doi 10.12122/j.issn.1674-4500.2026.05.18 分子影像学杂志, 2026, 49(5): 684-689

钆塞酸二钠在肝脏病变MR检查应用中的研究进展

孟欣欣[1],苏业明[1],于 楠[1],马光明[1,2],杨创勃[1,2]
[1]陕西中医药大学医学技术学院,陕西 咸阳 712046;[2]陕西中医药大学附属医院医学影像科,陕西 咸阳 712000

摘要:钆塞酸二钠(Gd-EOB-DTPA)作为肝细胞特异性磁共振对比剂,凭借双相成像模式(动态期+肝胆特异期)及肝肾双通道排泄优势,其应用已从肝脏局灶性病变的检测与定性,拓展至肝脏体积测量、肝功能定量评估、肝细胞癌(HCC)生物学行为预测等精准诊疗领域,构建起肝脏"结构-功能"一体化评估体系。本文系统梳理Gd-EOB-DTPA增强MRI的基础特性(药理药代动力学、成像机制与安全优势)、临床应用现状(局灶性病变诊断、肝功能评估、HCC预后预测)及核心挑战(图像伪影、特殊人群应用受限、安全性争议),分类总结相关文献核心证据,分析当前研究在内容、方法及临床转化层面的不足,进一步论述该领域后续研究的必要性、可行性与重要性,为肝脏疾病临床实践及科研方向提供学术参考。
关键词:钆塞酸二钠;磁共振成像;肝脏疾病;精准诊疗;临床应用

Research progress of gadoxetic acid disodium in MR examination of liver lesions

MENG Xinxin[1], SU Yeming[1], YU Nan[1], MA Guangming[1,2], YANG Chuangbo[1,2]
[1]Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China; [2]Department of Medical Imaging, Affiliated Hospital of Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712000, China

Abstract: Gadoxetic acid disodium (Gd-EOB-DTPA), a hepatocyte-specific magnetic resonance imaging contrast agent, has achieved comprehensive coverage of precise diagnosis and treatment scenarios—from the detection and characterization of focal liver lesions to liver volume measurement, quantitative assessment of liver function, and prediction of the biological behavior of hepatocellular carcinoma (HCC), relying on its core advantages of dual-phase imaging mode (dynamic phase + hepatobiliary phase) and dual-channel hepatorenal excretion, thus establishing an integrated evaluation system for liver "structure-function". This article systematically reviews the basic characteristics (pharmacological and pharmacokinetic properties, imaging mechanism, and safety advantages), current clinical application status (diagnosis of focal lesions, liver function assessment, prediction of HCC prognosis), and core challenges (image artifacts, limited application in special populations, safety controversies) of Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI. It categorizes and summarizes the core evidence of relevant literature, analyzes the shortcomings of current research in terms of content, methodology, and clinical transformation, and further discusses the necessity, feasibility, and importance of subsequent research in this field, aiming to provide standardized academic reference for the clinical practice and scientific research direction of liver diseases.
Keywords: gadoxetate disodium; magnetic resonance imaging; liver diseases; precision diagnosis and treatment; clinical application

Gd-EOB-DTPA作为一种肝细胞特异性磁共振对比剂,其应用已从早期肝脏局灶性病变的检测与定性,拓展至肝脏体积测量、肝功能评估、肝癌生物学行为预测等更精准的诊疗层面。其独特的价值在于双相成像模式:动态期可评估病灶的血流动力学特征,而肝胆特异期(HBP)能通过肝细胞特异性摄取机制,使正常肝组织显著强化,缺乏此功能的恶性肿瘤则表现为低信号,从而形成鲜明对比,不仅有助于病灶的检测与定性[如鉴别肝细胞癌(HCC)、转移瘤及良性病变],还能无创地评估肝功能储备状况[1],同时为胆道系统的显影提供支持,实现了对肝脏结构和功能的一站式综合评估本综述系统探讨Gd-EOB-DTPA增强MRI在成人肝脏中的应用。基于其肝细胞特异性摄取和双通道排泄的独特优势,综述在局灶性病变(如HCC、转移瘤、胆管癌)诊断、肝功能定量评估及HCC恶性预测中的临床价值,并剖析动脉期伪影和严重肝功能不全应用限制等挑战。最后,论证优化临床策略的必要性,并展望标准化方案、特殊人群应用及多模态融合等未来方向,聚焦临床转化效能与现存局限性。

收稿日期:2025-11-20
基金项目:秦创原中医药产业创新聚集区项目(L2024-QCY-ZYYJJQ-11);陕西中医药大学学科创新团队建设项目(2019-QN09)
作者简介:孟欣欣,在读硕士研究生,E-mail: 763286762@qq.com
通信作者:杨创勃,副教授,硕士生导师,E-mail: 937874041@qq.com

1 钆塞酸二钠的基础特性与成像原理

1.1 药理与药代动力学特征

Gd-EOB-DTPA的显像机制具有双相特征[2,3]。在血管期,其分布特征与常规细胞外液非特异性钆对比剂相似,迅速进入血管腔及组织间隙。初始分布与清除主要受分子量、亲水性等理化参数影响,且主要通过肾小球滤过完成初步清除。进入肝胆期后,其分子结构中的亲脂性基团乙氧基苄基(EOB)使其成为肝细胞膜上有机阴离子转运多肽(OATP1B1/B3)的高选择性底物,经

OATP介导的主动转运被高效摄取至肝细胞内[4]。且钆离子(Gd^{3+})始终与螯合剂DTPA保持高度稳定结合,大幅降低了游离Gd^{3+}释放及组织沉积风险。

在药代动力学方面,Gd-EOB-DTPA在体内不被代谢,以药物原形通过双通道完全清除:肝胆排泄途径依赖胆管膜上的多药耐药相关蛋白2(MRP2),将肝细胞内的Gd-EOB-DTPA分泌至胆汁;肾脏排泄途径则得益于其分子量小、血浆蛋白结合率低(<10%)的特性,可自由通过肾小球滤过膜。这种双通道代偿机制为肝肾功能中度受损患者的安全使用提供了重要基础[3, 5, 6]。

1.2 成像机制与安全优势

1.2.1 *成像机制* 作为顺磁性MRI对比剂,Gd-EOB-DTPA成像核心在于其对T1弛豫时间的缩短效应:在T1加权成像(T1WI)序列中,Gd^{3+}的顺磁性可加速原子核自旋-晶格弛豫过程,使组织信号增强;肝胆特异期内,正常有功能的肝细胞摄取对比剂后信号显著增高,而缺乏OATP1B1/B3或功能异常的病灶(如HCC、转移瘤)因无法摄取对比剂而表现为相对低信号[3]。这种基于细胞功能代谢的成像原理,使得正常肝实质与病灶之间形成鲜明对比。

1.2.2 *安全优势的分子基础* Gd-EOB-DTPA的安全性源于两大核心特性:一是大环螯合结构(相较于传统线性螯合结构)大幅提升Gd^{3+}结合稳定性,减少游离离子释放;二是肝肾双通道排泄降低单一器官排泄负担,尤其在肾功能受损时,肝胆途径可代偿清除,降低肾源性系统性纤维化(NSF)风险[4]。此外,低剂量(0.025 mmol/kg)设计进一步减少了Gd元素在体内的累积,使脑部沉积风险控制在临床可接受范围[7]。

2 钆塞酸二钠的临床应用现状与效能评估

2.1 在局灶性肝脏病变诊断中的价值

2.1.1 HCC Gd-EOB-DTPA对于诊断HCC的核心价值体现在“微小病灶高检出率”与“LI-RADS分类优化”:针对直径≤2 cm的HCC,Gd-EOB-DTPA增强MRI的诊断敏感度达92%以上,特异度达89%~95%[8];基于肝胆特异期低信号特征简化的肝脏影像报告和数据系统(LI-RADS)分类方案,在检测≤3 cm的HCC时,敏感度高于2018版LI-RADS标准,且LR-5分类的特异度与准确度维持稳定[9, 10];联合DWI序列,直径≤1 cm的亚厘米HCC检出率可从61.5%提升至72.7%[11, 12],为HCC早期干预争取时间窗口。

2.1.2 *肝转移瘤* 该技术在病灶检出与定性中表现突出。研究显示,Gd-EOB-DTPA识别肝转移瘤的准确率超90%(敏感度92%,特异度94%),尤其对直径≤1 cm的微小转移灶,检出率达75%[13];在定性方面,通过HBP病灶边缘特征可鉴别不典型病变:边缘非缺损区多提示肝脓肿,边缘缺损区则更支持转移瘤诊断[14];同时,在结直肠癌、黑色素瘤等恶性肿瘤的肝转移评估中,其诊断效能优于传统增强MRI[13]。

2.1.3 *肝内胆管癌(ICC)* ICC的典型影像学特征为“动脉期周边环状强化+延迟期渐进性充填+肝胆特异期低信号”:动脉期强化源于肿瘤边缘活性区域的血流灌注,延迟期渐进性充填则与肿瘤间质内对比剂滞留相关[15],肝胆特异期低信号则因ICC细胞不表达或低表达OATP1B1/B3[16];针对无胆管扩张的肿块型ICC,肝胆特异期“EOB云”征(中央云絮状稍高信号伴边缘低信号)可作为鉴别不典型HCC的关键依据,诊断敏感度为78.12%,特异度为92.31%[17];此外,该技术对≤1 cm的微小ICC检出率较常规MRI提高约30%[16],适用于肝硬化背景下的早期筛查。

2.1.4 *局灶性结节增生(FNH)* FNH的病理特征(结节状增生的肝细胞、中央星状瘢痕)决定其影像学表现:动脉期因富血供呈快速均匀强化,延迟期中央瘢痕延迟强化;肝胆特异期80%~90%的FNH呈等/高信号(因肝细胞基本正常且表达功能性的OATP1B1/B3能正常摄取Gd-EOB-DTPA),中央瘢痕因无肝细胞呈边界清晰的低信号[18]。“等/高信号背景+低信号瘢痕”的典型特征使Gd-EOB-DTPA对FNH的诊断特异度极高[19],多数情况下无需穿刺活检即可确诊[18]。

2.1.5 *肝腺瘤(HCA)* Gd-EOB-DTPA为HCA亚型的分型与鉴别诊断提供关键依据:β-连环蛋白激活型HCA(β-HCA)因Wnt/β-catenin通路异常激活,肝细胞功能活跃,肝胆特异期呈等/高信号[20];炎症型(I-HCA)及未分类亚型多表现为信号不均或低摄取,需结合T2WI高信号及出血特征综合判断;与HCC鉴别时,HCC在肝胆特异期90%以上呈低信号,而HCA仅10%~15%表现为低信号,需结合DWI弥散受限特征来进一步鉴别二者[21];此外,其对<1 cm的微小HCA检出敏感度达85%~90%[22],可无创评估来指导治疗方案选择(如β-HCA需手术切除,非β-HCA可随访观察)。

2.2 在肝脏功能定量评估中的应用

肝脏功能定量评估侧重于全面衡量肝脏的合成、代谢、解毒及排泄等核心生理功能,而传统肝功能检查(如转氨酶、胆红素)仅能反映肝脏当下状态,Child-Pugh评分和吲哚菁绿清除试验(ICG)又存在主观性强,仅反映全肝整体功能的局限[23]。相比之下,Gd-EOB-DTPA增强MRI可直观显示不同肝段功能差异,1次检查即可同步获得肝脏解剖形态、病灶特征和储备功能等信息,在肝脏储备功能检查中极具优势[24],其常用指标主要包括以下几种:

2.2.1 *半定量分析指标* 通过测量肝胆特异期肝实质的信号强度(SI)来评估肝功能。

2.2.1.1 相对强化率(RER) RER的计算公式为:(SI_{post}–SI_{pre})/SI_{pre}×100%(SI_{post}和SI_{pre}分别代表对比剂注射后和注射前信号强度[25]),该指标可反映肝细胞对对比剂的摄取能力,与肝功能状态呈正相关。

2.2.1.2 信号噪声比值(SNR) SNR是信号均值与背景标准差的比值,计算公式为:SNR=μ_{sig}/σ_{bg}(μ_{sig}是信号区域的均值,σ_{bg}是背景区域的标准差)。在肝脏成像中,较高的SNR意味着更清晰的图像质量,有助于更准确地识别肝脏病变。

2.2.1.3 对比噪声比(CNR) CNR是通过计算2个感兴趣区域(如肝脏和脾脏)的信号强度差异与噪声的比值来衡量的,公式为CNR=$|\mu_{ROI1}-\mu_{ROI2}|/\sigma_{noise}$($\mu_{ROI1}$ μ_{ROI2}为2个区域的平均信号强度,σ_{noise}是背景噪声的标准差),CNR越高,表示肝脏与周围组织的对比度越明显,有助于更清晰地显示肝脏病变。

2.2.2 定量分析指标 T1 mapping技术通过采集多组不同T1加权的图像,拟合T1弛豫曲线并计算每个体素的T1值,生成功能图以量化肝细胞功能-肝功能正常时T1值稳定,受损时T1值异常变化;同时也可评估功能性肝体积,预测肝切除术后肝衰竭(PHLF)风险[26, 27];

肝细胞分数(HeF),指注射对比剂后20 min被肝细胞摄取并滞留的Gd-EOB-DTPA占其总剂量的百分比,它直接反映有功能肝细胞数量及摄取能力。随肝功能损害加重(Child-Pugh分级升高),HeF逐步降低;但在鉴别早期肝功能损害时,摄取系数(K_{hep})诊断效能优于HeF,中重度肝损害鉴别中两者均表现优异[26]。

肝细胞摄取指数(HUI)是EOB-MRI评估肝功能的一个宏观综合性定量参数[28]。通过公式HUI=$V_L\times(L_{20}/S_{20}-1)$计算,将肝脏体积与肝细胞特异性摄取功能相结合,从而直接反映全肝或未来残余肝脏的总功能储备容量。在精准预测PHLF风险方面展现出不可替代的临床价值。然而,其临床应用长期受限于设备依赖性导致的测量结果不可比性。最新研究突破在于[29],通过引入以白蛋白-胆红素评分等临床常规指标为“桥梁”的标准化技术,成功实现了不同MRI设备间HUI值的校准,为其从科研工具转化为可推广的临床生物标志物、推动肝病精准诊疗及多中心研究扫清了关键障碍。

尽管上述定量与半定量指标在评估肝功能方面展现出巨大潜力,但不同研究间结果的高度异质性严重限制了其在临床中的直接比较和广泛应用。这种异质性主要源于方法学的差异:首先,ROI的选取位置、大小和形状缺乏统一标准,如在肝实质、病灶或大血管周围测量会对RER、SNR、CNR值产生显著影响。其次,扫描参数(如场强、序列类型、翻转角)和图像后处理算法(如T1 mapping的拟合模型)的不同,会直接影响T1值、HeF和K_{hep}等定量参数的绝对值。再者,HBP图像采集的时间点(通常为注射后10~20 min)在不同中心和研究中并不完全统一,而肝功能状态本身会影响对比剂摄取和排泄动力学,导致同一时间点测量的HeF或RER在不同患者间可比性下降。未来研究的重点之一,应是建立标准化的图像采集方案、ROI勾画指南和后处理流程,并通过多中心研究验证跨平台校准方法的有效性,才能真正实现这些功能定量参数的临床转化。

2.2.3 功能性肝体积评估 功能性未来残肝体积(fFLR),是通过测量肝脏感兴趣区信号强度(常以腰大肌或脾脏信号标准化),得出的区域性肝功能量化值[30, 31],是精准预测解剖性HCC切除PHLF风险、制定手术方案的核心依据[32]。该指标的巨大临床价值已得到前瞻性研究的有力证实。研究表明,基于钆塞酸二钠增强MRI T1弛豫时间定量的体积辅助模型(即fFLR的一种高级实现方式)预测术后肝功能障碍的准确性(准确性=0.79)优于传统ICG试验,并能预测患者长期生存率,为其作为精准外科决策工具提供了关键证据[33]。

2.3 HCC生物学行为及预后预测

Gd-EOB-DTPA增强MRI通过其功能成像优势,已成为术前无创评估HCC侵袭性及预测预后的关键工具。其应用核心在于将特定影像学特征(如肝胆期低信号、瘤周低信号带、动脉期环形强化)与定量功能参数及临床指标相结合,构建预测模型[34]。研究表明,这些特征与微血管侵犯(MVI)、增殖型HCC等高危亚型显著相关,从而能够有效预测术后复发风险增高和生存期缩短[35]。

该领域的进展已从定性关联迈向精准的定量预测。有研究针对MVI阴性HCC的预后难题,创新性地引入RER这一定量参数,并融合定性特征构建了综合预测模型,成功实现了对患者的风险分层[36]。这标志着Gd-EOB-DTPA增强MRI的应用实现了从“形态分析”到“功能预后预测”的跨越[37],能为制定个体化治疗策略(如高危患者术后辅助治疗)提供直接依据[38],最终推动HCC的精准医疗管理。

3 临床应用中的挑战与安全性考量

3.1 图像质量相关的挑战

动脉期伪影是影响Gd-EOB-DTPA增强MRI诊断效能的主要问题,主要分为短暂性剧烈运动(TSM)和截断伪影两类[39]。其中TSM表现为注射对比剂后患者出现急性短暂呼吸困难或无法屏气,导致图像运动伪影,发生率为10%~20%,与对比剂注射后血浆峰值浓度的急性升高直接有关[40];截断伪影则可能与造影剂快速脱离成像区域有关,需结合扫描参数优化进一步规避。

为应对这些挑战,近年来已形成多种技术优化策略:对比剂1∶1盐水稀释+1 mL/s低速注射降低血浆峰

值浓度(针对性解决TSM);采用多动脉期采集结合压缩感知技术(压缩感知技术提供的无TSM的最佳晚期动脉期采集率为82.1%,优于视图共享技术的71.4%);同时优化患者屏气时间[41],减少呼吸运动对图像质量的干扰。

3.2 安全性与不良反应

常见不良反应:发生率≥0.5%的反应包括恶心、头痛、热感、血压升高及头晕,多为轻度至中度,可自行缓解[42];

严重不良反应:罕见但需警惕,包括过敏反应(从皮疹、瘙痒至过敏性休克)及NSF[42];急性/慢性严重肾功能损伤[eGFR<30 mL·min^{-1}·(1.73 m^2)$^{-1}$]、肝肾综合征导致的急性肾功能不全及肝移植围手术期患者,除非诊断信息必需且非增强MRI无法提供;

钆沉积风险:多次使用后,微量钆元素可能沉积于脑部(如齿状核、苍白球),其临床意义尚不清楚,建议严格按适应症使用,采用最低有效剂量[42]。目前关于钆沉积的长期临床影响仍未明确,现有研究主要基于影像学观察到信号变化,其随访时间普遍有限,缺乏大规模、长期的纵向队列研究来评估沉积量与神经认知功能结局(如记忆力、执行力下降)或特定神经系统疾病发病率之间的明确因果关系。此外,对于不同肝肾功能状态、不同剂量累积患者的沉积动力学和清除路径也知之甚少。未来研究亟需解决的关键问题包括:明确不同钆剂(尤其是大环类如Gd-EOB-DTPA)的长期沉积模式;建立沉积量与临床相关神经功能结局指标(如神经心理学量表、脑电图、生物标志物)的关联性;以及探索有效的促排或干预策略。

特殊人群限制:严重心血管疾病(如先天性QT间期延长综合征)患者慎用;妊娠期妇女需严格权衡利弊,哺乳期妇女通常注射后建议暂停哺乳12~24 h;18岁以下儿童不推荐使用[43, 44]。

4 未来研究方向与展望

4.1 技术创新与序列优化

当前,基于压缩感知和多动脉期采集等技术已在提升Gd-EOB-DTPA增强MRI图像质量方面取得显著进展[45],但仍面临诸多挑战,亟需在未来研究中寻求突破:首先,需为终末期肝硬化等肝功能严重受损患者制定个体化扫描策略,针对性改善其肝胆期强化效果不佳的现状[46];其次,针对不同设备间定量参数差异导致的临床可比性不足问题,应构建跨平台的标准化体系,实现精准肝功能评估[47];此外,现有的伪影校正方法多在扫描完成后进行,未来需开发扫描过程中实时监控并自动调整参数的技术,从成像源头主动抑制TSM;最后,为推动技术向基层医疗机构普及,需针对低场强MRI设备优化序列参数,提升图像质量以满足临床需求。这些技术的突破,将共同推进Gd-EOB-DTPA增强MRI实现从形态学分析到精准量化功能的跨越。

4.2 拓展应用边界

基于Gd-EOB-DTPA增强MRI独特的“结构-功能”一体化成像优势,其临床应用前景正从当前的诊断评估向肝病全程管理拓展:在慢性肝病领域,该技术有望通过量化分析实现肝纤维化的早期无创筛查,以替代部分有创肝穿刺[48,49];对于肝移植术后患者,定期影像学检查可建立动态监测体系,实现对移植肝排斥反应等并发症的早期识别[50];此外,可以通过分析肝癌局部治疗后病灶的强化特征变化,构建疗效评估的量化指标体系,为临床治疗决策提供重要参考。这些发展将推动Gd-EOB-DTPA增强MRI成为肝病精准诊疗全程管理的重要工具。

4.3 推动多中心研究与临床转化

当前关于Gd-EOB-DTPA增强MRI的研究大多局限于单一医疗机构,且缺乏统一的测量标准[51],未来需要推动该项技术走向临床广泛应用[52]。具体而言,应在不同地区的多家医院合作开展大规模临床研究,明确其在检测小肝癌等疾病中的准确性和适用标准;同时需要深入探索影像表现背后的生物学机制;在此基础上,还应制定清晰的操作指南和诊断标准,让医生有章可循;最后,要开发适合基层医院的简易操作流程和智能诊断工具,并通过培训确保规范使用,让这项先进技术能够惠及更多患者[53]。

5 结论

Gd-EOB-DTPA作为肝细胞特异性MRI对比剂,凭借“动态期-肝胆特异期” 双相成像模式与肝肾双通道排泄的核心优势,已构建起肝脏“结构-功能”一体化评估体系,成为肝脏疾病精准诊疗领域的关键技术。在基础特性层面,其分子结构中的乙氧基苄基(EOB)可与肝细胞OATP1B1/B3特异性结合,实现靶向摄取,且大环螯合结构与低剂量设计大幅降低游离钆沉积及NSF风险,为肝肾功能中度受损等特殊人群的安全应用提供了分子基础。

在临床应用中,Gd-EOB-DTPA增强MRI的价值已全面覆盖肝脏疾病诊疗关键环节:在局灶性病变诊断中,对直径≤2 cm的HCC的诊断敏感度超92%,联合DWI序列可将≤1 cm微小HCC检出率提升至72.7%,同时通过“EOB云”征、肝胆期信号差异等特征,精准鉴别ICC、FNH、HCA等病变,多数场景下可替代有创穿刺活检;在肝功能评估领域,RER、T1 mapping及HeF等参数实现肝功能从“定性分级”到“定量分期”的跨越,fFLR更能精准预测PHLF风险;在HCC预后管理中,基于肝

胆期肿瘤信号、瘤周低信号的影像模型，可无创预测微血管侵犯（MVI）等高危因素，为个体化治疗决策提供依据。

然而，当前应用仍面临不可忽视的挑战：动脉期TSM伪影（发生率10%~20%）影响图像质量，终末期肝硬化（Child-Pugh C级）患者肝细胞摄取延迟导致强化不足，定量参数（如HeF、K_{Hep}）因设备差异缺乏统一标准，且儿童、终末期肾病等特殊人群的临床数据仍显匮乏。此外，与OATP抑制剂的相互作用、脑部钆沉积的长期影响等安全性细节，尚需更多前瞻性研究验证。

为推动该技术从研究向临床广泛转化，未来应优先聚焦于最具落地潜力的方向。近期核心任务是建立定量参数的标准化方案与多设备一致性校准体系，这是解决当前方法学异质性、实现结果可比性与临床推广的前提。在此基础上，同步发展AI实时伪影校正等技术以提升成像质量，并拓展其在肝病全周期管理中的应用场景。最终，通过多中心研究验证与标准化操作指南的制定，完成从“科研创新”到“临床广泛应用”的关键跨越。

综上，Gd-EOB-DTPA增强MRI已重塑肝脏疾病诊疗模式，其在提升病灶检出精度、减少有创操作、指导个体化治疗等方面的价值已获临床验证。随着技术瓶颈的逐步突破与应用边界的持续拓展，该技术将进一步巩固其在肝脏精准诊疗中的核心地位，为改善肝脏疾病患者预后、推动影像医学向“功能分子影像”升级提供关键支撑。

参考文献：

[1] 李佳奇, 石小枫. 终末期肝病患者肝储备功能评估方法的进展[J/OL]. 临床医学进展, 2025, 15: 39. doi:10.12677/acm.2025.1561696.

[2] 丁 聪, 柏根基. 钆塞酸二钠增强磁共振成像评估肝脏储备功能的研究进展[J]. 磁共振成像, 2021, 12(8): 104-7.

[3] 苏业明, 于 楠, 马光明, 等. 钆塞酸二钠增强MRI在肝细胞癌诊断及鉴别诊断中的临床应用[J/OL]. CT理论与应用研究, 2025. https://doi.org/10.15953/j.ctta.2025.165. DOI:10.15953/j.ctta.2025.165.

[4] Perez-Girbes A, Lee JM, Martí-Bonmatí L. Hepatobiliary contrast agents for liver magnetic resonance imaging[J]. Radiol Engl Ed, 2024, 66: S75-88.

[5] 蒋家云, 李雪松, 马宽生. 钆塞酸二钠在肝胆手术术前评估中的应用[J]. 临床肝胆病杂志, 2015, 31(6): 996-9.

[6] Bradu A, Penescu M, Pitrou C, et al. Pharmacokinetics, dialysability, and safety of gadopiclenol, a new gadolinium-based contrast agent, in patients with impaired renal function[J]. Invest Radiol, 2021, 56 (8): 486-93.

[7] Runge VM. Critical questions regarding gadolinium deposition in the brain and body after injections of the gadolinium-based contrast agents, safety, and clinical recommendations in consideration of the EMA's pharmacovigilance and risk assessment committee recommendation for suspension of the marketing authorizations for 4 linear agents[J]. Invest Radiol, 2017, 52(6): 317-23.

[8] Li XQ, Wang X, Zhao DW, et al. Application of Gd-EOB-DTPA-enhanced magnetic resonance imaging (MRI) in hepatocellular carcinoma[J]. World J Surg Oncol, 2020, 18(1): 219.

[9] Hawley J, Tang YQ, Sjöström A, et al. The clinical utility of liver-specific ultrasound contrast agents during hepatocellular carcinoma imaging[J]. Ultrasound Med Biol, 2025, 51(3): 415-27.

[10] Huang WQ, Lin RX, Du ZS, et al. Performance of contrast-enhanced ultrasound liver imaging reporting and data system for differentiation of patients at risk of hepatocellular carcinoma and liver metastasis[J]. Ann Med, 2025, 57(1): 2442072.

[11] Hwang SH, Hong SB, Park S, et al. Subcentimeter hepatocellular carcinoma in treatment-naïve patients: noninvasive diagnostic criteria and tumor staging on gadoxetic acid-enhanced MRI[J]. Eur Radiol, 2021, 31(4): 2321-31.

[12] Chen XY, Dai HR, Liu J, et al. Enhanced diagnostic performance for subcentimeter hepatocellular carcinoma using a novel criterion integrating serum AFP levels and gadolinium-based contrast-enhanced MRI features[J]. BMC Med Imag, 2025, 25(1): 404.

[13] 雷军强, 马文婷, 王寅中, 等. 特异性肝胆对比剂钆塞酸二钠对肝转移瘤的诊断价值的Meta分析[J]. 中国循证医学杂志, 2015, 15(12): 1378-86.

[14] 何 旭, 韩鼎盛, 黎雅琳, 等. 钆塞酸二钠增强MRI对不典型肝脓肿与单发肝转移瘤的鉴别诊断[J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31(11): 1157-63.

[15] Choi SY, Kim YK, Min JH, et al. Added value of ancillary imaging features for differentiating scirrhous hepatocellular carcinoma from intrahepatic cholangiocarcinoma on gadoxetic acid-enhanced MR imaging[J]. Eur Radiol, 2018, 28(6): 2549-60.

[16] 顾 军, 张丹凤, 王同兴. 钆塞酸二钠MR增强成像与CT增强成像诊断肝脏局灶性病变的对照研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21 (12): 92-4.

[17] 邢 飞, 张学琴, 缪小芬, 等. 钆塞酸二钠增强MRI对无胆管扩张的肿块型肝内胆管癌与不典型肝细胞癌的鉴别诊断价值[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(11): 2139-43.

[18] 张进跃, 王 岩. 钆塞酸二钠对肝脏局灶性结节增生的诊断价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2018, 16(2): 4-6.

[19] Zhuang XH, Su DY, Li ME, et al. The value of Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI in the differential diagnosis of HCC with hyperintensity on HBP and FNH[J]. Medicine, 2025, 104(26): e43106.

[20] Moradi Z, Khalaj F, Soltani S, et al. Exploring radiological characteristics in beta-catenin-mutated hepatocellular adenoma: a systematic review and meta-analysis[J]. Abdom Radiol, 2026, 51 (3): 1427-43.

[21] 曹 亮, 李 瑞, 张 倩, 等. 钆塞酸二钠在肝细胞肝癌诊断及评估中的应用进展[J]. 磁共振成像, 2020, 11(10): 943-6.

[22] Ma BY, Xu H, Wu XR, et al. Evaluation of liver function using Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI with T1 mapping[J]. BMC Med Imaging, 2023, 23(1): 73.

[23] 张益铭, 郭顺林. 影像学评估肝脏储备功能的研究进展[J]. 磁共振成像, 2025, 16(10): 184-90, 207.

[24] Ai X, Wang HK, Yang Y, et al. Four indices on Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI can estimate liver functional reserve compared to ICG-R15: a systematic review and meta-analysis[J]. Clin Imaging, 2023, 102: 1-8.

[25] Kanki A, Tamada T, Higaki A, et al. Hepatic parenchymal

enhancement at Gd-EOB-DTPA-enhanced MR imaging: correlation with morphological grading of severity in cirrhosis and chronic hepatitis[J]. Magn Reson Imaging, 2012, 30(3): 356-60.

[26] 毕新军, 张学琴, 陆 健, 等. 钆塞酸二钠增强MRI肝细胞摄取定量参数评估肝功能[J]. 放射学实践, 2021, 36(4): 514-9.

[27] Li J, Li Y, Chen YY, et al. Predicting post-hepatectomy liver failure with T1 mapping-based whole-liver histogram analysis on gadoxetic acid-enhanced MRI: comparison with the indocyanine green clearance test and albumin-bilirubin scoring system[J]. Eur Radiol, 2025, 35(6): 3587-98.

[28] Haimerl M, Verloh N, Zeman F, et al. Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI for evaluation of liver function: Comparison between signal-intensity-based indices and T1 relaxometry[J]. Sci Rep, 2017, 7: 43347.

[29] Yoshizawa E, Yamada A, Okajima Y, et al. Harmonization of quantitative liver function evaluation using gadoxetate disodium-enhanced magnetic resonance imaging[J]. Eur Radiol, 2025, 35 (11): 7372-81.

[30] Xiao M, Song JP, Lyu ZL, et al. Regional liver function assessment using 99mTc-GSA SPECT/CT scintigraphy in malignant perihilar biliary tumor undergoing major liver resection: a dual-center cohort study[J]. Ann Surg Oncol, 2025, 32(9): 6230-42.

[31] Urraro F, Pacella G, Giordano N, et al. Radiomics beyond radiology: literature review on prediction of future liver remnant volume and function before hepatic surgery[J]. J Clin Med, 2025, 14(15): 5326.

[32] Jeong B, Heo S, Lee SS, et al. Predicting post-hepatectomy liver failure in patients with hepatocellular carcinoma: nomograms based on deep learning analysis of gadoxetic acid-enhanced MRI[J]. Eur Radiol, 2025, 35(5): 2769-82.

[33] Verloh N, Rio Bartulos C, Utpatel K, et al. Volume-assisted estimation of remnant liver function based on Gd-EOB-DTPA enhanced MR relaxometry: a prospective observational trial[J]. Diagnostics, 2023, 13(18): 3014.

[34] 赵亚龙, 温生宝. Gd-EOB-DTPA增强核磁与CDT1蛋白在肝细胞癌诊疗中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2023(10): 16332-8.

[35] Zhang K, Xie SS, Li WC, et al. Prediction of microvascular invasion in HCC by a scoring model combining Gd-EOB-DTPA MRI and biochemical indicators[J]. Eur Radiol, 2022, 32(6): 4186-97.

[36] Wang LY, Liang M, Feng B, et al. Microvascular invasion-negative hepatocellular carcinoma: Prognostic value of qualitative and quantitative Gd-EOB-DTPA MRI analysis[J]. Eur J Radiol, 2023, 168: 111146.

[37] Ye ZW, Zhao J, Hu DD, et al. Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI proves advantageous in selecting surgical candidates for patients with early-stage hepatocellular carcinoma: an analysis in terms of oncological outcomes[J]. ILIVER, 2024, 3(4): 100117.

[38] 吴凯莹, 郁义星, 朱 珠, 等. 钆塞酸二钠增强MRI影像组学及肝胆期信号强度预测肝细胞癌病理分化程度的价值[J]. 实用放射学杂志, 2025, 41(7): 1158-62.

[39] 刘永倩, 章 维, 周玉祥, 等. Gd-EOB-DTPA动脉期伪影优化方案及研究进展[J]. 放射学实践, 2019, 34(11): 1270-3.

[40] Ringe KI, von Falck C, Raatschen HJ, et al. Evaluation of transient respiratory motion artifact at gadoxetate disodium-enhanced MRI-Influence of different contrast agent application protocols[J]. PLoS One, 2018, 13(7): e0200887.

[41] Kim JH, Yoon JH, Bae JS, et al. Multiarterial phase acquisition in gadoxetic acid – enhanced liver MRI for the detection of hypervascular hepatocellular carcinoma in high-risk patients: comparison of compressed sensing versus view sharing techniques [J]. Invest Radiol, 2023, 58(2): 139-47.

[42] Starekova J, Pirasteh A, Reeder SB. Update on gadolinium-based contrast agent safety, from the *AJR* special series on contrast media [J]. Am J Roentgenol, 2024, 223(3): e2330036.

[43] 中国医药教育协会临床合理用药专业委员会, 广东省药学会用药评价与临床科研专家委员会. 钆对比剂全程化药学服务共识[J]. 中国药房, 2023, 34(17): 2049-56.

[44] Yu OJ, Kim PH, Yoon HM, et al. Safety of gadolinium-based contrast agents in children: a systematic review and meta-analysis [J]. Radiology, 2025, 316(1): e241224.

[45] Li SP, Liu C, Yuan SY, et al. Application of AI-assisted compressed sensing in high resolution Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI during hepatobiliary phase at 5.0 T[J]. Quant Imaging Med Surg, 2025, 15 (8): 6852-67.

[46] 叶彦宏, 陆力坚. 钆塞酸二钠增强MRI扫描评估肝肿瘤术后残留肝组织储备功能的研究现状[J]. 临床肝胆病杂志, 2024, 40(2): 380-5.

[47] Rassam F, Zhang T, Cieslak KP, et al. Comparison between dynamic gadoxetate-enhanced MRI and ^{99m}Tc-mebrofenin hepatobiliary scintigraphy with SPECT for quantitative assessment of liver function[J]. Eur Radiol, 2019, 29(9): 5063-72.

[48] 任毓凡, 胡根文, 钟淑媛, 等. 基于钆塞酸二钠增强肝胆期MRI构建影像组学模型评估肝纤维化临床病理分期[J]. 中国介入影像与治疗学, 2024, 21(2): 94-9.

[49] Chen SF, Zhuang DP, Jia QY, et al. Advances in noninvasive molecular imaging probes for liver fibrosis diagnosis[J]. Biomater Res, 2024, 28: 0042.

[50] Redic KA, Skyles A, Zaccardelli J. Potential role of a pharmacist to enhance medication-related aspects of clinical trials conducted in a dedicated clinical research unit[J]. Contemp Clin Trials Commun, 2017, 6: 55-7.

[51] He X, Li YL, Han DS, et al. Gadoxetic acid disodium (Gd-EOB-DTPA) contrast-enhanced abbreviated magnetic resonance imaging (MRI) for hepatocellular carcinoma surveillance in at-risk patients: a multi-center study in China[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14 (12): 8520-37.

[52] Liu B, Yang JH, Wu YF, et al. Application of dynamic enhanced scanning with GD-EOB-DTPA MRI based on deep learning algorithm for lesion diagnosis in liver cancer patients[J]. Front Oncol, 2025, 14: 1423549.

[53] Zhang N, Wu MH, Zhou YR, et al. Radiomics nomogram for prediction of glypican-3 positive hepatocellular carcinoma based on hepatobiliary phase imaging[J]. Front Oncol, 2023, 13: 1209814.

（编辑:郎 朗）