分别为0.910和0.846,验证了模型的预测效能。此外,影像组学在TACE治疗预后的应用也具有广阔前景。Wang等^[42]研究表明,术前CT影像组学特征评分能有效预测HCC患者接受TACE后的OS和治疗反应。Zhou等^[43]进一步结合多序列MRI影像组学特征和临床变量,建立了一个联合模型用于预测TACE后OS,其AUC在训练集和验证集中分别达到0.893和0.803。

在肝移植术后预后评估中,影像组学也表现

出重要作用。Nie等^[44]发现,基于影像组学的肿瘤异质性特征与肝移植术后PFS显著相关,并能显著提升现有风险评分的预测性能。此外,在晚期HCC的预后评估中,人体成分参数具有一定的潜力。基于骨骼肌肉组织和脂肪组织分析参数的影像组学模型可预测晚期HCC患者的1年OS率。该模型在SIRT联合索拉非尼治疗组的预测价值高于接受索拉非尼单药治疗组(AUC: 0.803 vs. 0.758)^[45]。

5 影像组学与其他组学的联合

目前,影像组学的前沿还包括与各组学的联合应用。病理组学作为一种新兴工具,能够全面提取特征并改善肿瘤预后评估,同时与影像组学的整合可进一步提升模型性能。Feng等^[46]开发并验证了一种结合MRI影像组学特征和全切片病理图像的影像病理组学模型,用于预测HCC患者的OS,其列线图在训练集和验证集中的C指数分别为0.840和0.875,表现出优异的预测准确性和临床实用性。基因组学通过基因制图、定位及功能分析,从分子和基因层面揭示HCC的发病机制。影像基因组学通过将影像特征与关键基因及通路相关联,为模型提供生物学注释并提升其可解释性。Wang等^[42]开发的基于CT的影像组学模型鉴定出7个与肿瘤微环境异质性及TACE疗效相关的OS基因,成功预测OS和治疗反应,并在高/低风险组间显示出显著的生存差异。此外,一项基于CT的影像组学列线图研究表明,该模型不仅能够预测增殖性HCC,还可预测分层患者在手术或动脉内化疗栓塞后的无复发或PFS,并与HCC的碳代谢途径、免疫细胞浸润及肿瘤异质性显著相关^[47]。整合影像组学、病理组学和基因组学等的跨学科研究对于揭示HCC形态生物学及提升预后评估能力具有重要意义。

6 影像组学在HCC诊疗中的局限

尽管影像组学在HCC的诊断、治疗和预后预测中展现了巨大的潜力,但其临床应用仍面临诸多挑战。首先,现有研究多关注模型性能,而忽视了研究设计和结果分析的质量控制,导致可能存在系统误差,影响模型的可靠性和泛化能力。其次,模型结果的生物学可解释性不足,此“黑

箱”问题降低了临床医生对预测模型的信任度。此外，缺少多中心、前瞻性的外部验证，进一步限制了模型在真实临床环境中的应用。最后，目前临床指南尚未正式批准基于AI的影像组学模型应用于HCC的诊疗，其临床转化仍处于探索阶段。

7 小结与展望

影像组学结合AI技术在HCC的诊断、治疗决策、疗效判断和预后评估中展现了巨大的潜力，然而，其临床转化仍面临数据标准化不足、生物学可解释性欠佳及多中心、前瞻性外部验证的缺乏等诸多挑战。未来，影像组学可通过制定统一的数据采集规范、联合多组学研究进一步提高模型的生物可解释性、与深度学习的结合和标准化的多中心验证，有望在HCC智慧诊疗中发挥更大作用。

作者贡献声明：李永海、钱桂香负责文献资料收集、解读与分析以及文章初稿撰写和修改；英卫东负责文章选题和设计、文章写作思路、稿件最终审定稿。

利益冲突：所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA Cancer J Clin*, 2024, 74(3):229–263. doi:10.3322/caac.21834.
- [2] Mak LY, Liu K, Chirapongsathorn S, et al. Liver diseases and hepatocellular carcinoma in the Asia-Pacific region: burden, trends, challenges and future directions[J]. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 2024, 21(12):834–851. doi:10.1038/s41575-024-00967-4.
- [3] 英卫东. 精准肝切除治疗肝细胞癌关键技术[J]. *中国普通外科杂志*, 2014, 23(1):1–5. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2014.01.001.
Jia WD. Key techniques in precise hepatectomy for hepatocellular carcinoma[J]. *China Journal of General Surgery*, 2014, 23(1):1–5. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2014.01.001.
- [4] 李永海, 英卫东. 人工智能影像组学在肝细胞癌精准诊治中的研究进展[J]. *中华肝脏病杂志*, 2020, 28(11):905–909. doi:10.3760/cma.j.cn501113-20201022-00573.
Li YH, Jia WD. Research progress of radiomics with artificial intelligence in precise diagnosis and treatment of hepatocellular carcinoma[J]. *Chinese Journal of Hepatology*, 2020, 28(11):905–909. doi:10.3760/cma.j.cn501113-20201022-00573.
- [5] Bo Z, Song J, He Q, et al. Application of artificial intelligence radiomics in the diagnosis, treatment, and prognosis of hepatocellular carcinoma[J]. *Comput Biol Med*, 2024, 173:108337. doi:10.1016/j.combiomed.2024.108337.
- [6] Lambin P, Rios-Velazquez E, Leijenaar R, et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis[J]. *Eur J Cancer*, 2012, 48(4):441–446. doi:10.1016/j.ejca.2011.11.036.
- [7] Mostafa G, Mahmoud H, Abd El-Hafeez T, et al. The power of deep learning in simplifying feature selection for hepatocellular carcinoma: a review[J]. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2024, 24(1):287. doi:10.1186/s12911-024-02682-1.
- [8] Wang Q, Sheng Y, Jiang ZX, et al. What imaging modality is more effective in predicting early recurrence of hepatocellular carcinoma after hepatectomy using radiomics analysis: CT or MRI or both?[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(12):2012. doi:10.3390/diagnostics13122012.
- [9] Yang N, Ma Z, Zhang L, et al. Radiomics-based automated machine learning for differentiating focal liver lesions on unenhanced computed tomography[J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2024. doi:10.1007/s00261-024-04685-y. [Online ahead of print]
- [10] Bharti P, Mittal D, Ananthasivan R. Preliminary study of chronic liver classification on ultrasound images using an ensemble model[J]. *Ultrason Imaging*, 2018, 40(6):357–379. doi:10.1177/0161734618787447.
- [11] Popa SL, Grad S, Chiarioni G, et al. Applications of artificial intelligence in the automatic diagnosis of focal liver lesions: a systematic review[J]. *J Gastrointest Liver Dis*, 2023, 32(1):77–85. doi:10.15403/jgld-4755.
- [12] Guo L, Hao X, Chen L, et al. Early warning of hepatocellular carcinoma in cirrhotic patients by three-phase CT-based deep learning radiomics model: a retrospective, multicentre, cohort study[J]. *EClinicalMedicine*, 2024, 74:102718. doi:10.1016/j.eclinm.2024.102718.
- [13] Deng X, Liao Z. A machine-learning model based on dynamic contrast-enhanced MRI for preoperative differentiation between hepatocellular carcinoma and combined hepatocellular-cholangiocarcinoma[J]. *Clin Radiol*, 2024, 79(6):e817–e825. doi:10.1016/j.crad.2024.02.001.
- [14] Ravina M, Mishra A, Kote R, et al. Role of textural analysis parameters derived from FDG PET/CT in differentiating hepatocellular carcinoma and hepatic metastases[J]. *Nucl Med Commun*, 2023, 44(5):381–389. doi:10.1097/MNM.0000000000001676.

- [15] Ding T, Li X, Mo J, et al. Recurrence risk stratification of hepatocellular carcinomas based on immune gene expression and features extracted from pathological images[J]. *PLoS Comput Biol*, 2023, 19(12):e1011716. doi:10.1371/journal.pcbi.1011716.
- [16] Wang Q, Wang AR, Wu XY, et al. Radiomics models for preoperative prediction of the histopathological grade of hepatocellular carcinoma: A systematic review and radiomics quality score assessment[J]. *Eur J Radiol*, 2023, 166:111015. doi:10.1016/j.ejrad.2023.111015.
- [17] Wei J, Ji Q, Gao Y, et al. A multi-scale, multi-region and attention mechanism-based deep learning framework for prediction of grading in hepatocellular carcinoma[J]. *Med Phys*, 2023, 50(4):2290–2302. doi:10.1002/mp.16127.
- [18] Han YE, Cho Y, Kim MJ, et al. Hepatocellular carcinoma pathologic grade prediction using radiomics and machine learning models of gadoteric acid-enhanced MRI: a two-center study[J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2023, 48(1):244–256. doi:10.1007/s00261-022-03679-y.
- [19] Xu ZL, Qian GX, Li YH, et al. Evaluating microvascular invasion in hepatitis B virus-related hepatocellular carcinoma based on contrast-enhanced computed tomography radiomics and clinicoradiological factors[J]. *World J Gastroenterol*, 2024, 30(45):4801–4816. doi:10.3748/wjg.v30.i45.4801.
- [20] Liu JP, Cheng DL, Liao YT, et al. Development of a magnetic resonance imaging-derived radiomics model to predict microvascular invasion in patients with hepatocellular carcinoma[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(6):3948–3961. doi:10.21037/qims-22-1011.
- [21] Qin Q, Deng LP, Chen J, et al. The value of MRI in predicting hepatocellular carcinoma with cytokeratin 19 expression: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Radiol*, 2023, 78(12):e975–e984. doi:10.1016/j.crad.2023.08.013.
- [22] Li SQ, Yang CX, Wu CM, et al. Prediction of glypican-3 expression in hepatocellular carcinoma using multisequence magnetic resonance imaging-based histology nomograms[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2024, 14(7):4436–4449. doi:10.21037/qims-24-111.
- [23] Liu F, Liu D, Wang K, et al. Deep learning radiomics based on Contrast-Enhanced ultrasound might optimize curative treatments for Very-Early or Early-Stage hepatocellular carcinoma patients[J]. *Liver Cancer*, 2020, 9(4):397–413. doi:10.1159/000505694.
- [24] Li J, Zhou M, Tong Y, et al. Tumor growth pattern and intra- and peritumoral radiomics combined for prediction of initial TACE outcome in patients with primary hepatocellular carcinoma[J]. *J Hepatocell Carcinoma*, 2024, 11:1927–1944. doi:10.2147/JHC.S480554.
- [25] Jin Z, Chen L, Zhong B, et al. Machine-learning analysis of contrast-enhanced computed tomography radiomics predicts patients with hepatocellular carcinoma who are unsuitable for initial transarterial chemoembolization monotherapy: A multicenter study[J]. *Transl Oncol*, 2021, 14(4):101034. doi:10.1016/j.tranon.2021.101034.
- [26] Lin X, Wei R, Xu Z, et al. A deep learning model for personalized intra-arterial therapy planning in unresectable hepatocellular carcinoma: a multicenter retrospective study[J]. *EClinicalMedicine*, 2024, 75:102808. doi:10.1016/j.eclinm.2024.102808.
- [27] Liu K, Zheng X, Lu D, et al. A multi-institutional study to predict the benefits of DEB-TACE and molecular targeted agent sequential therapy in unresectable hepatocellular carcinoma using a radiological-clinical nomogram[J]. *Radiol Med*, 2024, 129(1):14–28. doi:10.1007/s11547-023-01736-0.
- [28] Horvat N, Araujo-Filho JAB, Assuncao-Jr AN, et al. Radiomic analysis of MRI to Predict Sustained Complete Response after Radiofrequency Ablation in Patients with Hepatocellular Carcinoma - A Pilot Study[J]. *Clinics (Sao Paulo)*, 2021, 76:e2888. doi:10.6061/clinics/2021/e2888.
- [29] Shi ZX, Li CF, Zhao LF, et al. Computed tomography radiomic features and clinical factors predicting the response to first transarterial chemoembolization in intermediate-stage hepatocellular carcinoma[J]. *Hepatobiliary Pancreat Dis Int*, 2024, 23(4):361–369. doi:10.1016/j.hbpd.2023.06.011.
- [30] Yang C, Yang HC, Luo YG, et al. Predicting survival using Whole-Liver MRI radiomics in patients with hepatocellular carcinoma after TACE refractoriness[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2024, 47(7):964–977. doi:10.1007/s00270-024-03730-z.
- [31] Zhang X, He Z, Zhang Y, et al. Prediction of initial objective response to drug-eluting beads transcatheter arterial chemoembolization for hepatocellular carcinoma using CT radiomics-based machine learning model[J]. *Front Pharmacol*, 2024, 15:1315732. doi:10.3389/fphar.2024.1315732.
- [32] Mahmoud M, Lin KH, Lee RC, et al. Assessment of Y-90 radioembolization treatment response for hepatocellular carcinoma cases using MRI radiomics[J]. *Mol Imaging Radionucl Ther*, 2024, 33(3):156–166. doi:10.4274/mirt.galenos.2024.59365.
- [33] Xie T, Wei Y, Xu L, et al. Self-supervised contrastive learning using CT images for PD-1/PD-L1 expression prediction in hepatocellular carcinoma[J]. *Front Oncol*, 2023, 13:1103521. doi:10.3389/fonc.2023.1103521.
- [34] Song LN, Wang B, Cai JL, et al. Stratifying ICIs-responsive tumor microenvironment in HCC: from parsing out immune-hypoxic crosstalk to clinically applicable MRI-radiomics models[J]. *Br J Cancer*, 2024, 130(8):1356–1364. doi:10.1038/s41416-023-

- 02463-z.
- [35] Wen H, Liang R, Liu X, et al. Predicting pathological response of neoadjuvant conversion therapy for hepatocellular carcinoma patients using CT-Based radiomics model[J]. J Hepatocell Carcinoma, 2024, 11:2145-2157. doi:10.2147/JHC.S487370.
- [36] Peng W, Jiang X, Zhang W, et al. A radiomics-based model can predict recurrence-free survival of hepatocellular carcinoma after curative ablation[J]. Asian J Surg, 2023, 46(7): 2689-2696. doi: 10.1016/j.asjsur.2022.09.130.
- [37] Qian GX, Xu ZL, Li YH, et al. Computed tomography-based radiomics to predict early recurrence of hepatocellular carcinoma post-hepatectomy in patients background on cirrhosis[J]. World J Gastroenterol, 2024, 30(15): 2128-2142. doi: 10.3748/wjg.v30.i15.2128.
- [38] Xie Q, Zhao Z, Yang Y, et al. A clinical-radiomic-pathomic model for prognosis prediction in patients with hepatocellular carcinoma after radical resection[J]. Cancer Med, 2024, 13(11): e7374. doi: 10.1002/cam4.7374.
- [39] Zhao JW, Shu X, Chen XX, et al. Prediction of early recurrence of hepatocellular carcinoma after liver transplantation based on computed tomography radiomics nomogram[J]. Hepatobiliary Pancreat Dis Int, 2022, 21(6): 543-550. doi: 10.1016/j.hbpd.2022.05.013.
- [40] Petukhova-Greenstein A, Zeevi T, Yang JL, et al. Mr imaging biomarkers for the prediction of outcome after radiofrequency ablation of hepatocellular carcinoma: qualitative and quantitative assessments of the liver imaging reporting and data system and radiomic features[J]. J Vasc Interv Radiol, 2022, 33(7): 814-824. doi:10.1016/j.jvir.2022.04.006.
- [41] Kuang F, Gao Y, Zhou Q, et al. MRI radiomics combined with clinicopathological factors for predicting 3-Year overall survival of hepatocellular carcinoma after hepatectomy[J]. J Hepatocell Carcinoma, 2024, 11:1445-1457. doi:10.2147/JHC.S464916.
- [42] Wang D, Zhang L, Sun Z, et al. A radiomics signature associated with underlying gene expression pattern for the prediction of prognosis and treatment response in hepatocellular carcinoma[J]. Eur J Radiol, 2023, 167:111086. doi:10.1016/j.ejrad.2023.111086.
- [43] Zhou M, Zhang P, Mao Q, et al. Multisequence MRI-Based radiomic features combined with inflammatory indices for predicting the overall survival of HCC patients after TACE[J]. J Hepatocell Carcinoma, 2024, 11: 2049-2061. doi: 10.2147/JHC.S481301.
- [44] Nie P, Zhang J, Miao W, et al. Incremental value of radiomics-based heterogeneity to the existing risk criteria in predicting recurrence of hepatocellular carcinoma after liver transplantation[J]. Eur Radiol, 2023, 33(9): 6608-6618. doi: 10.1007/s00330-023-09591-3.
- [45] Saalfeld S, Kreher R, Hille G, et al. Prognostic role of radiomics-based body composition analysis for the 1-year survival for hepatocellular carcinoma patients[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2023, 14(5):2301-2309. doi:10.1002/jcsm.13315.
- [46] Feng L, Huang W, Pan X, et al. Predicting overall survival in hepatocellular carcinoma patients via a combined MRI radiomics and pathomics signature[J]. Transl Oncol, 2025, 51:102174. doi: 10.1016/j.tranon.2024.102174.
- [47] Wang G, Ding F, Chen K, et al. CT-based radiomics nomogram to predict proliferative hepatocellular carcinoma and explore the tumor microenvironment[J]. J Transl Med, 2024, 22(1):683. doi: 10.1186/s12967-024-05393-3.

(本文编辑 姜晖)

本文引用格式:李永海,钱桂香,荚卫东.影像组学赋能肝细胞癌智慧诊疗的初步探索进展[J].中国普通外科杂志,2025,34(1):40-46. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.240648

Cite this article as: Li YH, Qian GX, Jia WD. Preliminary explorations and advances in radiomics empowering the intelligent diagnosis and treatment of hepatocellular carcinoma[J]. Chin J Gen Surg, 2025, 34(1):40-46. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.240648