专栏—— 5.0 T 超高场磁共振成像

栏目主编：袁慧书



袁慧书，主任医师、教授、博士生导师，北京大学第三医院放射科主任。担任中华医学会放射学分会常务委员、中华医学会放射学分会骨关节学组组长、北京医学会放射学分会副主任委员等学术任职。长期从事影像医学一线临床、科研、教学与管理工作，专注于骨关节系统疾病的影像诊断、新技术应用及人工智能等相关研究。承担科技部国家重点研发计划、国家自然科学基金、北京自然科学基金等多项科研课题。

栏目简介：

超高场磁共振技术正引领临床影像向高空间分辨、高组织对比及多参数功能化方向发展。5T 磁共振在肌骨系统、心肺及腹部等非神经器官领域的研究不断突破，融合物理序列创新、定量弛豫技术、AI 重建算法与多模态诊断策略，为临床影像提供前所未有的精细化与可量化能力。本栏目旨在呈现 5T 平台在非神经领域的前沿进展、工程优化与关键临床价值。

超高场 5.0 T MRI 技术在非神经系统中的应用进展与挑战

刘苏卫　袁慧书*

（北京大学第三医院影像科，北京 100191）

【摘要】 5.0 T 磁共振成像（magnetic resonance imaging，MRI）在心血管、腹部及肌骨系统等非神经系统领域展现出日益突出的应用价值。准确认识其优势和局限，对于挖掘其临床研究及应用潜力，实现患者最大获益以及推动精准医学发展具有重大意义。本文从技术基础入手，阐述 5.0 T MRI 在心血管、腹部、肌骨系统等非神经系统中的临床研究与应用，分析其目前面临的局限与挑战，并展望其未来的发展方向，强调需结合临床实际问题，推动该技术的临床研究和应用。

【关键词】 磁共振成像；超高场；5.0 T；体层摄影术；非神经系统

【中图分类号】 R445.2；R68　**【文献标识码】** A　**【DOI】** 10.11876/mimt202506001

Advances and challenges of ultra-high-field 5.0 T MRI technology in non-neurological systems application

Liu Suwei, *Yuan Huishu**

(*Department of Radiology*, *Peking University Third Hospital*, *Beijing 100191*, *China*)

【Abstract】 Magnetic resonance imaging (MRI) at 5.0 T has shown increasingly significant application value in non-neurological systems such as cardiovascular, abdominal, and musculoskeletal fields. Accurately understanding its advantages and limitations is crucial for unlocking its clinical research and application potential, maximizing patient benefit, and advancing the development of precision medicine. This paper will explore the value of 5.0 T MRI in non-neurological systems from the perspectives of technical foundations, clinical applications, limitations and challenges, and will look ahead to its future development, emphasizing the need to address clinical real-world issues and promote its clinical research and applications.

【Key words】 Magnetic resonance imaging; Ultra-high field; 5.0 T; Tomography; Non-neurological systems

基金项目：国家重点研发计划重点专项（2023YFC2410703）

第一作者：刘苏卫，女，在读博士研究生，研究方向：骨肌系统疾病影像诊断及人工智能

通信作者：袁慧书，女，博士研究生，主任医师，研究方向：骨肌系统疾病影像诊断及人工智能

随着临床对于更高分辨率、更精准定量诊断工具的需求不断增加，《“十四五”生物经济发展规划》提出“发展高端医学影像等诊断装备，促进装备向智能化、小型化、快速化、精准化、多功能集成化发展”[1]。目前，3.0 T MRI已广泛应用于临床，但在早期诊断、微小病变识别等方面仍面临一定挑战。5.0 T MRI作为介于3.0 T与7.0 T之间的中间场强，不仅能够提供更高的图像质量，还能在避免7.0 T固有的技术挑战如B1不均匀性和比吸收率（specific absorption rate, SAR）过高等方面发挥重要作用。近年来，相关研究不断涌现，展现出5.0 T MRI较高的临床应用价值。本研究通过文献回顾，系统性总结了5.0 T MRI在心血管、腹部和肌骨3大领域的技术基础、临床应用现状、优势与挑战，并展望其未来发展趋势，旨在为5.0 T MRI的临床转化和进一步研究提供参考，特别是在我国分级诊疗制度下，探讨其如何与不同层级医院的实际需求相匹配，以深化其临床应用价值。

1 5.0 T MRI的发展及技术基础

磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）技术在过去几十年里经历了从低场强（0.5 ~ 1.5 T）到3.0 T的广泛临床应用，再到更高场强（7.0 T及以上）的探索[2-3]。3.0 T MRI已成为目前磁共振临床诊疗及研究的主流。然而，随着临床诊疗对更高空间分辨率、更强信噪比（signal-to-noise ratio, SNR）、更高定量精度及功能成像的需求不断增加，超高场MRI逐渐成为研究焦点。

超高场MRI具备更高的磁化率和T_1对比度、更大的化学位移和磁敏感性以及更高的血氧水平依赖（blood oxygenation level dependent, BOLD）效应，但同时面临B0和B1场不均匀、R_2和R_2^*效应增强、SAR值升高及线圈设计受限等问题[2-7]。因此在临床应用中，唯有充分发挥其优势并规避相关局限，方能将其临床价值最大化。

作为介于3.0 T与7.0 T之间的中间场强，5.0 T MRI兼具两者的部分优势，显示出折中特性[8-9]，其有望在缓解7.0 T MRI所面临的射频不均匀、SAR过高、安全性及成本等问题的同时，提升临床成像效率，并在特定疾病的早期发现与精准评估中发挥独特优势。5.0 T MRI的高场强使得对微小解剖结构和病理改变的呈现更加清晰，尤其适用于早期病变检测及定量分析。对于心脏、腹部及肌骨系统等高复杂度器官或系统，5.0 T在形态学成像、功能学评估及代谢分析方面均展现出独特优势。

2 5.0 T MRI的临床研究与应用现状

2.1 心血管成像

心脏MRI能够从多方位、多角度无创且精确评估心肌组织学特征，凭借其优越的软组织对比度和较大的扫描视野，在心脏结构成像、疾病诊断及心功能检测方面具有独特优势[10-12]。近年来，5.0 T全身MRI在平衡成像质量与场强的基础上，凭借更高的SNR和空间分辨率，展现出独特优势。例如，5.0 T心脏成像研究[12]显示，其能够在16 ~ 18 s获取高分辨率图像，心腔内轮廓、乳头肌及肌小梁结构均清晰可见，图像质量显著优于3.0 T MRI；在此基础上，另一项研究利用5.0 T MRI开展心肌梗死动物模型实验，结果表明5.0 T能够在可接受的扫描时间内实现心肌缺血区域与正常组织之间的清晰分辨，为急性梗死的早期评估提供了更精确的成像证据[13-14]。此外，在组织学定量方面，基于T_1/T_2 mapping及晚期钆增强（late gadolinium enhancement, LGE）的高场应用尤为突出。有研究[15]利用5.0 T T_1 mapping对非缺血性心肌病患者进行分析，发现其在纤维化与瘢痕组织的定量评估中SNR更高，纤维化区域边界更为清晰，相比3.0 T能够显著提高诊断灵敏度和可重复性，见图1。

在冠状动脉成像领域，5.0 T MRI被证实能够在不延长扫描时间的前提下，准确显示左主干、前降支及回旋支的管腔形态，其左主干显示率达到92.3%，显著高于3.0 T的67.5%（P <0.05），为冠心病的无创筛查提供了新的成像手段[17]。在血流动力学评价方面，基于5.0 T的4D Flow MRI被应用于主动脉与肺动脉血流模式的研究，能够在单次扫描中重建三维血流矢量，清晰捕捉心腔内的涡流与反流现象。研究[18]指出，该技术可用于瓣膜关闭不全患者血流动力学机制的深入分析，并为先天性心脏畸形及心力衰竭患者的血流异常提供了新的影像学证据。值得注意的是，5.0 T MRI增强的血流对比效应使得心脏边界及血管腔内壁结构更加锐利，从而有助于复杂结构异常如双主动脉弓、右心双出口等的识别与表征。

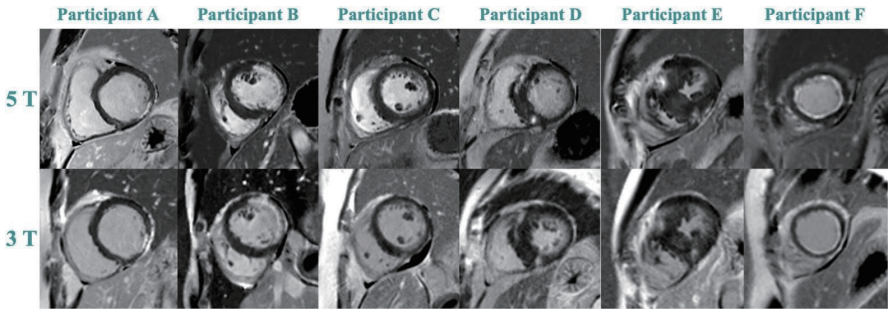


图 1 5.0 T和3.0 T 轴位MRI心肌延迟强化显示心肌纤维化[16]

注：参与者中，3名（A、B和C）患有慢性心肌梗死，2名（D和E）患有肥厚型心肌病，1名（F）患有嗜酸性粒细胞性多血管炎。在5.0 T MRI扫描下，正常心肌和心包脂肪的对比噪声比均高于参考的3.0 T MRI（P<0.001）。

2.2 腹部成像

因受到呼吸运动、血流伪影以及组织复杂性的干扰，7.0 T超高场MRI在腹部成像中存在一定局限性[19–21]。然而，5.0 T MRI通过对B1场不均匀性与SAR值的控制，有效降低了失真和伪影，同时在分辨率、SNR和采集时间之间实现了合理平衡[22–23]。

2.2.1 肝胆

在肝脏成像方面，5.0 T MRI展现出对小病灶和血管侵犯的更强敏感性。一项基于弥散加权成像（diffusion weighted imaging, DWI）的研究[22]发现，5.0 T能够在≤1 cm的肝细胞癌（hepatocellular carcinoma, HCC）病灶中获得更高的SNR和对比度，使病灶边界识别更清晰；另一项应用磁敏感加权成像（susceptibility weighted imaging, SWI）的研究[24–25]则表明，5.0 T MRI在检测合并静脉癌栓的HCC患者中具有较高的检出率，能够清晰显示门静脉及肝静脉内的细小血栓。此外，化学位移编码成像与磁共振波谱（magnetic resonance spectroscopy, MRS）在5.0 T下的应用，使肝脏脂肪含量及铁沉积的定量检测更加精确，研究者指出其与组织学定量结果高度一致，优于3.0 T MRI在脂肪分布不均及铁负荷较低个体中的表现[26–28]。在胆道系统成像中，5.0 T磁共振胰胆管成像（magnetic resonance cholangiopancreatography, MRCP）能够提供更高分辨率的三维重建图像。一项针对胆管扩张患者的研究[29–30]发现，5.0 T MRCP能够清晰显示更多三级及以上胆管分支，走行细节更加完整，较3.0 T在小分支显示率上有显著优势，见图2。

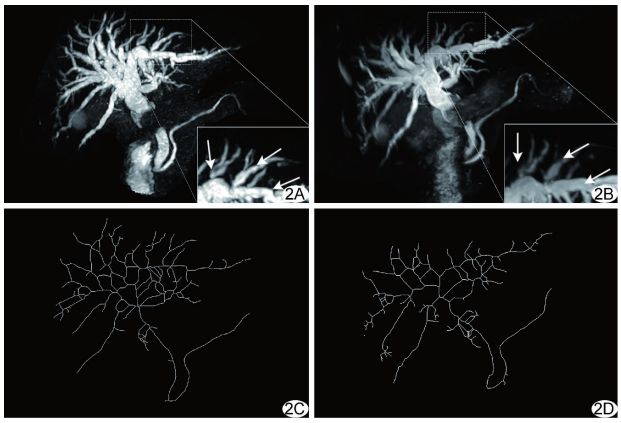


图 2 5.0 T MRCP能够清晰显示更多三级及以上胆管分支[30] A为5.0 T MRCP显示的胆管树细节（箭头所示）；B为3.0 T MRCP显示的胆管树细节（箭头所示）；C为5.0 T MRCP显示的胆管树骨骼化图细节；D为3.0 T MRCP显示的胆管树骨骼化图细节

注：MRCP为磁共振胰胆管成像。

2.2.2 胰脏

在胰腺成像方面，5.0 T DWI在表观弥散系数（apparent diffusion coefficient, ADC）值的稳定性和重复性上表现优异。有研究[31]利用缩小视野（reduced field–of–view, rFOV）技术结合5.0 T DWI，显著改善了胰腺成像的空间分辨率和图像均匀性，减少了运动伪影的干扰。在临床应用上，5.0 T MRI已被证实在胰岛素瘤的术前定位上具有较高的准确性，能够清晰显示瘤体与周围胰腺组织及血管的关系，并有助于预测术前并发症和评估疗效[32]。此外，在胰腺囊性病变的鉴别诊断中，5.0 T MRI对囊液成分、囊壁结构及分隔的显示更加细致，研究[33]表明其对浆液性囊腺瘤与黏液性囊腺瘤的区分具有较高价值。

2.2.3 泌尿系统

在泌尿系统成像中，5.0 T MRI对肾脏与肾上腺组织的层次结构显示更为清晰。研究[34]显示，

随着场强增加，肾皮质和髓质的T_2弛豫时间显著缩短，使得皮髓质分界更为清晰，且对组织氧合状态的变化更加敏感。5.0 T DWI与T_2 mapping在无创评估肾脏缺氧和功能状态方面具有一定应用前景，为慢性肾病的早期监测提供了新的工具。

2.2.4 前列腺

在前列腺成像领域，5.0 T MRI结合多参数成像与直方图分析技术被用于前列腺癌（prostatic carcinoma, PCa）的诊断。研究[35]显示，ADC、体素内不相干运动（intravoxel incoherent motion, IVIM）与T_2 mapping的联合分析模型在区分PCa与良性前列腺增生方面具有较高的准确性，尤其在Gleason评分≥7分的患者中表现出更佳的风险分层能力。这一结果提示，5.0 T MRI在PCa的无创早期诊断与个体化管理中具有潜在应用价值。

2.3 肌骨系统成像

在肌骨系统成像领域，超高场MRI的研究起步相对较早。已有多项研究证实了7.0 T MRI在骨骼肌和关节检查中的可行性，包括成像质量、组织对比度以及定量参数的稳定性。随着线圈设计、射频硬件及成像序列的不断优化，5.0 T MRI在骨骼肌及关节成像中的优势逐渐显现[7]。软骨损伤早期常表现为成分变化而非形态学改变，5.0 T MRI能够更敏感检测软骨水分、胶原纤维和糖胺聚糖含量变化，为退行性关节病的早期诊断提供新的影像学工具。在运动损伤相关研究[9]中，5.0 T MRI对膝关节交叉韧带、半月板以及关节囊等细微解剖结构的呈现明显优于3.0 T，尤其在滑车、胫骨平台及股骨髁软骨缺损的检测中表现更为优越，5.0 T MRI的AUC值高于3.0 T（94% ~ 100% *vs.* 81% ~ 90%）和1.5 T（97% ~ 100% *vs.* 81% ~ 90%）。这种高分辨率优势不仅有助于损伤类型的精确分级，还可以在术前风险评估中提供更加可靠的结构信息，从而辅助手术方案的制定，见图3。有研究[36]探索了基于5.0 T的3D化学交换饱和转移（chemical exchange saturation transfer, CEST）技术对肌肉代谢的评估能力，结果表明，5.0 T MRI在膦酸肌酸和糖原的定量评估中表现出良好性能，能够较为准确地反映肌肉能量代谢状态。这为肌肉代谢性疾病如糖原累积病、肌病及运动相关疲劳的研究提供了新的影像学方法支持，拓展了5.0 T MRI在基础研究与临床应用中的潜在价值。

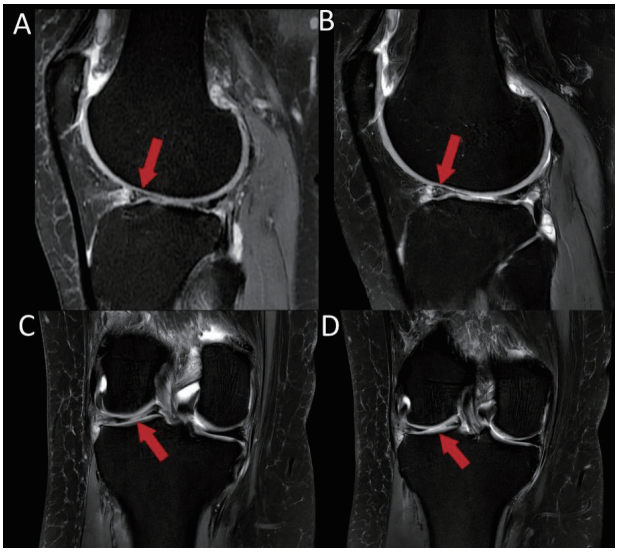


图3 1.5 T、3.0 T和5.0 T MRI显示半月板撕裂[9]
A为1.5 T MRI显示外侧半月板前角撕裂（箭头所示）；B为5.0 T MRI显示外侧半月板前角撕裂（箭头所示）；C为3.0 T MRI显示外侧盘状半月板撕裂（箭头所示）；D为5.0 T MRI显示外侧盘状半月板撕裂（箭头所示）

注：5.0 T MRI对半月板损伤具有更好的图像质量和解剖结构可见性。

尽管当前关于5.0 T MRI在骨关节系统中的研究尚有限，已有文献仍显示出其在微结构成像、早期病变检测以及临床决策支持方面具有潜在价值。未来，随着更多多中心临床研究的开展，5.0 T MRI在肌骨系统中的应用有望进一步扩展，包括肩关节、踝关节以及脊柱小关节的精细成像。此外，结合功能成像技术如T_2 mapping、磁共振自旋锁定成像（$T_1\rho$成像）或扩散加权成像，可能进一步增强其在早期病变定量评估中的作用。总体来看，5.0 T MRI在骨骼肌及关节成像中展现出的高敏感性与高分辨率优势，为运动医学、骨关节疾病早期干预及精准治疗提供了新的影像学方向，但其广泛临床应用仍需要更多验证和优化研究。

3 5.0T MRI的局限与挑战

尽管5.0 T MRI在SNR、分辨率及功能成像能力方面展现出独特优势，但是其在临床应用中仍存在多方面局限与挑战，需要进一步解决和优化。

3.1 扫描时间与运动伪影

5.0 T MRI在高分辨率成像方面展现出3.0 T所不具备的优势。例如，在心肌延迟成像中，5.0 T能够

实现1.2 mm的超高分辨率，对心肌纤维化及微小瘢痕的描绘更加清晰[8]。然而，这一分辨率的提升是以延长扫描时间为代价的。由于目前相关加速成像技术如并行采集和压缩感知的发展尚不完善，5.0 T在临床实践中往往需要更长的采集时间，较长的扫描时间直接增加了患者因呼吸、心跳等生理运动而产生伪影的风险。该问题在心脏及肺脏等动态器官成像中尤为突出，成为制约5.0 T MRI向复杂或危重病例应用拓展的瓶颈。

3.2 安全性与规范限制

5.0 T MRI的SAR显著增加，对体内金属植入物兼容性、局部加热效应及患者舒适度均带来挑战[3]，特别是在胸腹部和肌骨系统的扫描过程中，射频沉积和噪声可能引发患者不适[8]。尽管目前报道的研究中未出现严重安全事件，但多数受试者为健康志愿者或配合度较高的患者，仍缺乏在复杂临床人群中的系统安全性验证。

3.3 设备成本与推广困境

5.0 T MRI系统购置与维护成本高昂，对线圈系统设计、射频硬件升级以及专业人员培训均提出更高要求。这使得基层医疗机构和资源有限的医院难以快速部署。考虑到3.0 T MRI在大多数常见疾病诊断中已能够满足临床需求，5.0 T MRI的“临床增益”是否足以支撑高成本投入，仍需更多循证研究加以证实。因此，在基层医院推广5.0 T MRI的可遵循以下路径：一是优先在心血管疾病高发地区配置；二是开发针对5.0 T优化的快速扫描序列；三是建立区域性5.0 T MRI诊断中心，辐射周边基层医院。

3.4 临床性价比与病种适应性

部分研究[15]显示，5.0 T MRI虽在图像质量评分、病灶边界清晰度及微小结构描绘上优于3.0 T，但在某些定量参数如PSIR LGE病变体积的测量上并未表现出显著的统计学差异。这意味着在早期病变检测及复杂疾病评估中，5.0 T MRI可能具有优势，而在中晚期病变或常规病种的诊断中，其额外价值相对有限。此外，5.0 T MRI设备购置成本约为3.0 T的2.5倍，但仅在某些特定场景如心肌纤维化定量评估中有明显的效果提升，对普通患者而言，3.0 T已能满足90%的诊断需求。因此，如何科学界定适应病种并提高临床性价比，是5.0 T MRI进一步发展的关键。

3.5 技术与标准化瓶颈

超高场MRI固有的B0与B1场不均匀性、信号失真及伪影问题在5.0 T环境下依然存在[23]，且尚缺乏统一的成像协议、诊断标准与定量阈值。这不仅影响不同中心间的结果可比性，也制约了其在多中心临床研究中的应用及大规模推广。

4 5.0 T MRI的未来展望

展望未来，5.0 T MRI在非神经系统的应用仍有诸多值得深入探索的方向。

（1）成像协议及参数标准化

应建立标准化的成像协议与量化参数参考范围（如T_1、T_2、ADC等），为跨机构数据比较和循证应用奠定基础。

（2）技术与序列优化

序列与成像技术的持续优化将是推动5.0 T MRI临床转化的关键。例如，通过更高效的呼吸与心脏触发、自触发技术及基于图像重建的运动校正方法，可显著改善因患者配合不足带来的运动伪影；结合并行成像、压缩感知与深度学习重建等加速技术，有望在缩短扫描时间的同时保持影像质量与定量精度[37]。

（3）硬件与线圈创新

在硬件方面，发射与接收线圈的优化设计对改善B1场均匀性、降低SAR风险及避免局部射频热点至关重要[38]。更高强度与更快速切换的梯度系统将进一步拓展扩散成像如DWI、弥散张量成像（diffusion tensor imaging, DTI）以及4D流速成像等序列的可行性。

（4）多模态融合与人工智能

最后，5.0 T MRI与其他影像模态的融合应用值得期待。PET/MR等多模态结合，将为疾病提供结构、功能、代谢及分子层面的综合评估；结合人工智能与机器学习，可实现跨模态数据的整合分析，提升诊断准确性、病灶定位能力及疾病进展预测的可靠性[22]。

5.0 T磁共振成像技术是代表医学影像学进入超高场时代的重要里程碑，其在心血管、腹部与肌骨系统等非神经系统疾病诊断中展现出显著优势，能够实现更高分辨率、更精准的定量分析与功能评估。然而，超高场磁共振的普及仍存在诸多挑战。随着硬件创新、序列优化和人工智能的深度结合，这些问题有望被逐步克服。未来，随着多中心临床证据的积累、技术优化与跨学科融合的发展，5.0 T MRI有望在非神经系统疾病的诊疗中实现从科研探

索到临床常规化的转变，为精准医疗和个体化诊疗提供更强有力的支撑。

[参 考 文 献]

[1] 国家发展改革委. “十四五”生物经济发展规划[EB/OL]. (2021-12-20)[2025-10-03]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202205/P020220510324220702505.pdf.

[2] Uğurbil K. Imaging at ultrahigh magnetic fields: history, challenges, and solutions[J]. NeuroImage, 2018, 168: 7-32.

[3] Okada T, Akasaka T, Thuy D H, et al. Safety for human MR scanners at 7T[J]. Magn Reson Med Sci, 2022, 21(4): 531-537.

[4] Pazahr S, Nanz D, Sutter R. 7 T musculoskeletal MRI: fundamentals and clinical implementation[J]. Invest Radiol, 2023, 58(1): 88-98.

[5] Williams S N, McElhinney P, Gunamony S. Ultra-high field MRI: parallel-transmit arrays and RF pulse design[J]. Phys Med Biol, 2023, 68(2): 02TR02.

[6] Fagan A J, Bitz A K, Björkman-Burtscher I M, et al. 7T MR safety[J]. J Magn Reson Imaging, 2021, 53(2): 333-346.

[7] 刘苏卫, 袁慧书. 超高场磁共振在骨肌系统的研究进展[J]. 磁共振成像, 2024, 15(6): 224-228.

[8] Liu S, Feng L, Li Y, et al. Participant discomfort during 5 T MRI examinations and its contributing factors[J]. J Magn Reson Imaging, 2025, 62(2): 588-597.

[9] Liu S, Ni M, Wang D, et al. Clinical diagnostic value of 5 T MRI for knee injuries: a comparison study with 1.5 or 3 T[J]. J Magn Reson Imaging, 2025.

[10] Leiner T, Bogaert J, Friedrich M G, et al. SCMR position paper (2020) on clinical indications for cardiovascular magnetic resonance[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1): 76.

[11] Guo R, Weingärtner S, Šiurytė P, et al. Emerging techniques in cardiac magnetic resonance imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2022, 55(4): 1043-1059.

[12] Holtackers R J, Wildberger J E, Wintersperger B J, et al. Impact of field strength in clinical cardiac magnetic resonance imaging[J]. Invest Radiol, 2021, 56(11): 764-772.

[13] Lin L, Liu P, Sun G, et al. Bi-ventricular assessment with cardiovascular magnetic resonance at 5 Tesla: a pilot study[J]. Frontiers in cardiovascular medicine, 2022, 9: 913707.

[14] Pennig L, Lennartz S, Wagner A, et al. Clinical application of free-breathing 3D whole heart late gadolinium enhancement cardiovascular magnetic resonance with high isotropic spatial resolution using Compressed SENSE[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1): 89.

[15] Guo Y, Lin L, Zhao S, et al. Myocardial fibrosis assessment at 3-T versus 5-T myocardial late gadolinium enhancement MRI: early results[J]. Radiology, 2024, 313(2): e233424.

[16] Lu H, Miao X, Wang D, et al. Feasibility and clinical application of 5-T noncontrast dixon whole-heart coronary MR angiography: a prospective study[J]. Radiology, 2024, 313(1): e240389.

[17] Miao Q, Huang H, Lyu Z, et al. Myocardial T 1 and T 2 mapping at 5.0 T: feasibility and comparison with 3.0-T MRI[EB/OL]. (2025-08-05)[2025-10-03]. https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.08.03.25332892v1.

[18] Cao R, Li S, Sun A, et al. Highly accelerated abdominal 4D flow at 5.0T: a feasibility study[C]// The Proceedings of 2025 ISMRM & ISMRT Annual Meeting & Exhibition. Concord: ISMRM, 2025: 4597.

[19] Rietsch S H G, Orzada S, Maderwald S, et al. 7T ultra-high field body MR imaging with an 8-channel transmit/32-channel receive radiofrequency coil array[J]. Med Phys, 2018, 45(7): 2978-2990.

[20] Merkle E M, Dale B M, Paulson E K. Abdominal MR imaging at 3T[J]. Magn Reson Imaging Clin N Am, 2006, 14(1): 17-26.

[21] Kraff O, Quick H H. 7T: physics, safety, and potential clinical applications[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 46(6): 1573-1589.

[22] Li S, Liu C, Yuan S, 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): 6852-6867.

[23] 刘建宪, 甘洁. 5.0T超高场全身MRI的优势与挑战[J]. 中国医学影像学杂志, 2025, 33(7): 689-693.

[24] 陈旭丹, 李少朋, 音大为, 等. 5.0T MRI磁敏感加权成像在肝细胞癌与肿块型肝内胆管癌鉴别诊断中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2025, 33(7): 712-716, 729.

[25] 李少朋, 刘畅, 音大为, 等. 基于5.0T MRI的磁敏感加权成像诊断肝细胞癌合并静脉癌栓[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(5): 682-685.

[26] Liu J, Wang Z, Yu D, et al. Comparative analysis of hepatic fat quantification across 5 T, 3 T and 1.5 T: a study on consistency and feasibility[J]. Eur J Radiol, 2024, 180: 111709.

[27] Li Y, Jin D, Liu S, et al. Quantification of the proton density fat fraction and iron content: a comparative study between 3.0 T and 5.0 T MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2025, 62(2): 551-560.

[28] 刘建宪, 王振松, 王鑫, 等. 基于5.0T MRI定量肝脏质子密度脂肪分数[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(5): 671-676.

[29] Yin L, Li Z, Shang M, et al. Magnetic resonance cholangiopancreatography at 5.0 T: quantitative and qualitative comparison with 3.0 T[J]. BMC Med Imaging, 2024, 24(1): 331.

[30] 殷亮, 李章柱, 商明艳, 等. 比较3.0T与5.0T MR胆胰管造影图像质量[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(5): 690-693.

[31] Jiang Z, Sun W, Xu D, et al. Stability and repeatability of diffusion-weighted imaging (DWI) of normal pancreas on 5.0 Tesla magnetic resonance imaging (MRI)[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 11954.

[32] Xu Q, Zhao H, Gao R, et al. Insulinoma detection and surgery planning: a comparative study of 5.0T MRI versus 3.0T MRI and MDCT[J]. Abdom Radiol (NY), 2025, 50(9): 4148-4159.

[33] Zhao H, Xu Q, Gao R, et al. Clinical feasibility of 5.0 T MRI/MRCP in characterizing pancreatic cystic lesions: comparison with 3.0 T and MDCT[J]. Diagnostics (Basel), 2024, 14(21): 2457.

[34] Zheng L, Yang C, Sheng R, et al. Renal imaging at 5 T versus 3 T: a comparison study[J]. Insights Imaging, 2022, 13(1): 155.

[35] 郑成凤, 邢森, 刘兴华, 等. 5.0T多参数MRI结合直方图定量分析对前列腺癌和良性前列腺增生的鉴别诊断[J]. 中国医学影像学杂志, 2025, 33(7): 723-729.

[36] Xu X, Chen X, Liu Y, et al. Simultaneous 3D CEST imaging of phosphocreatine and glycogen in skeletal muscle at 5T[C]// The Proceedings of 2024 ISMRM & ISMRT Annual Meeting & Exhibition. Concord: ISMRM, 2024: 0145.

[37] 赵士海, 徐峥雨, 郭玉博, 等. 基于压缩感知加速的5.0T与3.0T冠状动脉磁共振成像对比研究[J]. 中国医学影像学杂志, 2025, 33(7): 706-711.

[38] 谢万明, 谢兵, 宋小敏, 等. 5.0 T磁共振成像技术的研究及临床应用进展[J]. 医疗装备， 2024, 37(16): 162-164.