综述 DOI：10.13406/j.cnki.cyxb.003925

多模态分子成像在原发性肝癌诊疗中的应用进展

赵永乐，杨智程，谭茂婷，陈虹霖，张　涵，赵红雲
（重庆医科大学附属第二医院消化内科，重庆　400010）

【摘　要】原发性肝癌作为全球高发病率、高病死率的恶性肿瘤，其早期诊断与精准治疗策略优化成为卫生健康领域的关键问题。传统影像技术因分子表征能力不足，越来越难以满足精准医疗时代背景下的临床需求。多模态分子成像技术通过整合超声成像、磁共振成像、光学成像等成像模态优势，实现了肝癌分子生物学信息与解剖结构精确定位的协同增效，对肝癌诊疗具有重要意义。本文就多模态分子成像在肝癌的早期诊断、精准治疗、疗效检测的应用进展予以综述。

【关键词】原发性肝癌；多模态分子成像；诊断；治疗
【中图分类号】R735.7　　【文献标志码】A

Advances in the application of multimodal molecular imaging in the diagnosis and treatment of primary liver cancer

Zhao Yongle, Yang Zhicheng, Tan Maoting, Chen Honglin, Zhang Han, Zhao Hongyun
(*Department of Gastroenterology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University*)

【**Abstract**】Primary liver cancer is a malignant tumor with high incidence and mortality rates worldwide, and the early diagnosis of primary liver cancer and the optimization of precise treatment strategies have become critical issues in the healthcare field. Due to the insufficient capabilities for molecular characterization, it is increasingly difficult for traditional imaging techniques to meet clinical needs in the era of precision medicine. Multimodal molecular imaging technology integrates the advantages of imaging modalities such as ultrasound imaging, magnetic resonance imaging, and optical imaging, thereby achieving synergistic enhancement between molecular biological information of liver cancer and precise anatomical localization and demonstrating a significant value in the diagnosis and treatment of liver cancer. This article reviews the advances in the application of multimodal molecular imaging in the early diagnosis, precise treatment, and therapeutic efficacy monitoring of liver cancer.

【**Key words**】primary liver cancer; multimodal molecular imaging; diagnosis; treatment

原发性肝癌（primary liver cancer，PLC）作为一种高发病率、高病死率的恶性肿瘤，已经成为全球第6位的常见恶性肿瘤和第3位的肿瘤致死病因[1]。根据组织学起源差异，PLC可分为肝细胞癌（hepatocellular carcinoma，HCC）、肝内胆管癌以及混合型肝癌3种病理亚型，其中HCC占比75%~85%[2-3]。由于该疾病具有发病隐匿、早期临床表现不典型、进展迅速等特点，加之肝癌早期筛查体系尚不健全等问题，约70%患者确诊时已处于晚期，丧失根治性手术机会，最终导致总体预后不良，并带来严重社会经济负担[1,3-4]。因此，早期诊断肝癌并实施精准治疗干预是提高患者生存率、改善患者预后的关键环节。

传统影像学检测技术主要提供肝脏解剖结构信息，在功能代谢和肿瘤分子特征表征方面存在明显不足，同时面临无法兼顾成像深度、分辨率、实时显影、安全性等多维度显像需求，导致其在肝癌早期诊断及鉴别诊断中的准确性受限，难以满足精准医疗时代背景下的临床需求[5-6]。

分子影像学融合了分子生物学与医学影像学的优势，通过无创性成像技术实现组织、细胞及亚细胞层面的分子可视化，可以实现活体状态下的肿瘤生物学行为监测与定量分析[7-9]。多模态分子成像技术综合超声成像、光声成像、核医学成像等多种显像性能于一体，实现优势互补[10-12]，提升了肝癌的早期检出率、治疗靶向性及疗效评估准确性，为肝癌的早期诊断、精准治疗、疗效评价、复发监测提供了新方法和新策略。本文综述了多模态分子成像技术在肝癌诊疗中的应用进展，并探讨其临床应用前景。

作者介绍：赵永乐，Email：yonglezh918@163.com，
研究方向：肝癌的超声分子影像诊疗一体化研究。
通信作者：赵红雲，Email：zhychina@cqmu.edu.cn。
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目（编号：81801714）；重庆市自然科学基金面上资助项目（编号：CSTB2022NSCQ-MSX0909）；重庆医科大学附属第二医院“宽仁英才”资助项目（编号：2021240308）；西藏自治区自然科学基金组团式医学援藏资助项目[编号：XZ2023ZR-ZY75(Z)]。
优先出版：https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20250827.1454.018（2025-08-28）

1 多模态分子成像概述

分子影像学作为医学影像学与分子生物学的交叉学科，致力于在细胞或分子层面实现活体生物过程的无创检测与可视化表征[13]。当前主流的分子成像模态包括光学成像（optical imaging，OI）、超声成像（ultrasound imaging，USI）、磁共振成像（magnetic resonance imaging，MRI）、计算机断层扫描（computed tomography，CT）及放射性核素成像[10]。

不同成像模态各具特点：光学成像通过检测生物组织内光学信号的时空分布获取分子信息，其亚型包括荧光成像（fluorescence imaging，FI）、生物发光成像（bioluminescence imaging，BLI）、光声成像（photoacoustic imaging，PAI）及光学相干断层扫描（optical coherence tomography，OCT）。该技术具有高分辨率、高灵敏度及优良生物相容性，但受限于成像深度、组织自发荧光背景干扰及光子散射效应[14-16]。超声分子成像通过声学造影剂与靶向分子（如特异性配体或抗体）的功能化偶联，实现病变区域的特异性显影[17]，具备实时、动态成像的优势，然而其图像分辨率与深部组织检测能力有待提升。MRI 凭借卓越的软组织对比度成为分子影像研究的重要工具[10,18-19]，虽空间分辨率极佳，但其灵敏度较低，难以检测低浓度生物标志物[20]。CT 以高空间分辨率、强穿透能力及快速成像见长，但存在辐射剂量高及软组织对比度不足的局限性[21]。放射性核素成像通过示踪放射性标记化合物在体内的生物分布进行显像[22-23]，单光子发射计算机断层成像（single-photon emission computed tomography，SPECT）与正电子发射断层成像（positron emission tomography，PET）作为先进的放射性核素分子成像技术，可实现分子靶点/通路的全身高灵敏度检测[10]，但无法充分呈现解剖结构信息。

多模态分子成像结合了 2 种或 2 种以上的成像模态，实现了优势互补，为临床诊疗提供了更多的生物学信息，为疾病的早诊早治提供了更多的有效手段。例如，有团队研发的近红外荧光（near-infrared fluorescence，NIRF）/PET 双模态探针 ^{64}Cu-LS498，利用 PET 的深层组织穿透性弥补 FI 的浅表探测局限，验证了多模态策略的可行性及实用性[24]。Choi D 等[25]基于乙二醇壳聚糖（glycol chitosan，GC）通过偶联含碘泛影酸（diatrizoic acid，DTA）与封装全氟戊烷（perfluoropentane，PFP）构建的 CT/超声双模态探针 GC-DTA-PFP-NPs 通过 CT 快速定位肿瘤后，结合超声实时监测病灶动态变化，提升诊断信息的全面性与准确性。Kircher MF 等[26]设计的三模态 MRI/PAI/表面增强拉曼散射（surface-enhanced Raman scatting，SERS）纳米颗粒 MPR 通过 3 种显像模式的互补优势明显提升脑肿瘤成像精度与手术导航效果。Liu Y 等[27]报道了一种新型多孔金纳米团簇修饰的一氧化锰纳米复合材料作为 MRI/PAI/CT 三模态探针，通过多维信息整合优化肿瘤检测效能。

2 多模态分子成像实现肝癌早期诊断

多模态分子成像技术因其整合功能代谢与解剖结构信息的独特优势，在 HCC 早期诊断中展现出明显的临床应用潜力。该技术通过高灵敏度分子靶向显影与高分辨率解剖定位的协同增效，可精准识别微小、隐匿病灶并明确其与毗邻组织的空间关系，为早期病灶筛查及个体化治疗策略制定提供关键依据。

Watcharin W 等[28-29]基于人血清白蛋白（human serum albumin，HSA）构建了二乙三胺五乙酸钆（gadolinium-diethylenetriaminepentaacetic acid，Gd-DTPA）与荧光染料罗丹明 123（rhodamine 123，Rho123）共偶联的荧光/MRI 双模态纳米材料 Gd-Rho-HSA-NPs，通过 T1 加权 MRI 实现了小鼠 HCC 模型的活体检测。研究表明，泊洛沙姆 908（poloxamine 908）对 NPs 的表面修饰可延长 MRI 信号增强时长，同时可降低纳米颗粒在肿瘤相关巨噬细胞中的非特异性滞留，从而优化病灶-背景对比度。该研究比较了此探针与特异性对比剂钆塞酸二钠（gadolinium-ethoxybenzyl-diethylenetriamine-pentaacetic acid，Gd-EOB-DTPA）增强 HCC 肿瘤组织 MRI 信号强度的能力，结果显示在等量注射条件下注射 Gd-Rho-HSA-NPs 组小鼠的对比度噪声比增强幅度更高，提示该探针具有更高的病灶检测灵敏度。Poot AJ 等[30]开发的[^{68}Ga]Ga-RAYZ-8009 探针靶向 HCC 特异性生物标志物磷脂酰肌醇蛋白聚糖-3（glypican-3，GPC3），整合 PET 的高灵敏度与 CT 的高解剖分辨率，实现了对于 GPC3 阳性 HCC 的高对比度显像，且足够安全，有望用于 HCC 的诊断和分期。Xu H 等[31]成功研制了一种 ^{99}mTc-HPG 分子探针，该探针特异性靶向 GPC3 受体，通过 SPECT/CT 对肿瘤进行成像。经试验验证，该显像剂不仅表现出良好的化学稳定性与生物相容性，其高受体结合特异性可明显提升病灶对比度，在 HCC 的早期影像学诊断中展现出重要应用价值。Guo Z 等[32]创新性地构建了双同位素同步成像技术体系，通过联合应用 ^{131}I-NGA 与 ^{99}mTc-3P-RGD$_2$ 双示踪剂，分别特异性靶向肝细胞上的去唾液酸糖蛋白受体（asialoglycoprotein receptor，ASGPR）及肿瘤新生血管内皮细胞过表达的整合素 $\alpha_v\beta_3$ 受体。基于 SPECT/CT 双模态成像技术，该研究通过量化 2 种同位素在纤维化肝脏和肝脏肿瘤组织的摄取差异，诊断和鉴别肝癌和肝纤维化并评估残留的功能化肝脏体积。临床前研究数据证实相较于传统单靶点显像方法，该策略在肝癌诊断敏感度和特异度方面均具有统计学优势。

多模态分子成像通过系统整合功能代谢显像与解剖结构显像，兼具高灵敏度与高空间分辨率特性，可提升对早期肝癌的检出率，为肝癌的早期诊断及分期评估提供重要技术支撑。

3 多模态分子成像助力肝癌精准治疗

多模态分子成像通过整合多种成像模式优势，能够实现肝癌病灶的精确定位、肿瘤边界的清晰界定及与毗邻血管结构的解剖关系解析，为治疗决策提供重要依据。近年来，研究者通过对分子探针进行创新，逐步在术中导航和诊疗协同方面实现突破。

在术中实时导航方面，Ai T 等[33]开发了一种具有持久发光特性的铬掺杂纳米颗粒 $ZnGa_2O_4Cr_{0.004}$，该材料在 HCC 切除术的术中引导展现出明显的应用价值。研究表明，该纳米颗粒在术前诊断中不仅具备 CT 的高空间分辨率和深部组织穿透性，还具有长达数小时的持续发光特性，可增强术中组织对比度，实现了肝癌术前精准诊断与术中实时导航。动物实验证实，相较于传统手术组，发光引导成像手术组具有

更高的生存率。另外，Zhao XY 等[34]创新性地引入亚甲蓝（methylene blue，MB），构建了基于成纤维细胞活化蛋白抑制剂（fibroblast activation protein inhibitor，FAPI）的分子探针 NOTA-FAPI-MB。该探针在 PET/CT 成像的基础上增加了荧光显像能力，在病灶检测灵敏度和肿瘤边缘勾画方面表现出卓越性能，其术中导航价值在肝癌切除术中具有重要临床应用前景。随着多模态分子成像技术向治疗增效延伸，Ma X 等[35]研发了一种钆螯合氧化石墨烯共轭金纳米材料 GO-AuNS-DOTA-Gd，通过术前 MRI 精准确定位联合术中用 PAI 引导光热治疗，使肿瘤残留率和卫星转移灶发生率降低 85.71%，明显提升治疗效果。值得关注的是，Bao H 等[36]基于碘-131 标记的金丝桃素（iodine-131-labeled hypericin，^{131}I-Hyp）开发了一种多功能纳米颗粒 PNP@（^{131}I-Hyp），与 FI、SPECT 成像和靶向放疗兼容，聚集在皮下肿瘤的坏死区，并通过放疗抑制残留肿瘤，实现了诊疗一体化，为肝癌的精准诊疗提供了新的解决方案。

当前研究证实，多模态分子成像通过融合解剖定位、代谢特征和分子生物学信息，已发展成为助力肝癌精准治疗的关键技术。该技术不仅能够提供肿瘤的空间定位信息，还能反映其分子特征和功能代谢状态，为个体化治疗方案的制定提供更多维度的依据。随着纳米探针技术的持续创新和影像设备的迭代升级，多模态分子成像在肝癌诊疗领域将展现出更广阔的临床应用前景。

4 多模态分子成像强化肝癌疗效监测

多模态分子成像技术有效克服了单一成像技术的局限性，提升 HCC 治疗后转移复发监测的准确性、时效性，兼顾评估治疗反应的无创性，并为筛选可能从靶向治疗中受益的药物敏感患者提供客观依据。

Seo HJ 等[37]研究显示，氟代脱氧葡萄糖（^{18}F-fluorodeoxyglucose，^{18}F-FDG）PET/CT 相较于传统核素骨显像，在 HCC 骨转移检测中展现出更高的敏感性和生物学信息丰度，具有重要预后评估价值。Kesler M 等[38]的研究表明，镓-68 标记的前列腺特异性膜抗原（^{68}Ga-prostate specific membrane antigen，^{68}Ga-PSMA）作为新型 PET/CT 示踪剂，可通过异常摄取特征有效区分 HCC 肿瘤组织与正常肝实质，并能鉴别活性肿瘤与坏死肿瘤，在 HCC 的诊断和复发监测中展现出重要的临床应用潜力。Frankl J 等[39]指出 PET/MRI 作为新型混合分子成像技术，通过结合 MRI 卓越的软组织分辨率与 PET 代谢显像，相较于目前运用较多的 PET/CT，在对比度分辨率、运动补偿、图像配准等方面存在优势，对改善肝癌转移的检测效果和减少辐射暴露有重要意义。当前研究已建立多模态分子成像指导下的疗效评估体系来研究索拉菲尼、贝伐珠单抗等药物以及钇 90 放疗栓塞对肝癌的治疗作用，实现了对治疗效果的更准确、更方便、更省时评估[40-43]。

综上所述，多模态分子成像已成为监测 HCC 肿瘤进展及评价治疗响应的有力工具。

5 小结与展望

多模态分子成像结合了不同显像模式优势于一体，不仅可精准获取肿瘤形态学特征及空间位置信息，还可通过分子探针实现肿瘤生物学行为的可视化，在肝癌的诊疗领域呈现出独特的优越性。此外，随着肝癌治疗新策略的不断发展，如靶向治疗联合免疫治疗的进一步应用[44]，多模态分子成像将为肝癌的诊疗全流程提供更多选择与可能，为肝癌的早诊早治及疗效检测奠定新的理论基础。

尽管多模态分子成像技术在肝癌诊疗中展现出独特的优越性，但其进一步发展仍面临若干挑战。其一，在技术创新层面，需结合人工智能技术开发新一代智能图像融合算法与多模态成像系统，从而提升成像速度、质量和诊断效能。其二，针对不同模态间成像参数的兼容性问题，需构建标准化的数据整合与图像分析体系，以实现跨模态影像数据的精确配准与联合解析。其三，持续探索肝癌细胞表面新的特异性受体靶点，研发兼具高灵敏度与高特异性的分子探针，始终是多模态分子成像技术在肝癌精准诊疗领域的热点。

与此同时，如何突破基础研究向临床应用转化的瓶颈，实现理论成果的落地转化，是当前急需解决的核心问题。首先，分子探针需要同时满足有效性与安全性，在安全治疗剂量下满足成像需求，这对探针的设计与合成提出极高要求。其次，高端分子成像设备和个性化探针的高昂成本进一步限制了前沿技术下沉。另外，临床前研究依赖于特定条件下的动物模型，但这些条件在临床研究很难实现，因此有可能出现分子探针在动物模型中表现优异，但在人体内失效。

未来需要有更多的研究聚焦于多模态分子成像技术的深度优化与临床转化瓶颈突破，进一步挖掘多模态分子成像技术在肝癌诊疗领域的应用价值。随着多模态分子成像技术的不断发展，这些技术创新将推动多模态分子成像构建起覆盖肝癌早期筛查、精准治疗和动态疗效评估的全链条技术体系。我们相信，多模态分子成像将来会在制定个性化肝癌治疗方案、揭示肝癌异质性微环境和发病机制等方面做出更加突出的贡献，为肝癌患者谋得更大福祉。

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.

[2] Rumgay H, Ferlay J, de Martel C, et al. Global, regional and national burden of primary liver cancer by subtype[J]. Eur J Cancer, 2022, 161: 108-118.

[3] Arnold M, Abnet CC, Neale RE, et al. Global burden of 5 major types of gastrointestinal cancer[J]. Gastroenterology, 2020, 159(1): 335-349.

[4] Wu Q, Qin SK. Features and treatment options of Chinese hepatocellular carcinoma[J]. Chin Clin Oncol, 2013, 2(4): 38.

[5] Noda Y, Ando T, Kaga T, et al. Pancreatic cancer detection with dual-energy CT: diagnostic performance of 40 keV and 70 keV virtual monoenergetic images[J]. La Radiol Med, 2024, 129(5): 677-686.

[6] Pereira SP, Oldfield L, Ney A, et al. Early detection of pancreatic cancer[J]. Lancet Gastroenterol Hepatol, 2020, 5(7): 698-710.

[7] Narula J, Dilsizian V. From better understood pathogenesis to superior molecular imaging, and back[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2008, 1(3): 406-409.

[8] Dilsizian V, Chandrashekhar Y. Molecular imaging: new promises [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2022, 15(11): 2019-2021.

[9] Huang J, Liu F, Han X, et al. Nanosonosensitizers for highly efficient sonodynamic cancer theranostics[J]. Theranostics, 2018, 8(22): 6178-6194.
[10] Wu M, Shu J. Multimodal molecular imaging: current status and future directions[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2018, 2018: 1382183.
[11] Auletta L, Gramanzini M, Gargiulo S, et al. Advances in multimodal molecular imaging[J]. Q J Nucl Med Mol Imaging, 2017, 61(1): 19-32.
[12] Wang Y, Hu Y, Ye D. Activatable multimodal probes for *in vivo* imaging and theranostics[J]. Angew Chem Int Ed, 2022, 61(50): e202209512.
[13] Razgulin A, Ma N, Rao JH. Strategies for *in vivo* imaging of enzyme activity: an overview and recent advances[J]. Chem Soc Rev, 2011, 40(7): 4186-4216.
[14] Wang Y, Hu X, Weng J, et al. A photoacoustic probe for the imaging of tumor apoptosis by caspase-mediated macrocyclization and self-assembly[J]. Angew Chem Int Ed, 2019, 58(15): 4886-4890.
[15] Reinhardt CJ, Chan J. Development of photoacoustic probes for *in vivo* molecular imaging[J]. Biochemistry, 2018, 57(2): 194-199.
[16] Miao Q, Pu K. Emerging designs of activatable photoacoustic probes for molecular imaging[J]. Bioconjug Chem, 2016, 27(12): 2808-2823.
[17] Voigt JU. Ultrasound molecular imaging[J]. Methods, 2009, 48(2): 92-97.
[18] Blamire AM. The technology of MRI: the next 10 years?[J]. Br J Radiol, 2008, 81(968): 601-617.
[19] Haris M, Yadav SK, Rizwan A, et al. Molecular magnetic resonance imaging in cancer[J]. J Transl Med, 2015, 13: 313.
[20] Woźniak M, Płoska A, Siekierzycka A, et al. Molecular imaging and nanotechnology-emerging tools in diagnostics and therapy[J]. Int J Mol Sci, 2022, 23(5): 2658.
[21] Massoud TF, Gambhir SS. Molecular imaging in living subjects: seeing fundamental biological processes in a new light[J]. Genes Dev, 2003, 17(5): 545-580.
[22] Williams LE. Anniversary paper: nuclear medicine: fifty years and still counting[J]. Med Phys, 2008, 35(7): 3020-3029.
[23] van den Hoff J. Principles of quantitative positron emission tomography[J]. Amino Acids, 2005, 29(4): 341-353.
[24] Lee H, Akers WJ, Cheney PP, et al. Complementary optical and nuclear imaging of caspase-3 activity using combined activatable and radio-labeled multimodality molecular probe[J]. J Biomed Opt, 2009, 14(4): 040507.
[25] Choi D, Jeon S, You DG, et al. Iodinated echogenic glycol chitosan nanoparticles for X-ray CT/US dual imaging of tumor[J]. Nanotheranostics, 2018, 2(2): 117-127.
[26] Kircher MF, de la Zerda A, Jokerst JV, et al. A brain tumor molecular imaging strategy using a new triple-modality MRI-photoacoustic-Raman nanoparticle[J]. Nat Med, 2012, 18(5): 829-834.
[27] Liu Y, Lü XL, Liu H, et al. Porous gold nanocluster-decorated manganese monoxide nanocomposites for microenvironment-activatable MR/photoacoustic/CT tumor imaging[J]. Nanoscale, 2018, 10(8): 3631-3638.
[28] Watcharin W, Schmithals C, Pleli T, et al. Detection of hepatocellular carcinoma in transgenic mice by Gd-DTPA- and rhodamine 123-conjugated human serum albumin nanoparticles in T1 magnetic resonance imaging[J]. J Control Release, 2015, 199: 63-71.
[29] Watcharin W, Schmithals C, Pleli T, et al. Biodegradable human serum albumin nanoparticles as contrast agents for the detection of hepatocellular carcinoma by magnetic resonance imaging[J]. Eur J Pharm Biopharm, 2014, 87(1): 132-141.
[30] Poot AJ, Lapa C, Weber WA, et al. ^{68}Ga] Ga-RAYZ-8009: a glypican-3-targeted diagnostic radiopharmaceutical for hepatocellular carcinoma molecular imaging-a first-in-human case series[J]. J Nucl Med, 2024, 65(10): 1597-1603.
[31] Xu H, Tang Y, Zhao Y, et al. SPECT imaging of hepatocellular carcinoma detection by the GPC3 receptor[J]. Mol Pharm, 2021, 18(5): 2082-2090.
[32] Guo Z, Gao M, Zhang D, et al. Simultaneous SPECT imaging of multi-targets to assist in identifying hepatic lesions[J]. Sci Rep, 2016, 6: 28812.
[33] Ai T, Shang WT, Yan H, et al. Near infrared-emitting persistent luminescent nanoparticles for Hepatocellular Carcinoma imaging and luminescence-guided surgery[J]. Biomaterials, 2018, 167: 216-225.
[34] Zhao XY, Zhang GJ, Chen JL, et al. A rationally designed nuclei-targeting FAPI 04-based molecular probe with enhanced tumor uptake for PET/CT and fluorescence imaging[J]. Eur J Nucl Med Mol Imag, 2024, 51(6): 1593-1604.
[35] Ma X, Jin Y, Wang Y, et al. Multimodality molecular imaging-guided tumor border delineation and photothermal therapy analysis based on graphene oxide-conjugated gold nanoparticles chelated with Gd[J]. Contrast Media Mol Imaging, 2018, 2018: 9321862.
[36] Bao H, Wang N, Chen S, et al. Multimodal theranostic nanoparticles for necrosis targeting, fluorescence/SPECT imaging, and radiotherapy of residual tumors after hepatocellular carcinoma ablation[J]. Mol Pharm, 2024, 21(4): 1729-1744.
[37] Seo HJ, Kim GM, Kim JH, et al. ^{18}F-FDG PET/CT in hepatocellular carcinoma: detection of bone metastasis and prediction of prognosis [J]. Nucl Med Commun, 2015, 36(3): 226-233.
[38] Kesler M, Levine C, Hershkovitz D, et al. ^{68}Ga-PSMA is a novel PET-CT tracer for imaging of hepatocellular carcinoma: a prospective pilot study[J]. J Nucl Med, 2019, 60(2): 185-191.
[39] Frankl J, Rajamohan N, Yang J, et al. PET/MRI evaluation of hepatobiliary tumors[J]. Q J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 68(4): 259-269.
[40] 王之琐，宋羽霄，章必成. 肿瘤微环境内巨噬细胞和T细胞的多胺代谢重编程[J]. 重庆医科大学学报，2025，50(6)：721-725.
Wang ZX, Song YX, Zhang BC. Metabolic reprogramming of polyamines in macrophages and T cells within the tumor microenvironment[J]. J Chongqing Med Univ, 2025, 50(6): 721-725.
[41] Wang WH, Chiang IT, Liu YC, et al. Simultaneous imaging of temporal changes of NF-κB activity and viable tumor cells in Huh7/NF-κB-tk-luc2/rfp tumor-bearing mice[J]. In Vivo, 2013, 27(3): 339-350.
[42] Guo Y, Wang J, Zhang L, et al. Theranostical nanosystem-mediated identification of an oncogene and highly effective therapy in hepatocellular carcinoma[J]. Hepatology, 2016, 63(4): 1240-1255.
[43] Chan KT, Alessio AM, Johnson GE, et al. Prospective trial using internal pair-production positron emission tomography to establish the yttrium-90 radioembolization dose required for response of hepatocellular carcinoma[J]. Int J Radiat Oncol, 2018, 101(2): 358-365.
[44] Yang XP, Yang C, Zhang S, et al. Precision treatment in advanced hepatocellular carcinoma[J]. Cancer Cell, 2024, 42(2): 180-197.

（收稿：2025-03-12；修回：2025-04-19；录用：2025-06-13）
（责任编辑：周一青）
本文引用格式：
赵永乐，杨智程，谭茂婷，等. 多模态分子成像在原发性肝癌诊疗中的应用进展[J]. 重庆医科大学学报，2025，50(10)：1375-1378.