

· 专家述评 ·



陶晓峰，主任医师，教授，上海交通大学医学院附属第九人民医院博士研究生导师，影像中心主任，影像组学和分子影像实验室主任和学科带头人。担任亚太放射学会神经与头颈放射学分会执行委员，中华医学会放射学分会常务委员兼头颈学组组长，中国医师协会放射学医师分会常务委员，中华口腔医学会口腔颌面放射专业委员会候任主任委员，上海市医学会放射科专科分会主任委员，上海市医师协会放射医师分会会长，国家口腔医学中心影像专科联盟主任，《实用放射学杂志》副主编，《肿瘤影像学》常务编委，《中华放射学杂志》《磁共振成像》《中国医学影像技术》编委。主持国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目、国家自然科学基金面上项目等在内的各级项目总计10余项。获得国家发明专利4项。以第一作者/通信作者发表论文100余篇，包含 *Cell Reports Medicine*、*Radiology*、*ACS Applied Materials & Interfaces* 等高水平国际期刊。获得上海医学科技奖二等奖、上海市科技进步奖二等奖、华夏医学科技奖三等奖等奖项。

## 从结构到功能：磁共振技术演进与影像诊断模式变革

马绮繁，陶晓峰

上海交通大学医学院附属第九人民医院放射科，上海 200011

[摘要] 磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 凭借其无创、无辐射、高软组织分辨率和多参数成像优势，已成为现代医学诊断的重要工具。本文系统述评了近年来MRI技术的关键进展，涵盖低场强和超低场强MRI在成本、便携性和可及性方面的突破，高场强和超高场强MRI在硬件性能与成像质量上的提升，以及功能成像技术 (包括弥散成像、灌注成像、血氧水平依赖功能成像、磁共振波谱成像和化学交换饱和转移成像等) 在疾病机制研究和临床应用中的深化，并探讨了人工智能 (artificial intelligence, AI) 与MRI的深度融合发展。

[关键词] 磁共振成像；功能磁共振；影像诊断；低场强与高场强磁共振；人工智能

中图分类号：R445.2 文献标志码：A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2026.02.001

**From structure to function: evolution of magnetic resonance technology and transformation of imaging diagnosis** MA Qifan, TAO Xiaofeng (Department of Radiology, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

Correspondence to: TAO Xiaofeng E-mail: cjr.taoxiaofeng@vip.163.com

[Abstract] Magnetic resonance imaging (MRI) has become a crucial tool in modern medical diagnosis and research, owing to its non-invasive nature, absence of ionizing radiation, high soft-tissue resolution, and multi-parametric imaging capabilities. This review systematically summarized recent advances in MRI technology, including

基金项目：国家自然科学基金 (82530068)。

利益冲突：作者声明无利益冲突。

伦理批件：不需要。

知情同意：不需要。

引用本文：马绮繁，陶晓峰. 从结构到功能：磁共振技术演进与影像诊断模式变革 [J]. 肿瘤影像学, 2026, 35(2): 213-219.

**Funding:** National Natural Science Foundation of China (82530068).

**Conflicts of interest:** authors declare no conflicts of interest.

**Ethical approval:** not required.

**Informed consent:** not required.

**Cite this article:** MA Q F, TAO X F. From structure to function: evolution of magnetic resonance technology and transformation of imaging diagnosis [J]. *Oncoradiology*, 2026, 35(2): 213-219.

breakthroughs in low-field and ultra-low-field MRI in terms of cost, portability, and accessibility; improvements in hardware performance and image quality of high-field and ultra-high-field MRI systems; and the deepening applications of functional imaging techniques—such as diffusion imaging perfusion imaging, blood oxygenation level dependent functional MRI (BOLD-fMRI), magnetic resonance spectroscopy (MRS), and chemical exchange saturation transfer imaging (CEST)—in disease mechanism research and clinical practice. Furthermore, the integration of artificial intelligence (AI) with MRI is discussed, highlighting its transformative role in accelerating imaging, enhancing diagnostic accuracy, and enabling personalized medicine.

[Key words] Magnetic resonance imaging; Functional magnetic resonance; Imaging diagnosis; Low-field and high-field magnetic resonance; Artificial intelligence

磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 以其无创、无辐射、高软组织分辨率、多参数及定量成像等优势, 已成为现代医学诊断和科研的重要工具。自 20 世纪 70 年代问世以来, MRI 技术不断取得突破, 其发展历程经历了从基础解剖成像到功能与代谢研究, 从低场强到超高场强系统的演进。在这一过程中, 扫描速度、图像质量及临床应用范围均得到持续提升<sup>[1]</sup>。在场强不断提升以及功能成像技术 (如弥散成像、灌注成像和波谱分析等) 与人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术深度融合的推动下, MRI 技术实现了从“结构可视化”到“功能量化”, 并进一步迈向“智能决策辅助”的跨越式发展。这些进步不仅深化了疾病机制研究, 与此同时, 临床诊断模式也随之发生深刻变革, MRI 不再局限于病变检测, 而是逐步整合到精准医疗的全流程中, 包括早期筛查、治疗方案优化和患者预后评估。在此背景下, 本文系统回顾近年来 MRI 技术的关键进展 (涵盖低场强与高场强硬件革新、功能成像应用及 AI 辅助诊疗), 并探讨其对临床诊疗模式的深远影响。

## 1 低场强与高场强 MRI 技术进展

### 1.1 低场强与超低场强 MRI 的发展

低场强 MRI (low-field MRI) 相较于高场 MRI 具有显著优势, 包括设备成本低、维护简便、安全性高以及更广泛的适用性。传统高场强 MRI 依赖超导磁体和液氮冷却系统, 导致高昂的购置和运行成本, 并需严格的电磁屏蔽环境, 限制了其在资源有限地区 (如发展中国家或基层医疗机构) 的应用。相比之下, 低场强 MRI 采用无氦永久磁铁, 功耗低, 热效应风险大大减少, 可接入普通电源, 便于基层医疗机构和资源匮乏地

区部署<sup>[2]</sup>; 无需射频屏蔽, 同时减少金属伪影和幽闭恐惧症风险, 更适合床旁或移动式检查; 声学噪声更低, 适用于儿科及新生儿检查<sup>[3]</sup>。

然而, 低场强 MRI 长期面临信噪比低、分辨率不足的挑战, 近年来图像重建的进展, 特别是利用 AI 增强低场强图像, 激发了低场强 MRI 的复兴<sup>[4]</sup>。通过优化扫描协议、噪声抑制算法和深度学习重建技术, 低场强 MRI 的图像质量已显著提升, 使其在脑卒中<sup>[5]</sup>、心脏<sup>[6]</sup>及儿科成像<sup>[7]</sup>等领域展现潜力。近年来, 针对超低场强 (<0.1 T) 的低成本脑成像扫描仪的开发工作集中开展, 常应用于诊断肿瘤和中风引起的脑损伤<sup>[5, 8-9]</sup>。2024 年 10 月, Zhao 等<sup>[10]</sup>研发了一款低成本、低功耗 (0.05 T) 的无屏蔽全身 MRI 设备, 采用深度学习算法补偿低场强下的图像质量, 在 30 名志愿者中展现出与传统高场 MRI 相当的成像效果, 图像分辨率约为 2 mm×2 mm×8 mm。研究通过整合三维深度学习重建与主动电磁干扰消除技术, 首次实现了超低场强下全身多器官 (脑、脊柱、心脏等) 的高质量成像。

### 1.2 高场强与超高场强 MRI 的突破

高场强与超高场强系统 (1.5 T 及以上) 正不断突破技术瓶颈, 推动医学影像向更高分辨率、更快扫描速度和更精准诊断的方向发展<sup>[11]</sup>。在临床实践中, 3.0 T 设备逐步普及, 而 5.0 T、7.0 T 系统已开始在国内顶尖科研机构和医院试点部署, 但 10.5 T 及以上超高场强设备仍处于实验室研发阶段。超高场强 MRI 相关的挑战包括磁敏感效应增强导致的伪影、射频发射场的不均匀性以及组织内射频能量沉积增加<sup>[12-13]</sup>。此外, 生理噪声 (如心跳、呼吸) 对功能 MRI 的影响更为显著, 需开发针对性降噪技术。这些挑战与高信

噪比的优势并存，需通过硬件和算法创新协同解决。

目前，硬件性能的突破，包括大口径高场强通用超导磁体研发<sup>[14]</sup>、多通道射频接收阵列<sup>[15-16]</sup>、低噪声高速梯度系统（切换率 $\geq 200 \text{ mT} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ms}^{-1}$ ）以及快速成像序列的优化创新，共同推动着扫描效率与成像质量的显著提升。另一方面，深度学习算法显著提升图像重建质量，使7 T系统实现亚毫米级分辨率和16倍加速采集<sup>[17]</sup>；AI驱动的实时校正技术有效解决了运动伪影和生理噪声问题。这些创新拓展了超高场强MRI在脑科学和骨关节疾病等领域的应用深度<sup>[18]</sup>，随着算法持续优化，AI有望成为突破7 T及以上超高场强MRI技术瓶颈的核心驱动力。

在中国，上海联影医疗科技股份有限公司研制的5 T的人体全身MRI系统，兼顾7 T的高性能与3 T的临床适用性的特点，联合48通道头部收发一体射频线圈，相对于3 T系统的32通道头部线圈，5 T系统的信噪比是3 T系统的1.6倍左右，同时在5 T系统上的大脑解剖、血管成像上具有更高的信噪比和图像分辨率<sup>[19]</sup>。5 T MRI或将成为连接科研与医疗应用的桥梁，助力中国高端医疗装备自主化与精准医学发展。

## 2 功能成像技术进展

### 2.1 弥散成像：从结构到微环境解析

弥散MRI技术通过检测水分子在生物组织中的微观弥散运动，反映组织的微结构特征。水分子的弥散受细胞膜、纤维束等结构的限制，表现出各向异性（如白质）或各向同性（如灰质），从而提供组织结构的对比信息<sup>[20]</sup>。

弥散加权成像（diffusion-weighted imaging, DWI）是最基础的弥散成像技术，通过施加弥散敏感梯度（用 $b$ 值表示），利用信号衰减来表征水分子的弥散程度，其核心参数为表观弥散系数（apparent diffusion coefficient, ADC）<sup>[21]</sup>。DWI在临床上最早、最成功的应用是急性脑卒中的早期诊断，因为缺血导致细胞毒性水肿，水分子弥散受限，表现为DWI高信号和ADC值降低<sup>[22]</sup>。另外，DWI也在临床上被广泛用于多种肿瘤的诊断与鉴别<sup>[23-25]</sup>。弥散张量成像（diffusion tensor

imaging, DTI）是DWI的延伸，它通过在多个方向上施加弥散梯度，能够更全面地描述水分子的弥散特性。通过DTI，可以计算出多种定量参数，如平均弥散率（mean diffusivity, MD）和各向异性分数（fractional anisotropy, FA），广泛用于白质纤维束追踪和神经系统疾病研究<sup>[26-27]</sup>。

近年来，弥散MRI技术从传统的单指数弥散模型逐步发展为一系列更复杂的非高斯模型和生物物理模型。在模型创新方面，弥散峰度成像（diffusion kurtosis imaging, DKI）通过引入峰度参数来量化水分子弥散偏离高斯分布的程度<sup>[28]</sup>；高角分辨率弥散成像（high angular resolution diffusion imaging, HARDI）和弥散谱成像（diffusion spectrum imaging, DSI）采用多方向采样策略，显著提高了复杂纤维交叉区域的重建精度<sup>[29-30]</sup>。生物物理模型的发展则更加注重组织微结构的特异性解析，如神经突定向弥散与密度成像（neurite orientation dispersion and density imaging, NODDI）可以区分神经元轴突密度和方向分散度<sup>[31]</sup>，体素内不相干运动（intravoxel incoherent motion, IVIM）模型则实现了弥散信号中真实水分子弥散与微循环灌注成分的分离<sup>[32]</sup>。未来研究需要进一步优化数据采集策略、简化模型参数并建立标准化的分析流程，以促进这些先进的弥散成像技术从实验室走向临床常规应用。

### 2.2 灌注成像：评估血流动力学与微循环

磁共振灌注成像旨在评估组织内的血流动力学状态，特别是在肿瘤诊断和治疗评估方面展现出独特优势。动态对比增强MRI（dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI）通过定量分析对比剂在组织内的动态分布过程，为肿瘤血管生成和微循环功能的评估提供了关键信息。DCE-MRI技术通过快速连续采集T1加权图像，监测外源性钆对比剂在血管内外的动态分布过程，并采用药代动力学模型计算出渗透率参数 $K^{\text{trans}}$ 、血管外细胞外容积分数 $V_e$ 等重要指标。这些参数能够直观反映肿瘤血管的通透性和完整性，为胶质瘤、乳腺癌等多种肿瘤的鉴别诊断、分级评估和治疗反应监测提供了量化依据<sup>[33-34]</sup>。

特别是随着高场强 MRI 设备和快速成像序列的发展, 现代 DCE-MRI 已能实现毫米级的空间分辨率和秒级的时间分辨率, 显著提高了微小病灶的检出率和参数定量的准确度<sup>[35-36]</sup>。

随着技术的不断进步, 特别是动脉自旋标记 (arterial spin labeling, ASL) 技术的成熟, 磁共振灌注成像正朝着无创、定量、高分辨率的方向快速发展。ASL 通过标记动脉血液中的氢质子, 获取“标记像”和“控制像”, 然后通过减影生成脑血流灌注图像。ASL 灌注的 1 个显著优势是无需外源性示踪剂、无辐射, 适用于儿童、对钆对比剂有不良反应的患者、肾功能不全患者, 以及需要重复随访成像的患者。三维准连续式 ASL (three-dimensional pseudo-continuous ASL, 3D PCASL) 技术可以定量测量脑血流量 (cerebral blood flow, CBF)。国内外 ASL 专家共识<sup>[37-38]</sup>, 进一步推动了该技术的概念化和更广泛的临床应用。

### 2.3 血氧水平依赖功能成像: 神经活动的非侵入性探测

血氧水平依赖功能成像 (blood oxygenation level dependent functional MRI, BOLD-fMRI) 是当前研究大脑功能活动重要的无创技术之一。该技术通过检测神经元活动引发的局部血流动力学变化, 间接反映神经电活动, 具有空间分辨率高、可全脑覆盖的优势。静息态 fMRI (resting-state fMRI, rs-fMRI) 的发现扩展了 fMRI 的应用范围, 使其能够研究大脑内在的、固有的功能架构<sup>[39-40]</sup>。临床上, BOLD fMRI 在神经外科领域已成为不可或缺的术前评估工具, 同时在神经内科和精神病学领域也展现出重要的应用价值。例如, BOLD-fMRI 常用于脑肿瘤手术规划、癫痫病灶定位、脑血管畸形治疗<sup>[41-42]</sup>, 此外, 其在精神疾病研究中的应用也日益广泛, 如通过 rs-fMRI 功能链接分析评估大脑默认模式网络异常, 为帕金森病、阿尔茨海默病、精神分裂症等疾病诊断提供了客观的影像学标志物<sup>[43]</sup>。

### 2.4 代谢与分子成像: 磁共振波谱与化学交换饱和和转移

磁共振波谱成像 (magnetic resonance

spectroscopy, MRS) 和化学交换饱和转移成像 (chemical exchange saturation transfer imaging, CEST) 作为非侵入性、无电离辐射的分子影像学技术, 为研究脑代谢和分子环境提供了独特视角, 显著拓展了传统解剖与功能成像的边界。MRS 通过检测特定原子核 (如<sup>1</sup>H、<sup>31</sup>P、<sup>13</sup>C) 的化学位移, 能够定量分析脑内关键代谢物的浓度, 如 N-乙酰天冬氨酸 (NAA)、胆碱 (Cho)、肌酸 (Cr)、乳酸和谷氨酸等。其中, NAA 是神经元完整性的特异性标志物, 其水平降低常见于神经退行性疾病、脑损伤和肿瘤; 胆碱升高则反映细胞膜代谢活跃, 常见于肿瘤和炎症过程。MRS 在临床中的应用日益广泛, 尤其在脑肿瘤的分级、鉴别诊断和治疗监测中发挥重要作用。例如, 胶质瘤中 NAA/Cho 比值降低、乳酸峰升高, 可作为恶性程度的生物标志物; 同时, MRS 还可有效区分肿瘤复发与放射性坏死, 避免不必要的二次手术。

CEST 则通过利用特定代谢物中可交换质子 (如酰胺质子、羟基质子、胺基质子) 的化学交换特性, 实现对低浓度分子的间接检测。氨基质子转移成像 (amide proton transfer imaging, APT) 因其对蛋白质和多肽中酰胺基团的特异性, 成为最具临床转化潜力的 CEST 技术。在脑肿瘤中, 异常升高的蛋白质浓度和酸性微环境导致 APT 信号显著增强, 为肿瘤的无创分级、边界界定和治疗反应评估提供了新工具<sup>[44]</sup>。研究<sup>[45]</sup>表明, APT 信号强度与肿瘤恶性程度、增殖指数及患者预后密切相关, 尤其在胶质母细胞瘤和转移瘤中表现突出。在非脑部应用中, CEST 技术在乳腺癌中的研究尤为活跃。MRI 在乳腺癌检测、分期和治疗反应监测中已具常规临床地位, 而 CEST 因其对乳腺肿瘤代谢特征 (如乳酸水平、pH 值、蛋白质水平) 的灵敏度, 成为评估肿瘤生物学行为和预测治疗反应的有力补充<sup>[46]</sup>。初步临床研究<sup>[47]</sup>显示, CEST 信号与肿瘤等级、受体状态及增殖指数呈正相关, 提示其在个性化治疗决策中的潜力。尽管 CEST 在临床推广中仍面临标准化、信噪比和扫描时间等挑战, 但其在肿瘤学领域的应用前景广阔, 有望成为未来精准

医疗的重要组成部分。

### 3 AI与MRI的融合模式

AI正在深刻变革MRI的技术发展与临床应用。在成像加速方面，深度学习与压缩感知的结合显著提升了数据重建效率，通过从欠采样 $k$ 空间数据中恢复高质量图像，大幅缩短扫描时间，提高患者舒适度。AI驱动的超分辨率技术进一步突破硬件限制，实现亚毫米级结构的清晰显示，尤其在功能与代谢成像（如fMRI、DTI、MRS、CEST）中展现出广阔前景，为快速、高分辨率的临床检查提供了技术支撑。在辅助诊断层面，AI模型（如U-Net、Transformer）已能高效、精准地完成病灶检测与分割，广泛应用于肿瘤等疾病的自动化识别，构建预后评估和治疗反应预测模型。在个性化医疗中，AI正推动MRI从诊断工具向治疗决策支持系统演进，例如在放疗计划中实现靶区与危及器官的智能勾画，优化剂量分布。然而，AI的临床落地仍面临数据标准化、算法可解释性不足以及伦理隐私等挑战。未来，随着多中心数据共享平台的建立、可解释AI的发展以及规范化监管体系的完善，AI将更加深入地融入MRI全流程，推动MRI影像诊断向智能化、精准化和个体化方向持续发展。

### 4 总结与展望

MRI作为现代医学中不可或缺的无创诊断工具，近年来在硬件技术、功能成像和人工智能融合等方面取得了突破性进展。从低场强与超低场强MRI的普及化、便携化发展，到高场强与超高场强系统在分辨率与信噪比上的飞跃，MRI正逐步实现从“结构可视化”向“功能量化”和“智能决策辅助”的跨越式演进。功能成像技术不仅深化了对疾病病理生理学机制的理解，也为临床提供了多维度、量化的评估依据。人工智能技术的深度融入，有助于图像重建效率、诊断准确性和个性化治疗能力的提升。

未来，随着多模态数据融合、可解释AI模型的发展等下一代技术的突破，MRI有望在早期筛查、精准治疗和全程管理中发挥更大作用。

第一作者：

马绮繁（ORCID: 0009-0002-7886-8283），博士研究生在读。

通信作者：

陶晓峰（ORCID: 0000-0002-8472-0456），博士，上海交通大学医学院附属第九人民医院放射科主任医师，E-mail: cj.ta Xiaofeng@vip.163.com。

作者贡献声明：

马绮繁：负责论文的整理框架与结构制订，文献调研与整理，论文撰写；陶晓峰：指导论文框架的提出，撰写思路梳理，论文的修改与审核。

### [参考文献]

- [1] LAUTERBUR P C. Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance [J]. *Nature*, 1973, 242(5394): 190–191.
- [2] OBUNGOLOCH J, MUHUMUZA I, TEEUWISSE W, et al. On-site construction of a point-of-care low-field MRI system in Africa [J]. *NMR Biomed*, 2023, 36(7): e4917.
- [3] ANAZODO U C, DU PLESSIS S. Imaging without barriers [J]. *Science*, 2024, 384(6696): 623–624.
- [4] LAU V, XIAO L F, ZHAO Y J, et al. Pushing the limits of low-cost ultra-low-field MRI by dual-acquisition deep learning 3D superresolution [J]. *Magn Reson Med*, 2023, 90(2): 400–416.
- [5] IGLESIAS J E, SCHLEICHER R, LAGUNA S, et al. Quantitative brain morphometry of portable low-field-strength MRI using super-resolution machine learning [J]. *Radiology*, 2023, 306(3): e220522.
- [6] MAYEARS, ZICHA S, GIESE D, et al. Cardiac magnetic resonance imaging at lower field strength: a comparison of biventricular cine and quantitative T1 and T2 maps at 0.55T and 1.5T [J]. *Investig Radiol*, 2026, 61(4): 251–260.
- [7] GOOLAUB D S, TIAN Y, VAN AMEROM J F P, et al. Multiresolution comparison of fetal real-time and cine magnetic resonance imaging at 0.55T [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2025, 27(1): 101856.
- [8] COOLEY C Z, MCDANIEL P C, STOCKMANN J P, et al. A portable scanner for magnetic resonance imaging of the brain [J]. *Nat Biomed Eng*, 2021, 5(3): 229–239.
- [9] LIU Y L, LEONG A T L, ZHAO Y J, et al. A low-cost and shielding-free ultra-low-field brain MRI scanner [J]. *Nat Commun*, 2021, 12: 7238.
- [10] ZHAO Y J, DING Y, LAU V, et al. Whole-body magnetic resonance imaging at 0.05 Tesla [J]. *Science*, 2024, 384(6696): eadm7168.
- [11] POLIMENI J R, ULUDAĞ K. Neuroimaging with ultra-high field MRI: present and future [J]. *NeuroImage*, 2018, 168: 1–6.
- [12] HOFF M N, MCKINNEY A IV, SHELLOCK F G, et al. Safety considerations of 7-T MRI in clinical practice [J]. *Radiology*, 2019, 292(3): 509–518.
- [13] VACHHA B, HUANG S Y. MRI with ultrahigh field strength and high-performance gradients: challenges and opportunities

- for clinical neuroimaging at 7 T and beyond[J]. *Eur Radiol Exp*, 2021, 5(1): 35.
- [14] BOULANT N, MAUCONDUIT F, GRAS V, et al. *In vivo* imaging of the human brain with the Iseult 11.7-T MRI scanner[J]. *Nat Meth*, 2024, 21(11): 2013–2016.
- [15] LAGORE R L, SADEGHI-TARAKAMEH A, GRANT A, et al. A 128-channel receive array with enhanced signal-to-noise ratio performance for 10.5T brain imaging[J]. *Magn Reson Med*, 2025, 93(6): 2680–2698.
- [16] WAKS M, LAGORE R L, AUERBACH E, et al. RF coil design strategies for improving SNR at the ultrahigh magnetic field of 10.5T[J]. *Magn Reson Med*, 2025, 93(2): 873–888.
- [17] MARTH T, MARTH A A, KAJDI G W, et al. Evaluating undersampling schemes and deep learning reconstructions for high-resolution 3D double echo steady state knee imaging at 7T: a comparison between GRAPPA, CAIPIRINHA, and compressed sensing[J]. *Investig Radiol*, 2025, 60(9): 609–615.
- [18] WU D, KANG L Y, LI H T, et al. Developing an AI-empowered head-only ultra-high-performance gradient MRI system for high spatiotemporal neuroimaging [J]. *NeuroImage*, 2024, 290: 120553.
- [19] WEI Z D, CHEN Q Y, HAN S H, et al. 5 T magnetic resonance imaging: radio frequency hardware and initial brain imaging [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(5): 3222–3240.
- [20] JONES D K. *Diffusion MRI: theory, methods, and applications* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2010.
- [21] CHILLA G S, TAN C H, XU C, et al. Diffusion weighted magnetic resonance imaging and its recent trend—a survey [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2015, 5(3): 407–422.
- [22] LUTSEP H L, ALBERS G W, DECRESPIGNY A, et al. Clinical utility of diffusion-weighted magnetic resonance imaging in the assessment of ischemic stroke [J]. *Ann Neurol*, 1997, 41(5): 574–580.
- [23] HÖTKER A M, MAZAHERI Y, WIBMER A, et al. Use of DWI in the differentiation of renal cortical tumors [J]. *Am J Roentgenol*, 2016, 206(1): 100–105.
- [24] SWITLYK M D, DALE E, TAFJORD S, et al. Reduced field-of-view DWI outperforms conventional DWI in assessing tumor heterogeneity and HPV status in head and neck cancer [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 31889.
- [25] OKAMOTO K, ITO J, ISHIKAWA K, et al. Diffusion-weighted echo-planar MR imaging in differential diagnosis of brain tumors and tumor-like conditions [J]. *Eur Radiol*, 2000, 10(8): 1342–1350.
- [26] TAMNES C K, ROALF D R, GODDINGS A L, et al. Diffusion MRI of white matter microstructure development in childhood and adolescence: methods, challenges and progress [J]. *Dev Cogn Neurosci*, 2018, 33: 161–175.
- [27] WANG L W, CHO K H, CHAO P Y, et al. White and gray matter integrity evaluated by MRI-DTI can serve as noninvasive and reliable indicators of structural and functional alterations in chronic neurotrauma [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 7244.
- [28] MARRALE M, COLLURA G, BRAI M, et al. Physics, techniques and review of neuroradiological applications of diffusion kurtosis imaging (DKI) [J]. *Clin Neuroradiol*, 2016, 26(4): 391–403.
- [29] PRCKOVSKA V, PEETERS T H J M, VAN ALMSICK M, et al. Fused DTI/HARDI visualization [J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2011, 17(10): 1407–1419.
- [30] TRISTÁN-VEGA A, PIECIAK T, PARÍS G, et al. HYDI-DSI revisited: Constrained non-parametric EAP imaging without q-space re-gridding [J]. *Med Image Anal*, 2023, 84: 102728.
- [31] ZHANG H, SCHNEIDER T, WHEELER-KINGSHOTT C A, et al. NODDI: practical *in vivo* neurite orientation dispersion and density imaging of the human brain [J]. *NeuroImage*, 2012, 61(4): 1000–1016.
- [32] II MA M. Perfusion-driven intravoxel incoherent motion (IVIM) MRI in oncology: applications, challenges, and future trends [J]. *Magn Reson Med Sci*, 2021, 20(2): 125–138.
- [33] DIJKHOFF R A P, BEETS-TAN R G H, LAMBREGTS D M J, et al. Value of DCE-MRI for staging and response evaluation in rectal cancer: a systematic review [J]. *Eur J Radiol*, 2017, 95: 155–168.
- [34] MANN R M, CHO N, MOY L. Breast MRI: State of the art [J]. *Radiology*, 2019, 292(3): 520–536.
- [35] YAMAGUCHI K, ICHINOHE K, IYADOMI M, et al. Abbreviated and ultrafast dynamic contrast-enhanced (DCE) MR imaging [J]. *Magn Reson Med Sci*, 2025, 24(3): 315–331.
- [36] BLIESENER Y, LEBEL R M, ACHARYA J, et al. Pseudo test-retest evaluation of millimeter-resolution whole-brain dynamic contrast-enhanced MRI in patients with high-grade glioma [J]. *Radiology*, 2021, 300(2): 410–420.
- [37] ALSOP D C, DETRE J A, GOLAY X, et al. Recommended implementation of arterial spin-labeled perfusion MRI for clinical applications: a consensus of the ISMRM perfusion study group and the European consortium for ASL in dementia [J]. *Magn Reson Med*, 2015, 73(1): 102–116.
- [38] 中华医学会放射学分会质量管理与安全管理学组, 中华医学会放射学分会磁共振学组. 动脉自旋标记脑灌注 MRI 技术规范应用专家共识 [J]. *中华放射学杂志*, 2016, 50(11): 817–824.  
Quality Management and Safety Management Group of Chinese Society of Radiology Chinese Medical Association, MRI Group of Chinese Society of Radiology Chinese Medical Association. Expert consensus on standardized application of arterial spin labeling brain perfusion MRI technology [J]. *Chin J Radiol*, 2016, 50(11): 817–824.
- [39] KROLL H, ZAHARCHUK G, CHRISTEN T, et al. Resting-state BOLD MRI for perfusion and ischemia [J]. *Top Magn Reson Imag*, 2017, 26(2): 91–96.
- [40] BEHESHTIAN E, JALILIANHASANPOUR R, MODIR SHANECHI A, et al. Identification of the somatomotor network from language task - based fMRI compared with resting-state fMRI in patients with brain lesions [J]. *Radiology*, 2021, 301(1):

- 178-184.
- [41] LAKHANI D A, SABSEVITZ D S, CHAICHANA K L, et al. Current state of functional MRI in the presurgical planning of brain tumors[J]. *Radiol Imag Cancer*, 2023, 5(6): e230078.
- [42] PUR D R, EAGLESON R, LO M, et al. Presurgical brain mapping of the language network in pediatric patients with epilepsy using resting-state fMRI [J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2021, 27(3): 259-268.
- [43] CATALINO M P, YAO S, GREEN D L, et al. Mapping cognitive and emotional networks in neurosurgical patients using resting-state functional magnetic resonance imaging [J]. *Neurosurg Focus*, 2020, 48(2): E9.
- [44] JONES K M, POLLARD A C, PAGEL M D. Clinical applications of chemical exchange saturation transfer (CEST) MRI [J]. *J Magn Reson Imag*, 2018, 47(1): 11-27.
- [45] ZHOU J Y, HEO H Y, KNUSSON L, et al. APT-weighted MRI: Techniques, current neuro applications, and challenging issues [J]. *J Magn Reson Imag*, 2019, 50(2): 347-364.
- [46] VINOGRADOV E, KEUPP J, DIMITROV I E, et al. CEST-MRI for body oncologic imaging: are we there yet? [J]. *NMR Biomed*, 2023, 36(6): e4906.
- [47] PATEL K S, YAO J W, CHO N S, et al. pH-Weighted amine chemical exchange saturation transfer echo planar imaging visualizes infiltrating glioblastoma cells [J]. *Neuro Oncol*, 2024, 26(1): 115-126.

(收稿日期: 2026-01-04 修回日期: 2026-04-15)