



· 综述 ·

肺结节MRI发展历程与展望

胡皓^{1,2}, 王宇博^{1,2}, 和正英³, 丁志勇⁴, 叶晓丹⁵, 杨斌^{1,2}

1. 昆明医科大学附属甘美医院医学影像中心, 云南昆明650051;
2. 昆明医科大学研究生院放射影像学专业, 云南昆明650500;
3. 迪庆藏族自治州人民医院影像中心, 云南迪庆674400;
4. 曲靖市妇幼保健院影像中心, 云南曲靖655000;
5. 复旦大学附属中山医院放射诊断科, 上海200032

[摘要] 肺癌是全球范围内导致癌症死亡的首要原因, 由于早期症状隐匿, 确诊时多已进展。低剂量或标准剂量计算机断层成像 (computed tomography, CT) 筛查虽提高了早期检出率, 但电离辐射暴露问题促使磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 作为无辐射成像手段受到关注。新型MRI序列在肺结节筛查中展现出优异的抗伪影、高分辨率与小结节识别能力。然而, 这些序列在临床推广过程中仍面临标准化参数缺乏、设备依赖高、阅片经验不足等落地难点, 限制了其真实世界应用。本文进一步聚焦于此类序列在肺结节早期筛查与定性诊断中的转化瓶颈, 尝试构建“性能—适应性—解读”三位一体的评估框架。同时, 文章还探讨MRI功能成像与人工智能 (artificial intelligence, AI) 诊断模型结合的可能性, 指出当前AI模型在MRI数据处理上面临训练数据匮乏、序列异构性与特征迁移障碍等关键问题。综上, 本文系统分析MRI在肺结节筛查与诊断中的技术进展, 特别强调新序列落地难题及AI分析框架缺口, 旨在为无辐射肺癌筛查路径提供有针对性的研究思路与实践启示。

[关键词] 肺结节; 磁共振成像; 磁共振序列; 影像组学; 精准医学

中图分类号: R734.2; R445.2 文献标志码: A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2026.01.013

Development and prospects of MRI in pulmonary nodule evaluation HU Hao^{1,2}, WANG Yubo^{1,2}, HE Zhengying³, DING Zhiyong⁴, YE Xiaodan⁵, YANG Bin^{1,2} (1. Department of Medical Imaging, Kunming Medical University Affiliated Calmette Hospital, Kunming 650051, Yunnan Province, China; 2. Department of Radiological Imaging, Graduate School of Kunming Medical University, Kunming 650500, Yunnan Province, China; 3. Department of Medical Imaging, Diqing Tibetan Autonomous Prefecture People's Hospital, Diqing Tibetan Autonomous Prefecture 674400, Yunnan Province, China; 4. Department of Medical Imaging, Maternal and Child Care Hospital of Qujing City, Qujing 655000, Yunnan Province, China; 5. Department of Radiology, Zhongshan Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200032, China)

Correspondence to: YANG Bin E-mail: yangbinapple@163.com

[Abstract] Lung cancer remains the leading cause of cancer-related mortality worldwide, and its insidious early symptoms often result in diagnosis at an advanced stage. Although low-dose or standard-dose computed tomography (CT) screening has improved early detection rates, concerns regarding ionizing radiation exposure have increased interest in

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82160348); 云南省重大专项计划 (202302AA310018-D-8); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项 (XDYC-QNRC-2022-0608); 2024年度云南省医学学科带头人培养对象 (D-202405); 2023年度昆明市卫生科技人才培养项目 (医学技术中心) [2023-SW(技术)-13]。

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: 胡皓, 王宇博, 和正英, 等. 肺结节MRI发展历程与展望[J]. 肿瘤影像学, 2026, 35(1): 103-110.

Funding: National Natural Science Foundation of China (82160348); Yunnan Province Major Special Plan (202302AA310018-D-8); Yunnan Province's "Xingdian Talent Support Program" Youth Talent Project (XDYC-QNRC-2022-0608); 2024 Yunnan Province Medical Discipline Leader Training Program (D-202405); 2023 Kunming Health Science and Technology Talent Training Project (Medical Technology Center) [2023-SW(Technology)-13].

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: not required.

Informed consent: not required.

Cite this article: HU H, WANG Y B, HE Z Y, et al. Development and prospects of MRI in pulmonary nodule evaluation [J]. Oncoradiology, 2026, 35(1): 103-110.

magnetic resonance imaging (MRI) as a radiation-free alternative. Recent advances in novel MRI sequences have demonstrated promising performance in lung nodule screening, offering reduced susceptibility to artifacts, high spatial resolution, and improved detection of small nodules. However, their clinical implementation remains challenging due to the lack of standardized imaging parameters, strong equipment dependence, and limited reader experience, which restrict their real-world applicability. This review focused on the translational bottlenecks of these novel sequences in early lung nodule screening and qualitative diagnosis, and proposed an integrated evaluation framework encompassing performance, adaptability, and interpretability. Furthermore, the potential integration of MRI functional imaging with artificial intelligence (AI)-based diagnostic models is discussed, highlighting current challenges such as limited training datasets, sequence heterogeneity, and barriers to feature transferability. Overall, this review systematically summarized the technological advances of MRI in lung nodule screening and diagnosis, emphasizing the implementation challenges of emerging sequences and gaps in AI analytical frameworks, with the aim of providing targeted research directions and practical insights for radiation-free lung cancer screening strategies. [Key words] Pulmonary nodule; Magnetic resonance imaging; Magnetic resonance sequence; Radiomics; Precision medicine

肺癌是导致癌症死亡的首要原因, 其发病率占有所有癌症新发患者 12.4%, 死亡率高达 18.7%, 由于早期症状隐匿, 确诊时多已进展, 治疗选择受限^[1-2]。2023 年的研究^[3]显示, 男性和女性的肺癌死亡率近 5 年内年均分别下降 5.0% 和 4.3%, 一定程度上得益于通过影像学检查手段针对高危人群开展肺结节的筛查、随访与评估。磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 凭借无电离辐射、安全性高的特点, 尤其适用于需频繁随访的高危人群, 成为某些特定患者群体计算机断层成像 (computed tomography, CT) 检查的潜在替代或补充手段^[4-5]。一项关于 MRI 对肺结节诊断性能的 meta 分析^[6]表明, 与低剂量 CT (low-dose CT, LDCT) 相比, MRI 检测高风险结节 (直径 $\geq 8\sim 10$ mm) 的灵敏度具有较好的一致性。MRI 在检测直径 ≥ 4 mm 的肺结节时优于 LDCT, 灵敏度可达 87.7%。尽管 MRI 在肺结节评估中显示出重要的潜力^[7-9], 其临床推广依然面临诸多挑战, 包括成像标准不一、序列参数优化尚无共识及 AI 算法普适性不足等问题。本文针对不同 MRI 序列在肺结节筛查与诊断中的性能进行“性能—适应性—解读”横向比较, 同时分析 AI 在不同应用场景下的有效性与局限性。

1 从筛查起步: 新一代 MRI 序列在肺结节早期识别中的潜能

Star-VIBE 是一种可在自由呼吸状态下仍保持高质量图像的 MRI 序列, 由常规 3D 快速梯度回波 T1 加权成像 (T1-weighted imaging, T1WI) 与径向 K 空间采样相结合, 采样方式呈“星状”

轨迹, 具有强大的抗运动伪影能力。Yang^[10]等从 68 例肺结节或肿块患者中提取了 232 个肺部病变进行研究, T1WI Star-VIBE 对肺部影像报告和数据库系统 (Lung Imaging Reporting and Data System, Lung-RADS) 评分为 4B 类, 即对于 ≥ 15 mm、恶性风险 $\geq 15\%$ 的肺结节识别能力明显优于传统 T1-VIBE 序列, 识别直径 ≥ 15 mm 的肺结节的灵敏度、特异度分别为 79.8% 与 88.3%。Bruckmann 等^[11]进一步指出, 在肺门区及中心型结节的检出中, Star-VIBE 对心动与呼吸运动所致伪影表现出更强的耐受性, 可明显提高病灶识别率。上述研究虽初步验证 Star-VIBE 在肺结节诊断中的临床价值, 但缺乏高质量循证医学证据支持。此外, 序列参数设置、采集策略在不同设备与中心之间缺乏标准化, 限制了 Star-VIBE 序列的广泛推广与通用性。因此, 未来有望围绕 Star-VIBE 在特定结节类型中的性能差异及参数标准化展开研究, 并通过大规模、多中心的系统性研究来验证 Star-VIBE 成为肺癌筛查中的通用序列的潜力。

超短回波时间 (ultrashort echo time, UTE) 通过使用极短的 TE (最短可至 0.032 ms), 在短 T2 成分信号衰减前实现捕获, 从而为肺部小结节的筛查实现可能性突破。Renz 等^[12]首次在儿童肺部肿瘤患者中比较 UTE、T1WI 及 CT, 发现 UTE 序列在检测直径 ≤ 4 mm 的小结节方面显著优于传统 T1WI, 并与 CT 保持良好一致性。Ohno 等^[13]进一步指出, UTE 序列在肺 CT 筛查中的结节检测、测量及 Lung-RADS 分类潜力可媲美

CT。同时发现呼吸状态差异是UTE-MRI与CT在结节类型评估方面存在差异的首要原因，提示需优化采集策略与标准化流程。更值得关注的是，Sanchez等^[14]的研究发现，UTE序列在检测所有结节及亚实性结节方面的表现均优于VIBE。UTE对直径>4 mm的结节检出率为90.2%，而VIBE为78.4%；在直径>4 mm的亚实性结节中，UTE的检出率达85.4%，明显高于VIBE的63.4%。Wang等^[15]的研究不仅证实了这一观点，还发现UTE-MRI在检测混杂信号结节（出血、坏死、黏液变性和纤维化）方面具备潜在优势。最新研究^[16]发现，螺旋UTE序列在检测磨玻璃结节、显示血管及气道精细化结构方面显著优于径向VIBE序列，尤其在直径<6 mm的小结节检测上具有明显优势，检出率达87.80%。未来研究应系统评估UTE基于AI在肺结节软组织成分定量分析中的可行性，并探索其在结节风险预测中的集成潜力。UTE-MRI可作为软组织主导型肺结节的高敏检测与风险建模平台，弥补CT在软组织成分表征方面的不足。

零回波时间（zero echo time, ZTE）是一种基于3D平板激发和中心外向径向采集方式的先进MRI技术。ZTE提供了灵活的多视图，可在不同方向和层厚切面进行后处理，显著提升肺实质区域的图像信噪比，为肺结节的可视化评估打开了新路径。Liu等^[17]的研究证实ZTE-MRI在肺部结构及病灶成像方面与CT具有良好的一致性，尤其在结节直径、体积测量等方面显示出跨模态的一致性。此外，ZTE-MRI能较好地描绘结节与胸膜的关系，有望在检测胸膜侵犯（如Pancoast肿瘤）中发挥重要作用。近年来，ZTE在运动控制技术上也取得了突破。Chang等^[18]将深吸气屏气与ZTE序列结合，基于呼吸波纹管的内置信号大幅压缩扫描时间（90 s vs 325 s），同时显著减少82%的呼吸运动伪影。该方法提示，ZTE技术在肺底、靠近膈肌等“CT难扫区”中具备独特优势。更具启发意义的是，Zou等^[19]的研究证实了脂肪抑制的T2加权成像（T2-weighted imaging with fat saturation, T2WI-FS）与ZTE在纯磨玻璃结节中具有显著的互补优势。ZTE在肺

实质和血管中的信噪比显著优于T2WI-FS，而T2WI-FS在检测结节时的信噪比优于ZTE。上述研究提示了一种新的临床成像策略：通过T2WI-FS快速筛查病灶，ZTE进一步评估病灶与血管/胸膜关系及潜在侵袭性，从而构建双通道、无辐射的成像路径。然而，在多序列联合中，ZTE的独立增益是否足以支撑成本/时间比优化还有待商榷，需要更多的大样本、多中心研究论证，为无辐射路径下的肺癌早筛及随访管理搭建新框架。

2 定性分析的主力：常规MRI在肺结节良恶性判断中的价值

磁共振弥散加权成像（diffusion-weighted imaging, DWI）是一种反映组织内水分子布朗运动状态的成像技术，可敏感捕捉肿瘤微观结构变化，在无对比剂条件下提供功能性信息。其核心理量指标为表观弥散系数（apparent diffusion coefficient, ADC），可间接反映组织细胞密度、细胞外间隙与膜通透性等因素。既往研究^[20]已表明，恶性肿瘤细胞增殖增加和细胞外空间减少限制了水分子的弥散，表现为DWI图像高信号、ADC图像低信号。病变-脊髓信号强度比（lesion spinal cord intensity ratio, LSR）是DWI的另一个重要参数。LSR基于病灶与脊髓的信号强度比值，间接体现了组织的弥散与T2效应，在恶性病变中呈现较高值。Guan等^[21]的研究发现，ADC和LSR在鉴别良恶性孤立性肺结节（solitary pulmonary nodule, SPN）方面表现出高度一致性。Koo等^[22]首次提出联合DWI、T1/T2序列显著提高了结节恶性判断的准确度，明确指出ADC值 $<1.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ 为恶性结节的重要预测阈值。Usuda等^[23]更指出，DWI联合T2WI在良恶性结节识别中优于正电子发射断层成像（positron emission tomography, PET）/CT，进一步强调DWI可作为无辐射影像方案中最具潜力的替代路径之一。值得关注的是，近年来DWI与影像组学建模融合的研究初具规模。Zhou等^[24]首次运用DWI和ADC图像的稳定性特征，开发了基于影像组学、临床信息和ADC值列线图的联合列线图模型，联合列线图模型的灵敏度、特异度

及准确度分别是0.912、0.78和0.885, 优于单独的ADC模型和临床模型。上述研究表明, DWI值不仅是孤立参数, 更可嵌入多维模型中充当肺癌非增强生物标志物的功能节点, 可用于小结节的恶性风险量化、异质性评估与个体化随访管理。未来若能实现DWI多中心参数标准化, 将有助于推动其在MRI多参数联合成像应用于肺结节定性诊断中的临床转化。

动态对比增强MRI (dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI) 是一种基于血管通透性和组织灌注特征评估病变性质的功能性MRI序列。Kumar等^[25]的研究发现, 在DCE-MRI所有参数中, 体积转运常数 (volume transfer constant, K^{trans}) 在预测肺部病变的恶性程度方面表现出最高的诊断准确度, 准确度达74.2%。当 K^{trans} 的临界值设定为 0.251 min^{-1} 时, 其特异度可高达100%。Feng等^[26]研究发现, 恶性结节组的 K^{trans} 和回流常数 (efflux rate constant, K_{ep}) 均高于良性组。 K^{trans} 、 K_{ep} 诊断良恶性结节的特异度、灵敏度分别为90.6%和80%, 胡俊蛟等^[27]的研究也证明了这一点。Fang等^[28]进一步认为与良性结节相比, 恶性结节内除了 K^{trans} 、 K_{ep} 以外, 信号强度-时间曲线初始面积 (initial area under the gadolinium curve, IAUGC) 也显著增加, 联合 K^{trans} 、 K_{ep} 和IAUGC对肺部恶性结节诊断性能最佳 (AUC=0.93)。在Koo等^[22]的研究中, ADC联合 K^{trans} 、 K_{ep} 、到达时间 (arrival time, AT)、峰值增强强度 (peak enhancement intensity, PEI) 等参数能显著提高预测恶性结节诊断性能 ($P=0.012$)。原因可能是恶性肿瘤通常伴随异常的新生血管网络与高通透性, 表现为更快的AT、更高的PEI以及更快的冲洗率。最新研究^[29]表明, 恶性结节形成的新生微血管多以结构不成熟的幼稚血管为主, CD31微血管密度 (CD31-microvessel density, CD31-MVD) 及血管内皮生长因子 (vascular endothelial growth factor, VEGF) 表达呈强阳性。Fu等^[30]发现, K^{trans} 、 K_{ep} 及 V_e 值与CD31-MVD、VEGF表达水平呈密切相关。基于免疫组织化学CD31-MVD、VEGF强阳性表达的 K^{trans} 、 V_e 值

在区分肺结节定性诊断中具有较高的诊断效能, 灵敏度和特异度分别是0.813、0.759。总之, DCE-MRI中的 K^{trans} 、 V_e 等参数可作为无创血管生成标志物, 结合DWI、免疫组织化学等生物信息构建多参数MRI评分系统, 为小结节的早期生物学风险分层提供全新工具路径。考虑到当前研究大多受样本量有限、良恶性比例不均、中心单一等限制, 未来应加强多中心协作研究, 以提升DCE-MRI在临床路径中作为CT补充方案的可行性和可信度。

3 技术革新之路: MRI前沿手段助力肺结节精准分型

纵向弛豫时间定量成像 (longitudinal relaxation time mapping, T1-mapping) 是一种能够逐像素定量精准测量组织T1弛豫时间的MRI技术, 具有高度重复性与量化能力。其成像原理基于不同组织对纵向磁化恢复速度的差异, 因此对组织含水量、细胞密度及间质成分的微观变化高度敏感。对于肺部病变来说, 由于恶性结节通常伴随更高的细胞密度、更紧密的组织结构与异常的间质重建, 因此表现出特征性的T1值下降。Yang等^[31]发现恶性肿瘤或结节的固有T1值明显低于良性结节, 对于<3 cm的病变, T1-mapping与CT获得的病变直径测量值高度一致 (ICC为0.823, 95% CI 0.787~0.956), 提示T1-mapping可作为局灶性肺部病变随访的新方法。Yan等^[32]基于T1-mapping图像建立了首个用于区分良恶性肺结节的影像组学诊断模型。研究中支持向量机 (support vector machine, SVM) 和逻辑回归 (logistic regression, LR) 分类器均表现出良好的诊断性能, AUC均为0.82, 总体准确度达80%。因此, 未来研究应聚焦于T1值与肿瘤微环境标志物之间的关联性探索, 进一步确立其作为功能性预测指标的生物学基础。建立纵向随访数据库, 并通过多中心研究扩展T1-mapping在不同人群与不同亚型结节中的表现差异, 逐步构建标准化T1阈值体系, 为肺部MRI的临床路径提供可量化的决策依据。

氨基质子转移加权成像 (amide proton transfer weighted imaging, APTw) 是一种基于化学交换饱

和转移的定量MRI序列，它利用质子交换技术无创检测内源性移动蛋白或多肽浓度的改变。其核心参数为磁化转移非对称性值（magnetization transfer ratio asymmetry, MTRasym），化学位移（ δ ）是MRI中用于描述共振频率相对偏移的无量纲参数，使用相对于四甲基硅烷的百万分率（ppm）表示，通常以3.5 ppm化学位移处作为定量标志。在肺部影像学应用方面，APT_w代表了向分子水平功能影像转化的重要路径。Meng等^[33]的研究发现，恶性结节组患者的MTRasym（3.5 ppm）显著高于良性结节组，基于APT_w预测模型表现出最佳的诊断效能（AUC为0.976，灵敏度为94.64%；特异度为92.86%）。原因可能是恶性结节患者的细胞增殖往往更为活跃，坏死和出血成分也更多。Fang等^[34]的研究发现，恶性结节组的MTRasym和最大标准摄取值（maximum standard uptake value, SUV_{max}）均显著高于良性组，APT_w、体素内不相干运动（intravoxel incoherent motion, IVIM）、PET 3种方法联合应用（AUC为0.964）对良、恶性结节的诊断效能均高于单一方法。此外，研究还验证了APT_w区分肺癌亚型的能力优于单独使用PET（AUC为0.934）。APT_w有望成为肺部病灶蛋白代谢表型的影像学标志物，具有较高的组织学异质性灵敏度。能在肿瘤形态学改变之前识别蛋白表达活跃区域，尤其是识别肺腺癌等亚型中蛋白质合成活跃区，辅助确定分子分型。

IVIM是一种无需对比剂即可区分组织内微灌注与水分子弥散过程的MRI技术。通过多 b 值的DWI数据拟合，可获得的主要参数包括弥散系数（tissue diffusivity, D ）、伪弥散系数（pseudo-diffusivity, D^* ）及灌注分数（perfusion fraction, f ）。一项纳入16项研究、涉及714例恶性病变和355例良性病变的meta分析^[35]表明，恶性肺部病变的ADC、 D 和 f 值显著低于良性病变。其中， D 值的诊断性能最佳（灵敏度为0.90，特异度为0.71，AUC为0.91）。原因可能是 D 值与ADC类似，但排除了灌注影响，更专注于“真实弥散”，与细胞密度具有很大的相关性，在恶性病变中显著降低。Gao等^[36]研究中 D 值的灵敏度、特异度分别为90.57%和89.47%，但在部分恶性结节

中， f 值出现了“反常性升高”，可能是恶性结节中新生但不成熟、功能异常的血管网络所致的高灌注表征^[37]。IVIM参数中的 D 值可作为反映肺结节细胞密度与间质结构异质性的敏感指标，而 f 值与 D^* 值的变化可能揭示结节的新生血管特征或功能性灌注失调现象。这一观点启发我们可从微结构维度、微血管灌注维度两个维度理解IVIM在肺结节诊断中的价值，未来可构建多参数联合模型，以提高诊断性能与泛化能力。

弥散峰度成像（diffusion kurtosis imaging, DKI）是传统DWI的延伸技术，能更敏感地反映组织微结构的复杂度与异质性。DKI主要参数包括弥散峰度（apparent diffusional kurtosis, K_{app} ）、峰度校正弥散系数（kurtosis-corrected diffusion coefficient, D_{app} ），分别代表水分子弥散偏离理想高斯状态的程度以及校正后的真实弥散能力。肺癌的组织结构复杂、异质性强，且肿瘤组织中存在大量低弥散区域，导致了其 K_{app} 值显著升高，而 D_{app} 值低于肺部良性病变。Li等^[38]的研究发现，与肺部炎性病变相比，肺癌患者 K_{app} （平均值、中位数、标准差、峰度）均升高（ $P<0.05$ ），提示其能有效捕捉肿瘤组织的非均质弥散特性。Xiang等^[39]进一步验证，肺恶性孤立性结节的 D_{app} 值直方图、 K_{app} 值直方图参数则显著高于良性结节（ $P<0.05$ ）。尤其是在 D_{app} 值、 K_{app} 值联合IVIM的IVIM参数（ D 值）后，诊断效能达到最优（AUC为0.967；灵敏度为90.0%；特异度为94.0%）。总之，DKI能否作为一种揭示肺结节微结构异质性的无创工具，助力于识别高异质性恶性结节、探索病变演化路径。在未来需纳入多中心对比研究，整合DKI、ADC及纹理特征参数，从形态学与统计分布维度构建肺结节异质性定量特征图谱来验证。

4 人工智能赋能影像：影像组学与深度学习提升诊断准确度

影像组学是从医学图像中提取高通量特征，通过自动或半自动分析方法，将影像数据转化为高分辨率、可挖掘的数据空间。Yang等^[40]基于多模态MRI提取影像组学特征，比较了极端梯度增强（extreme gradient boosting, XGBoost）、

LR、SVM、朴素贝叶斯 (Naïve Bayes, NB) 及随机森林 (random forest, RF) 5 个机器学习分类器。其中, XGBoost 分类器对肺结节良恶性诊断预测效果最佳, 在训练集、验证集和测试集上的 AUC 分别为 0.901、0.906 和 0.851。随后, Yang 等^[41] 构建并验证了用于鉴别良恶性肺结节的影像组学列线图, 列线图在训练集 (AUC=0.82) 和测试集 (AUC=0.71) 中均表现出良好的鉴别能力, 且列线图模型在预测性能上显著优于单一定量参数。在此基础上, 深度学习的高级分析能够自动学习潜在的影像学特征表示, 挖掘传统定量参数难以识别的复杂空间模式, 从而提升肺结节良恶性鉴别的准确性与稳定性。同时, 自动化图像处理技术的应用进一步提高了数据处理效率, 并有助于优化时间与空间分辨率^[42-44]。Zhang 等^[45] 使用基于深度学习整合影像组学特征、临床信息建立组合模型。多模态组合模型在区分良性结节或肺癌优于单一模型 (AUC 为 0.84; 灵敏度为 0.85; 特异度为 0.84)。Bae 等^[46] 的研究发现, 深度学习算法通过图像信噪比使其在次级结节的检测中提高了诊断置信度及诊断性能。Mairhörmann 等^[47] 使用卷积神经网络用于肺部分割, 模型在 MRI 肺部疾病分割中具有高性能

(AUC=0.92), 促使影像组学模型走向深度融合、强解释的智能诊断体系, 结合深度特征提取, 实现影像组学从“特征堆叠”向“知识表征”的跃迁。

5 聚焦未来趋势: 肺结节 MRI 研究的挑战与展望

总之, 多模态 MRI 在肺结节良恶性鉴别中展现出显著的潜力, 尤其在组织异质性评估、微观结构表征及无创功能分析方面具备优势 (表1), 但其临床转化仍需结合实际场景进行合理分层推荐。对于早期筛查和高危人群初筛, T1-mapping 与 DWI 因成像快、重复性好、患者耐受性高, 具备较强的推广基础; 随访阶段, T1-mapping 联合 DCE-MRI 有助于动态监测病灶演变; 在定性诊断中, 整合 IVIM、DKI 与 APTw 等功能参数可增强对组织和微循环的综合识别能力; Star-VIBE 可在自由呼吸下稳定成像, 适合难以屏气患者; UTE 和 ZTE 技术在肺部早期病灶显示中具有补充价值。当前仍面临设备成本高、技术门槛高及缺乏标准化流程等瓶颈。未来需开展多中心、标准化的大样本研究, 明确技术适应性与经济性, 优化流程, 提高患者可接受度, 从而推动多模态 MRI 在肺结节精准诊断中的广泛应用。

表 1 肺结节 MRI 序列及诊断性能比较

Tab.1 Comparison of MRI sequences and diagnostic performance for pulmonary nodules

主要研究者	MRI 序列	主要核心参数	最佳 AUC	适应人群	主要优势	局限性
Guan 等 ^[21] , Koo 等 ^[22] , Usuda 等 ^[23]	DWI	ADC、LSR	0.885	鉴别孤立性肺良恶性结节患者	无需对比剂; ADC 值与细胞密度负相关; 构建个体化预测模型	单中心、样本量有限, ADC 受扫描参数影响大; 参数标准化缺乏; LSR 敏感但非特异
Kumar 等 ^[25] , Feng 等 ^[26] , Fu 等 ^[30]	DCE-MRI	K^{trans} 、 K_{ep} 、 V_e 、IAUGC、PEI、AT 等	0.930	小结节高风险患者	K^{trans} 等参数与 CD31-MVD/VEGF 表达相关, 可作为非侵入血管生成生物标志物	依赖对比剂, 扫描时间长; 研究多为单中心、样本量有限
Yang 等 ^[31] , Yan 等 ^[32]	T1-mapping	固有 T1 值	0.820	≤3 cm 肺结节患者	高重复性、量化精准、适用于结节随访; 与 CT 测量一致	缺乏标准阈值; 需要多中心验证
Meng 等 ^[33] , Fang 等 ^[34]	APTw	MTRasym (3.5 ppm)	0.976	出血、坏死肺结节患者	可识别蛋白代谢活动; 灵敏度强; 可联合 PET、IVIM 增强诊断	样本量小, 参数受磁场影响大; 易受噪声干扰
Gao 等 ^[36]	IVIM	D 、 D^* 、 f (多 b 值 DWI 拟合)	0.910	具有异质性的肺结节患者	可无对比剂评估微结构和灌注; D 值可准确反映细胞密度	样本量小, f 值可能“反常升高”; 解释需结合其他参数
Li 等 ^[38] , Xiang 等 ^[39]	DKI	K_{app} 、 D_{app}	0.967	肺癌及良性病变患者	反映非高斯扩散与异质性; 与 IVIM 联合提升诊断效能	后处理复杂; 需高质量图像; 泛化能力待验证

第一作者:

胡皓 (ORCID: 0009-0009-1807-9304), 硕士研究生。

通信作者:

杨斌 (ORCID: 0000-0001-5518-7325), 博士, 主任医师, 医学影像中心科主任, E-mail: yangbinapple@163.com。

作者贡献声明:

胡皓: 资料收集与文章撰写; 王宇博: 文献调研; 和正英、丁志勇、叶晓丹: 参考文献校对及英文翻译; 杨斌: 指导论文修改, 审阅手稿, 选题。

[参考文献]

- [1] World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services [EB/OL]. (2024-02-01) [2025-04-30]. <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services>.
- [2] ZHOU J L, XU Y, LIU J M, et al. Global burden of lung cancer in 2022 and projections to 2050: incidence and mortality estimates from GLOBOCAN [J]. *Cancer Epidemiol*, 2024, 93: 102693.
- [3] SIEGEL R L, MILLER K D, WAGLE N S, et al. Cancer statistics, 2023 [J]. *CA A Cancer J Clin*, 2023, 73(1): 17-48.
- [4] BHAMANI A, CREAMER A, VERGHESE P, et al. Low-dose CT for lung cancer screening in a high-risk population (SUMMIT): a prospective, longitudinal cohort study [J]. *Lancet Oncol*, 2025, 26(5): 609-619.
- [5] FUSS C. Low-dose CT of the chest: Is high-risk population screening for both lung cancer and cardiovascular disease possible? [J]. *Radiology*, 2025, 314(2): e250215.
- [6] CAVION C C, ALTMAYER S, FORTE G C, et al. Diagnostic performance of MRI for the detection of pulmonary nodules: a systematic review and meta-analysis [J]. *Radiol Cardiothorac Imaging*, 2024, 6(2): e230241.
- [7] FENG H, SHI G F, LIU H, et al. The application and value of 3 T magnetic resonance imaging in the display of pulmonary nodules [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 844514.
- [8] OHNO Y, OZAWA Y, NAGATA H, et al. Lung magnetic resonance imaging: technical advancements and clinical applications [J]. *Invest Radiol*, 2024, 59(1): 38-52.
- [9] LISZEWSKI M C, CIET P, WINANT A J, et al. Magnetic resonance imaging of pediatric lungs and airways: new paradigm for practical daily clinical use [J]. *J Thorac Imaging*, 2024, 39(1): 57-66.
- [10] YANG S Y, SHAN F, SHI Y X, et al. Sensitivity and specificity of magnetic resonance imaging in routine diagnosis of pulmonary lesions: a comparison with computed tomography [J]. *J Thorac Dis*, 2022, 14(10): 3762-3772.
- [11] BRUCKMANN N M, KIRCHNER J, MORAWITZ J, et al. Free-breathing 3D Stack of Stars GRE (StarVIBE) sequence for detecting pulmonary nodules in ¹⁸F-FDG PET/MRI [J]. *EJNMMI Phys*, 2022, 9(1): 11.
- [12] RENZ D M, HERRMANN K H, KRAEMER M, et al. Ultrashort echo time MRI of the lung in children and adolescents: comparison with non-enhanced computed tomography and standard post-contrast T1w MRI sequences [J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(3): 1833-1842.
- [13] OHNO Y, TAKENAKA D, YOSHIKAWA T, et al. Efficacy of ultrashort echo time pulmonary MRI for lung nodule detection and lung-RADS classification [J]. *Radiology*, 2022, 302(3): 697-706.
- [14] SANCHEZ F, TYRRELL P N, CHEUNG P, et al. Detection of solid and subsolid pulmonary nodules with lung MRI: performance of UTE, T1 gradient-echo, and single-shot T2 fast spin echo [J]. *Cancer Imaging*, 2023, 23(1): 17.
- [15] WANG F N, LIN X, LIN C, et al. Ability of three-dimensional 3-Tesla ultrashort echo time magnetic resonance imaging to display the morphological characteristics of pulmonary nodules: a sensitivity analysis [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(3): 1792-1801.
- [16] JIANG Y H, PU D D, ZHANG X Y, et al. Comparison of diagnostic performance for pulmonary nodule detection between free-breathing spiral ultrashort echo time and free-breathing radial volumetric interpolated breath-hold examination [J]. *BMC Med Imaging*, 2025, 25(1): 15.
- [17] LIU Q Y, FENG Z C, LIU W V, et al. Assessment of solid pulmonary nodules or masses using zero echo time MR lung imaging: a prospective head-to-head comparison with CT [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 812014.
- [18] CHANG C Y, LEE T H, LIU R S, et al. Fractionated deep-inspiration breath-hold ZTE Compared with Free-breathing four-dimensional ZTE for detecting pulmonary nodules in oncological patients underwent PET/MRI [J]. *Sci Rep*, 2021, 11: 17636.
- [19] ZOU Q, WAN Q, LIU J Q, et al. Image quality and detection efficacy of zero echo time magnetic resonance imaging on Lung-RADS 2 pulmonary ground-glass nodules in comparison to thin-slice fat-saturated T2-weighted imaging [J]. *J Thorac Dis*, 2024, 16(8): 5167-5179.
- [20] DANG S, HAN D, DUAN H, et al. The value of T2-weighted MRI contrast ratio combined with DWI in evaluating the pathological grade of solid lung adenocarcinoma [J]. *Clin Radiol*, 2024, 79(4): 279-286.
- [21] GUAN H X, PAN Y Y, WANG Y J, et al. Comparison of various parameters of DWI in distinguishing solitary pulmonary nodules [J]. *Curr Med Sci*, 2018, 38(5): 920-924.
- [22] KOO C W, LU A M, TAKAHASHI E A, et al. Can MRI contribute to pulmonary nodule analysis? [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 49(7): e256-e264.
- [23] USUDA K, ISHIKAWA M, IWAI S, et al. Pulmonary nodule and mass: superiority of MRI of diffusion-weighted imaging and T2-weighted imaging to FDG-PET/CT [J]. *Cancers*, 2021, 13(20): 5166.
- [24] ZHOU J X, WEN Y, DING R L, et al. Radiomics signature based on robust features derived from diffusion data for differentiation between benign and malignant solitary pulmonary lesions [J].

- Cancer Imaging, 2024, 24(1): 14.
- [25] KUMAR N, SHARMA M, AGGARWAL N, et al. Role of various DW MRI and DCE MRI parameters as predictors of malignancy in solid pulmonary lesions[J]. *Can Assoc Radiol J*, 2021, 72(3): 525–532.
- [26] FENG H, SHI G F, LIU H, et al. Free-breathing radial volumetric interpolated breath-hold examination sequence and dynamic contrast-enhanced MRI combined with diffusion-weighted imaging for assessment of solitary pulmonary nodules [J]. *Magn Reson Imaging*, 2021, 75: 100–106.
- [27] 胡俊蛟, 刘梅桃, 赵伟, 等. T1WI star-VIBE增强联合 TWIST-VIBE 动态增强 MRI 对肺结节诊断的应用价值 [J]. *中南大学学报 (医学版)*, 2023, 48 (4): 581–593.
- HU J J, LIU M T, ZHAO W, et al. Value for combination of T1WI star-VIBE with TWIST-VIBE dynamic contrast-enhanced MRI in distinguishing lung nodules [J]. *J Cent South Univ (Med Sci)*, 2023, 48 (4): 581–593.
- [28] FANG W, FU W D, ZHOU W M, et al. Discrimination between benign and malignant lung lesions using volumetric quantitative dynamic contrast-enhanced MRI [J]. *Curr Med Imag Former Curr Med Imag Rev*, 2023, 20: e270723219206.
- [29] BAIS C, MUELLER B, BRADY M F, et al. Tumor microvessel density as a potential predictive marker for bevacizumab benefit: GOG-0218 biomarker analyses [J]. *J Natl Cancer Inst*, 2017, 109(11): dx066. Doi: 10.1093/jnci/djx066.
- [30] FU L, PAN X Y, DING H M, et al. The diagnostic value of vascular architecture in solid solitary pulmonary nodules quantified by dynamic contrast enhanced MRI [J]. *J Thorac Dis*, 2025, 17(1): 19–30.
- [31] YANG S Y, SHAN F, YAN Q Q, et al. A pilot study of native T1-mapping for focal pulmonary lesions in 3.0 T magnetic resonance imaging: size estimation and differential diagnosis [J]. *J Thorac Dis*, 2020, 12(5): 2517–2528.
- [32] YAN Q Q, YI Y Q, SHEN J, et al. Preliminary study of 3 T-MRI native T1-mapping radiomics in differential diagnosis of non-calcified solid pulmonary nodules/masses [J]. *Cancer Cell Int*, 2021, 21(1): 539.
- [33] MENG N, SONG C, SUN J, et al. Amide proton transfer-weighted imaging and stretch-exponential model DWI based ^{18}F -FDG PET/MRI for differentiation of benign and malignant solitary pulmonary lesions [J]. *Cancer Imaging*, 2024, 24(1): 33.
- [34] FANG T, MENG N, FENG P Y, et al. A comparative study of amide proton transfer weighted imaging and intravoxel incoherent motion MRI techniques versus ^{18}F -FDG PET to distinguish solitary pulmonary lesions and their subtypes [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 55(5): 1376–1390.
- [35] CHEN Y R, HAN Q J, HUANG Z W, et al. Value of IVIM in differential diagnoses between benign and malignant solitary lung nodules and masses: a meta-analysis [J]. *Front Surg*, 2022, 9: 817443.
- [36] GAO P, LIU Y Y, SHI C Z, et al. Performing IVIM-DWI using the multifunctional nanosystem for the evaluation of the antitumor microcirculation changes [J]. *MAGMA*, 2020, 33(4): 517–526.
- [37] SONG M H, YUE Y L, JIN Y F, et al. Intravoxel incoherent motion and ADC measurements for differentiating benign from malignant thyroid nodules: utilizing the most repeatable region of interest delineation at 3.0 T [J]. *Cancer Imaging*, 2020, 20(1): 9.
- [38] LI J X, WU B L, HUANG Z, et al. Whole-lesion histogram analysis of multiple diffusion metrics for differentiating lung cancer from inflammatory lesions [J]. *Front Oncol*, 2023, 12: 1082454.
- [39] XIANG L, YANG H, QIN Y, et al. Differential value of diffusion kurtosis imaging and intravoxel incoherent motion in benign and malignant solitary pulmonary lesions [J]. *Front Oncol*, 2023, 12: 1075072.
- [40] YANG B, GAO Y Q, LU J, et al. Quantitative analysis of chest MRI images for benign malignant diagnosis of pulmonary solid nodules [J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1212608.
- [41] YANG S Y, WANG Y D, SHI Y X, et al. Radiomics nomogram analysis of T2-fBLADE-TSE in pulmonary nodules evaluation [J]. *Magn Reson Imaging*, 2022, 85: 80–86.
- [42] MORALES M A, MANNING W J, NEZAFAT R. Present and future innovations in AI and cardiac MRI [J]. *Radiology*, 2024, 310(1): e231269.
- [43] JUNG M, RAGHU V K, REISERT M, et al. Deep learning-based body composition analysis from whole-body magnetic resonance imaging to predict all-cause mortality in a large western population [J]. *EBioMedicine*, 2024, 110: 105467.
- [44] MOON J W, YANG E, KIM J H, et al. Predicting non-small-cell lung cancer survival after curative surgery *via* deep learning of diffusion MRI [J]. *Diagnostics*, 2023, 13(15): 2555.
- [45] ZHANG X L, DONG X L, BIN SARIPAN M I, et al. Deep learning PET/CT-based radiomics integrates clinical data: a feasibility study to distinguish between tuberculosis nodules and lung cancer [J]. *Thorac Cancer*, 2023, 14(19): 1802–1811.
- [46] BAE K, LEE J, JUNG Y, et al. Deep learning reconstruction for zero echo time lung magnetic resonance imaging: impact on image quality and lesion detection [J]. *Clin Radiol*, 2024, 79 (11): e1296–e1303.
- [47] MAIRHÖRMANN B, CASTELBLANCO A, HÄFNER F, et al. Automated MRI lung segmentation and 3D morphologic features for quantification of neonatal lung disease [J]. *Radiol Artif Intell*, 2023, 5(6): e220239.

(收稿日期: 2025-08-14 修回日期: 2025-10-30)