



电子、语音版

·综述·

## 多模态成像技术在脑血管病中的应用与前景： 以 CT、MRI 为核心的综合诊疗体系

程斐然, 汤永红, 蒋小龙

南华大学附属南华医院, 湖南 衡阳 421200

**摘要:**多模态计算机断层成像(CT)与磁共振成像(MRI)技术是脑血管病诊疗的核心工具,整合结构、功能及代谢信息,为疾病诊治提供全方位支持。多模态CT含平扫CT、CT血管成像(CTA)及CT灌注成像(CTP),扫描快速、普及率高。平扫CT可快速检出急性颅内出血,CTA精准识别大血管闭塞与动脉瘤,辅助血栓切除术决策,CTP通过血流动力学参数区分梗死核心与缺血半暗带,指导溶栓治疗。多模态MRI具有高软组织对比度、无辐射优势,包括弥散加权成像(DWI)、液体衰减反转恢复(FLAIR)等。DWI数分钟内检测早期缺血,FLAIR定量分析界定溶栓时间窗,磁共振血管成像(MRA)可清晰显示微小血管病变。CT和MRI两者联合应用可实现信息互补,显著提升急性缺血性卒中诊断准确率,为侧支循环评估、手术规划及预后预测提供关键依据。结合影像组学与人工智能,可进一步优化诊疗效率。此外,新型纳米探针、便携式MRI等技术创新,以及与血清生物标志物的联合应用,为脑血管病精准医疗开辟新方向,有望突破现有诊疗局限,改善患者预后。

**关键词:**脑血管病;多模态计算机断层成像;多模态磁共振成像;临床应用

中图分类号:R743

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2026.02.012

### Application and prospects of multimodal imaging techniques in cerebrovascular diseases: a comprehensive diagnostic and treatment system centered on computed tomography and magnetic resonance imaging

CHENG Feiran, TANG Yonghong, JIANG Xiaolong

Nanhua Hospital Affiliated to University of South China, Hengyang, Hunan 421200, China

Corresponding author: TANG Yonghong, Email: tyh6246@163.com

**Abstract:** Multi-modal computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) techniques are core tools for the diagnosis and treatment of cerebrovascular diseases, integrating structural, functional, and metabolic information to provide comprehensive support for disease diagnosis and treatment. Multi-modal CT techniques include non-contrast CT, CT angiography (CTA), and CT perfusion imaging (CTP), showing the advantages of rapid scanning and high penetration rate. NCCT can quickly detect acute intracranial hemorrhage, CTA accurately identifies large vessel occlusions and aneurysms and assists in decision-making for thrombectomy, and CTP distinguishes the infarct core from ischemic penumbra through hemodynamic parameters and thus provides guidance for thrombolytic therapy. Multi-modal MRI techniques include diffusion-weighted imaging (DWI) and fluid-attenuated inversion recovery (FLAIR) and have the advantages of high soft tissue contrast and procedures without radiation. DWI can detect early ischemia within minutes, FLAIR helps to define thrombolytic time window through quantitative analyses, and magnetic resonance angiography can clearly display microvascular lesions. The combination of CT and MRI provides complementary information, thereby significantly improving the diagnostic accuracy of acute ischemic stroke and providing key evidence for collateral circulation

收稿日期:2025-11-11;修回日期:2026-01-30

作者简介:程斐然(2000—),硕士研究生在读。

通信作者:汤永红(1962—),硕士,主任医师,教授,主要从事脑血管病、神经退行性疾病和睡眠障碍的基础和临床研究。Email:tyh6246@163.com。

assessment, surgical planning, and prognosis prediction. The combination of radiomics and artificial intelligence can further optimize the efficiency of diagnosis and treatment. In addition, technological innovations, such as novel nanoprobes, portable MRI, and their combined application with serum biomarkers, open up new directions for precision medicine in cerebrovascular diseases, with the potential to break through the limitations of existing diagnosis and treatment and improve the prognosis of patients.

**Keywords:** cerebrovascular diseases; multi-modal computed tomography; multi-modal magnetic resonance imaging; clinical application

随着医学成像技术的飞速发展,计算机断层成像(computed tomography, CT)和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)多模态成像技术,已经成为诊治脑血管病的重要工具。这些技术不仅提高了诊断的准确性,还为临床决策提供了丰富的信息。脑血管病,包括脑卒中、脑动脉瘤、血管畸形等,是全球范围内导致死亡和残疾的主要原因之一。这些疾病的早期诊断和治疗至关重要。CT和MRI技术因各自的优势,在脑血管病的诊断中扮演着不可或缺的角色。CT提供了快速的解剖成像,特别适合于急性脑卒中的评估,而MRI则以高软组织对比度和功能成像能力,为脑血管病变的详细评估提供了可能。这些成像技术不断融合,形成了多模态成像技术,不仅增强了单一成像技术的诊断能力,还为脑血管病的个体化治疗提供了新的思路。本文梳理了多模态CT及MRI成像技术在脑血管病中早期诊断、指导治疗决策、评估治疗效果、预测疾病预后的重要作用以及新兴技术的应用。

## 1 多模态成像技术概述

在我国急性缺血性脑卒中(acute ischemic stroke, AIS)的发病率以及致残率高居首位,脑组织不可再生性导致永久性神经功能缺损<sup>[1]</sup>。多模态成像技术通过整合CT与MRI的多种细分技术,为脑血管病诊疗提供了结构、功能及代谢的全方位信息,已成为该领域的核心支撑技术。多模态影像的协同应用实现了CT与MRI成像技术优势互补:CT快速排除脑出血,并评估大血管状态;MRI精准识别早期缺血与代谢异常。研究证实,联合应用可使急性缺血性卒中诊断准确率提升至96.7%<sup>[2]</sup>。为侧支循环评估、手术规划及预后预测提供关键依据。

## 2 CT多模态影像及临床应用

多模态CT以“快速扫描、高普及率、急诊适配”为核心优势,整合平扫CT、CT血管成像(CT angiography, CTA)、CT灌注成像(CT perfusion imaging, CTP)等核心技术及多排螺旋CT、能谱CT等专项技术,形成覆盖脑血管病“快速筛查-精准评估-治疗指导-预后判断”的完整诊疗链,尤其适用于时间敏感型急诊场景及MRI禁忌症患者。

### 2.1 核心基础技术及临床价值

#### 2.1.1 平扫CT

平扫CT是急性脑血管病的一线筛查工具,其亚毫米

级扫描可以在1 s内检出颅内出血,灵敏度达100%,且通过艾伯塔卒中早期计算机断层成像评分(Alberta Stroke Program Early CT Score)可量化早期缺血改变<sup>[3]</sup>。ASPECTS评分通过10个固定解剖区域的CT平扫视觉评估,以“正常计分、缺血计0”的方式实现脑梗死范围的半定量判断,分值越低梗死范围越大,是AIS急诊的核心评估工具之一。

CTA凭借亚毫米级空间分辨率,能精准显示大血管闭塞(large vessel occlusion, LVO)部位及程度。研究显示,CTA对颅内动脉瘤的检出灵敏度达98.6%,而基于CTA的“点征”分析可预测脑出血扩大风险<sup>[4]</sup>。

CTP通过脑血流量(cerebral blood flow, CBF)、达峰时间等参数区分梗死核心与缺血半暗带。有研究证实,依据CTP指导的血管内治疗(endovascular treatment, EVT)可使患者90 d功能独立率提升19%<sup>[5]</sup>。

有研究进一步挖掘了平扫CT的潜在价值:通过提取CT影像组学特征(如能量值、灰度共生矩阵熵、长行程强调度)构建的预测模型,可有效预判AIS患者EVT后的出血转化风险,验证集曲线下面积(area under the curve, AUC)达0.797,特异度87.5%。该模型的核心优势在于,无需依赖复杂的CTP或CTA参数,仅通过常规平扫CT即可捕捉病灶密度异质性、像素分布规律等肉眼不可见的信息,而这些信息是传统影像评估(如ASPECTS、侧支循环评分)无法覆盖的。该研究同时证实,常规临床指标[如高血压、糖尿病、美国国立卫生研究院卒中量表(National Institutes of Health Stroke Scale, NIHSS)评分]与出血转化无显著关联,进一步凸显了影像组学在风险预测中的独特价值,为基层医院开展EVT术前风险筛查提供了可行工具<sup>[6]</sup>。

然而,平扫CT对AIS的敏感度较低(20%~87%),且对慢性出血或小病灶不敏感。

#### 2.1.2 CTA

CTA用于头颈部血管评估,可快速(辐射剂量约5 mSv)、高敏感度地检测颅内疾病,灵敏度达100%。CTA能识别颅内LVO和颈动脉狭窄,辅助血管内血栓切除术的决策。但需使用静脉对比剂,可能会受肾功能限制,尽管证据显示静脉对比剂与急性肾损伤无显著关联。CTA在出血性卒中中也用于检测动脉瘤(灵敏度高达95%)或

预测血肿扩大(“斑点征”)。有研究通过CTA评估皮质静脉引流模式,CTA量化前循环近端动脉闭塞患者的浅静脉和深静脉引流差异,建立卒中皮质静脉评分差异预后评估用来预测急性缺血性卒中患者预后,卒中皮质静脉评分差异预后评估(患侧与健侧浅静脉复合评分差值) $\geq 4$ 分时,可独立预测90 d不良结局,其价值优于传统动脉侧支评估<sup>[7]</sup>。

### 2.1.3 CTP

CTP通过动态追踪碘造影剂的首过过程,生成时间-密度曲线,基于tracer动力学模型计算脑血流动力学参数,反映脑组织灌注状态<sup>[8]</sup>。其核心原理是通过静脉注射碘造影剂后,对脑组织进行连续动态扫描,捕捉造影剂在脑血管内的流入、充盈、廓清全过程,利用计算机模型反推脑组织的血流灌注状态,量化反映组织缺血程度,并测量以下参数:①相对CBF(relative CBF, rCBF)反映单位时间内脑组织的血液供应,rCBF $< 30\%$ 提示该区域为缺血核心,脑组织已发生不可逆损伤;②相对脑血容量(relative cerebral blood volume, rCBV)反映脑组织内血管床容积,缺血核心区rCBV通常降低,缺血半暗带rCBV可正常或轻度降低;③最大残留功能时间是造影剂到达脑组织峰值浓度的时间,最大残留功能时间 $> 6$  s是界定缺血半暗带的关键阈值,提示该区域血流灌注延迟,存在可挽救潜力;④平均通过时间是造影剂从动脉流入到静脉流出的平均时间,缺血区域的平均通过时间显著延长,可辅助评估灌注异常范围。通过这些参数来评估缺血核心(不可逆损伤)和半暗带(风险组织)。

## 2.2 专项进阶技术及应用场景

### 2.2.1 多排螺旋CT的作用与差异

多排螺旋CT的探测器排数分为16排、64排、128排、256排,甚至更高。扫描速度快(如心脏成像只需亚秒级即可完成)、空间分辨率高,支持连续体积数据采集和三维重建。16排CT用于肺部、骨骼及头颈部的常规扫描;64排及以上CT用于全身血管成像、心脏冠状动脉造影及动态器官观察。

### 2.2.2 特殊类型CT技术

能谱CT(多能谱成像):利用不同能量的X射线,区分组织成分(如钙化、脂肪、碘浓度)。可抑制金属伪影、定量物质分析(如痛风尿酸结晶识别)。

3D旋转血管造影:高分辨率重建血管结构,用于术前评估血管解剖(如动脉瘤位置、动静脉畸形供血区),扫描参数为80 kV,造影剂24~28 mL,旋转角度 $\pm 120^\circ$ ,重建时间5 s。

VasoCT/DynaCT:优化小对比度差异显示,适合评估血管内装置(如支架、囊内装置),扫描时间20 s,减少金属伪影,清晰显示装置与血管的关系。

XperCT:非增强C臂容积成像,用于评估脑积水、脑

出血等,与3D旋转血管造影叠加可分析栓塞材料位置<sup>[9]</sup>。

## 2.3 技术协同与补充

多模态CT有其技术优势,检查时间短( $< 10$  min)、普及率高,尤其适用于危重患者及MRI禁忌证者。然而,也具有一定的局限性,辐射暴露和碘造影剂肾毒性仍是主要限制因素。

在AIS的检测中:①平扫CT能快速排除出血,并显示早期缺血征象(如灰白质分界模糊);②CTP通过CBF、CBV等参数区分缺血核心与半暗带,指导溶栓或取栓治疗;③CTA评估血管闭塞部位及侧支循环状态。

在出血性卒中的检测中:①在出血转化监测中,平扫CT的高敏感性可快速识别急性出血,但对微量出血或代谢变化的敏感性有限;②多期相CTA可动态观察对比剂外渗,提示血脑屏障破坏,辅助预测出血风险。

在动脉瘤与血管畸形检测中:CTA能清晰显示动脉瘤位置、大小、形态(灵敏度 $> 95\%$ )。

在动静脉畸形和动静脉瘘检测中:CTA可标注出血动脉和引流静脉。

在烟雾病诊断中:CTA可显示颅底异常烟雾状血管网及LVO;CTP可评估侧支循环代偿能力,指导血运重建手术。

三维重建技术(如分离融合不透明伪彩色容积重建、彩色可视化):多角度呈现病灶与周围组织的关系,辅助手术规划。

## 2.4 多模态CT的其他研究进展

临床研究进一步验证了多模态影像指导下的脑血管储备(cerebrovascular reserve, CVR)评估对治疗决策的关键作用。有研究通过前瞻性随机对照试验系统地比较了药物治疗、血管内介入及颅内外血管搭桥在不同CVR分层患者中的疗效差异。该研究采用CTP联合CO<sub>2</sub>激发试验定量计算CVR值,发现CVR $< 10\%$ 组患者接受血管重建术后24个月卒中复发率较单纯药物治疗组降低42%,且神经功能评分(NIHSS评分)改善显著<sup>[10]</sup>。这一结果提示,基于多模态影像的CVR分层可精准识别血流动力学代偿不足的亚组人群,为血管重建术的适应证选择提供了客观的影像学依据。

## 3 多模态MRI及临床应用

多模态MRI以无辐射、高软组织对比度为核心优势,整合结构、功能及代谢成像技术,精准捕捉脑血管病的病理生理变化,为早期诊断、治疗决策及预后评估提供多维依据。

### 3.1 核心结构与灌注成像技术

弥散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)在卒中发病后数分钟内即可检测到细胞毒性水肿,灵敏度达95%以上,是AIS确诊的基石<sup>[11]</sup>。表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)可量化水分扩散受限

程度,区分急性期与亚急性期病变。研究显示,DWI信号强度比(signal intensity ratio, SIR)与卒中时间窗呈弱相关,但对超早期病变的敏感性仍是最高。DWI能在缺血发生后30 min内显示病灶,其ADC值与梗死核心体积显著相关<sup>[12]</sup>。

液体衰减反转恢复(fluid-attenuated inversion recovery, FLAIR)序列通过DWI-FLAIR不匹配现象,可识别发病时间不明的醒后卒中患者。研究表明,该征象指导下的溶栓治疗安全有效<sup>[13]</sup>。

磁共振血管成像(magnetic resonance angiography, MRA)结合时间飞跃技术,可无创评估颅内小血管病变,与数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)的一致性达92.3%<sup>[14]</sup>。

灌注加权成像(perfusion-weighted imaging, PWI)与DWI的不匹配区域被视为“可挽救脑组织”。有研究显示,该指标指导治疗可使卒中患者良好预后率提高22%<sup>[15]</sup>。值得注意的是,针对前循环LVO亚型,Li等<sup>[16]</sup>通过多中心研究进一步证实,整合DWI提取的影像组学特征、ASPECTS评估的梗死位置(如豆状核、M6区域)及脑脆弱性指标(白质高信号、脑萎缩)构建的机器学习模型,可将90 d功能预后评估的AUC提升至0.86(外部验证集),显著优于单一灌注或血管成像模型,且通过SHAP分析明确了豆状核梗死负荷、白质高信号为核心预测因子,为个性化康复规划提供了可解释的影像学工具。

PWI通过注射对比剂或动脉自旋标记技术,测量CBF、CBV等参数,与DWI形成的DWI-PWI不匹配区,用于识别可挽救的缺血半暗带<sup>[17]</sup>,为EVT拓展适应证,尤其适用于无静脉溶栓选项的患者。有研究通过DWI-PWI不匹配确认存在可挽救组织,为EVT提供了明确,尤其在无静脉溶栓选项时,避免了因时间窗或临床评估误判而放弃治疗<sup>[18]</sup>。

定量磁共振成像(quantitative magnetic resonance imaging, QMRI)通过精准测量组织的物理化学参数(如弛豫时间、扩散系数、磁化率),摆脱了传统定性或半定量评估的主观性,实现了脑血管病病理生理改变的量化表征,其技术成熟度与临床认可度正在持续提升。

MRA中的时间飞跃法(TOF-MRA)可无创显示血流方向,增强MRA精准评估血管狭窄程度;定量磁共振血管造影(quantitative MRA, QMRA)测量的乙酰唑胺激发后血流变化与软脑膜侧支循环功能分级显著相关,为慢性颈内动脉或大脑中动脉狭窄/闭塞患者的血流动力学评估提供了无创、可推广的新工具<sup>[19]</sup>。QMRA可精准测量血管血流量、血流速度及血管横截面积,在颅内动脉粥样硬化性疾病(intracranial atherosclerotic disease, ICAD)患者中,QMRA检测的狭窄血管远端血流量与软脑膜侧支循环功能分级显著相关,可无创评估侧支循环代偿能

力。对于烟雾病患者,QMRA能动态监测血运重建术后的血管血流变化,评估手术疗效,其准确性与DSA相当,但无辐射、无创伤。

有研究进一步拓展了多模态MRI在脑小血管病(cerebral small vessel disease, CSVD)认知障碍诊断中的价值,通过整合T1加权(结构特征)、rs-fMRI(功能连接、低频振幅等)及DTI(部分各向异性分数、平均弥散系数)3种模态,利用AutoGluon平台构建的机器学习模型,实现CSVD患者轻度认知障碍与无认知障碍的精准分类,训练集AUC达0.926,验证集灵敏度为86.36%,特异度为76.92%。该研究显示,左颞上回、右楔叶的结构与功能异常是认知障碍的核心标志物,而多模态特征融合能全面捕捉CSVD的病理生理改变,其性能显著优于单一模态模型,为无需神经心理评估的早期认知障碍筛查提供了可行方案<sup>[20]</sup>。

### 3.2 功能与代谢成像技术

#### 3.2.1 FLAIR序列

FLAIR序列的主要作用是提高脑室周围及皮质病变的可见度,如多发性硬化斑块、新生儿脑损伤。传统FLAIR序列通过视觉评估病灶高信号判断发病时间,但受限于观察者间的一致性。最新研究采用信号强度比(FLAIR SIR)定量分析发现,SIR $\leq$ 1.18可预测4.5 h时间窗(灵敏度77%,特异度77%),较视觉分析显著提高准确性。为不明发病时间患者的溶栓决策提供了生物标志物<sup>[21]</sup>。同时,DWI-FLAIR不匹配是醒后卒中溶栓的关键依据。

#### 3.2.2 血氧水平依赖功能磁共振

血氧水平依赖功能磁共振成像(blood oxygen level-dependent functional magnetic resonance imaging, BOLD-fMRI)通过脱氧血红蛋白磁敏感性变化映射脑功能区,术前可定位运动、语言区,指导手术或放疗避让。有研究表明,BOLD-fMRI联合CO<sub>2</sub>刺激是一种无创、可广泛应用的定量测量脑血管反应性(即CVR)的方法。BOLD CVR与氧正电子发射断层显像(oxygen positron emission tomography, O-PET)的CBF灌注储备测量具有良好一致性,尤其在检测受影响半球、大脑中动脉区域的血流动力学衰竭及II期时表现优异。由于BOLD-CVR具有无创、可整合到常规临床成像等优点,有望用于前瞻性研究,评估慢性脑血管狭窄或闭塞患者的卒中相关风险<sup>[22]</sup>。

#### 3.2.3 磁共振波谱成像

磁共振波谱成像(magnetic resonance spectroscopic imaging, MRSI)检测N-乙酰天门冬氨酸(N-acetylaspartic acid, NAA)、胆碱(choline, Cho)、乳酸等代谢物,NAA降低提示神经元损伤,乳酸堆积反映无氧代谢状态,胆碱升高表明细胞膜增殖(肿瘤标志),可客观评估缺血后神经元损伤及能量衰竭程度,为病情严重程度判断提供代谢

层面依据。传统单体素MRS空间分辨率有限,而3D质子磁共振波谱成像(3D 1H-MRSI)实现了全脑代谢物的三维定量地图,空间分辨率达 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,可精准定位微小病灶的代谢异常。此外,MRS与DWI、PWI的融合分析,能将“结构-灌注-代谢”信息整合,例如在缺血半暗带区域,若同时存在PWI-DWI不匹配(灌注缺损>弥散缺损)及乳酸/NAA $<1.2$ ,提示该区域脑组织可挽救性更高,治疗获益更显著。未来,结合超短回波时间MRS技术,可进一步检测传统MRS难以捕捉的短T2代谢物(如琥珀酸、丙酮酸等),为缺血性卒中的能量代谢障碍研究提供更全面的视角。在ICH及蛛网膜下腔出血(subarachnoid hemorrhage, SAH)中,MRS可精准捕捉继发性脑损伤的代谢特征。ICH后,血肿周围区域会出现乳酸升高(血肿压迫导致的局部缺血)、 $\gamma$ -氨基丁酸降低(抑制性神经递质耗竭)及谷胱甘肽下降(氧化应激激活),这些指标的变化速度与血肿扩大风险、脑水肿程度呈正相关。SAH患者中,脑血管痉挛区域的Cho/NAA比值升高(血脑屏障破坏与细胞膜代谢异常),且升高幅度早于血管狭窄的影像学表现,可提前3~5 d预警迟发性脑缺血。SAH后MRS检测的肌酸共振峰分裂现象,与脑血管痉挛导致的脑灌注不足密切相关,为早期干预提供了新的代谢标志物。对于CSVD及ICAD患者,MRS可反映长期缺血导致的脑代谢重塑。CSVD患者的白质区域表现为NAA持续下降、肌醇升高(星形胶质细胞活化),其代谢异常范围与认知功能下降程度高度吻合,且较常规MRI更早发现亚临床损伤。在ICAD患者中,狭窄血管供血区域的乳酸基线水平可预测卒中复发风险,乳酸 $\geq 0.3\text{ mmol/L}$ 者1年复发率较乳酸正常者高3.2倍,为高危患者的强化治疗提供了客观依据。

#### 3.2.4 磁敏感加权成像

磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)对微量出血、铁沉积及含铁血黄素沉积高度敏感,能精准识别出血核心及周围继发损伤,为出血转化风险评估及病因判断提供关键信息,尤其适用于出血性卒中及缺血性卒中出血转化的监测。

### 3.3 专项技术与联合应用

#### 3.3.1 动态对比增强MRI

动态对比增强MRI结合Patlak药代动力学模型精准计算血脑屏障破坏程度,多模态影像(MRI、PET及CT)揭示高血糖通过MMP介导的BBB破坏和中性粒细胞浸润加剧SAH损伤<sup>[23]</sup>。

#### 3.3.2 多模态联合应用

约25%的AIS患者无法确定症状发作时间,导致错过静脉溶栓时间窗( $\leq 4.5\text{ h}$ )。

DWI-FLAIR不匹配:DWI阳性而FLAIR阴性提示发病 $<4.5\text{ h}$ ,指导静脉溶栓治疗。但主观性强,观察者一致

性低,仍需客观指标精准界定溶栓时间窗。FLAIR SIR定量分析(阈值 $\leq 1.18/4.5\text{ h}$ ;  $\leq 1.19/6\text{ h}$ )可作为未知发病时间卒中的客观生物标志物,显著优于传统视觉评估,尤其适用于早期FLAIR轻微高信号患者的溶栓决策,有望扩大治疗人群并改善预后<sup>[21]</sup>。

PWI:联合DWI可识别缺血半暗带,扩大EVT适应证。

动脉自旋标记:无创评估脑血流动力学,在慢性缺血性疾病中具有潜力。

PET/MRI:推动神经疾病从“形态诊断”向“精准分型+预后预测”转变,如神经肿瘤的个体化治疗规划、癫痫的早期干预时机选择<sup>[24]</sup>。

### 3.4 缺血性卒中的代谢与功能成像

傅里叶变换红外光谱术(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)与X射线荧光成像(X-ray luminescence tomography, XFI)的启示,脂质过氧化、蛋白质聚集等代谢标志物可通过先进MRI技术(如化学交换饱和转移成像)间接反映,为临床无创评估氧化应激提供新思路。铁化学形态分析结合XFI和FTIR,MRI未来或可通过多参数序列区分血红素铁与铁蛋白,揭示氧化损伤机制<sup>[25]</sup>。

### 3.5 临床适配场景

AIS:早期缺血病灶检出、溶栓时间窗界定、缺血半暗带识别及出血转化监测。

出血性卒中:微量出血检测、血肿扩大风险评估、血管畸形及动脉瘤辅助诊断。

慢性脑血管病:颅内小血管病变评估、侧支循环功能量化、血流动力学衰竭分期。

特殊病例:醒后卒中、不明发病时间卒中的精准诊疗,以及与CT技术协同完成复杂血管病变(如颈动脉网)的确诊。

## 4 多模态成像技术的临床应用

多模态CT通常包含平扫CT、CTA和CTP,可在5~10 min内快速完成扫描,对出血性卒中具有高度敏感性,并能通过ASPECTS评分评估梗死范围。Abdalkader等<sup>[26]</sup>的研究明确了CT与MRI技术的分层应用价值,在急诊场景中,平扫CT联合CTA可快速排除出血、确认LVO并评估侧支循环,是资源有限医院的首选方案;而MRI凭借DWI对超早期缺血的高敏感性( $>95\%$ )和SWI对微量出血的精准检测,更适合需要精准分型的复杂病例(如醒后卒中、血栓成分判断)。MRI筛选的EVT患者术后症状性ICH风险更低,但门-再灌注时间略长于CT筛选组;而平扫CT+多期相CTA筛选的晚期LVO患者,其90 d功能预后与CTP/MRI筛选组无显著差异,为基层医院拓展EVT治疗提供了循证依据。Zhou等<sup>[27]</sup>的研究显示,传统多模态CT组的门-针时间(door-to-needle time, DNT)为

(87.22±14.26)min,而多模态MRI组通过优化检查流程将DNT缩短至(61.23±9.32)min。这一差异可能源于MRI对缺血半暗带的精准识别,缩短了临床决策时间。MRI的多模态序列(DWI、PWI、SWI等)不仅能区分梗死核心与可挽救组织,还能通过SWI检测血栓成分,例如红色血栓在SWI序列表现为低信号的磁敏感血管征,而白色血栓则无此特征,这对病因判断和取栓策略选择具有指导意义。多模态CT/MRI已成为超AIS管理的核心工具,其价值不仅在于精准诊断,更在于通过整合血管、组织和血流信息,动态指导治疗决策(如溶栓、取栓)、监测病情变化(如再灌注、出血),并最终改善患者预后<sup>[28]</sup>。

CTA/MRA:如第2.2节所述,CTA可快速识别LVO(适合急诊评估),而MRA对微小血管病变的显示更具优势;增强MRA能更精准地评估狭窄程度。

侧支循环评估:CTP源图像因含时间信息,比CTA更敏感于侧支血管的范围和血流速度;MRI的FLAIR序列可通过“血管高信号”提示软脑膜侧支的缓慢血流。侧支循环的数量和质量直接影响梗死进展,CTP/MRA显示的丰富侧支与更好的再灌注预后相关,是治疗决策的重要依据<sup>[28]</sup>。

ICAD是全球AIS的主要病因之一,在亚洲、非洲等人群中患病率高达30%~50%,且是卒中复发的高风险因素。多模态影像对血管管腔形态和狭窄程度的显影是ICAD诊断的基础<sup>[29]</sup>。

颈动脉网是一种解剖变异,因层流破坏易形成血栓,并导致缺血性卒中。有研究显示,CT、CTA、MRI、颈动脉超声及导管血管造影的协同作用,CT排除急性梗死,并可发现硬膜下血肿;CTA定位血管异常;MRI明确梗死范围;超声和血管造影最终确诊为血栓性颈动脉网。这种多模态印证模式为非典型血管病变的诊断提供了实践范例<sup>[18]</sup>。

## 5 多模态成像技术整合与新兴生物标志物研究

近年来,多模态成像技术的整合在脑血管病研究中展现出独特优势。有研究发现,通过创新性的多模态纳米探针NanoGd,可以实现卒中后神经炎症的跨尺度动态监测,为理解免疫病理机制和开发靶向治疗提供了强大工具。其技术框架(MRI+双光子+同步辐射)为神经炎症研究树立了新范式。该研究发现,NanoGd可被活化吞噬细胞高效内化,特异度标记神经炎症T<sub>2</sub>/T<sub>2</sub>\*低信号强度与吞噬细胞密度正相关,可无创定量炎症活性,对比传统技术有明显优势<sup>[30]</sup>。

神经系统炎症作为脑血管病发生、发展及预后评估中的关键病理环节,其精准诊断与动态监测通过多模态成像技术及新兴生物标志物的整合应用,为脑血管病的精准诊疗提供了多维度支撑,具体作用体现在以下几个方面:①区分原发性炎症介导的脑血管病亚型,部分脑血管病直接由神经系统炎症触发,如血管炎、感染相关性脑血管病变等。通过多模态成像技术(如NanoGd-MRI靶向追

踪吞噬细胞浸润、BOLD-fMRI评估脑血管反应性)结合炎症标志物检测,可精准识别这类疾病的炎症本质,避免将其误判为普通缺血性或出血性卒中,为免疫抑制、抗感染等针对性治疗提供依据,例如血管炎患者的脑部影像可呈现血管壁强化、炎性细胞浸润特征,而传统成像技术难以区分,多模态炎症靶向成像则能明确病因。②筛选抗炎治疗获益人群,并非所有脑血管病患者都能从抗炎治疗中获益,需通过炎症检测区分高炎症负荷与低炎症负荷人群。例如通过NanoGd-MRI定量评估吞噬细胞密度、血清炎症因子(如白细胞介素-6和肿瘤坏死因子 $\alpha$ )水平,可识别出炎症反应剧烈的患者,这类患者接受抗炎治疗(如PCSK9抑制剂、靶向炎症通路药物)后,能有效减轻脑组织损伤,降低卒中复发风险;而低炎症负荷患者则可避免不必要的抗炎治疗及潜在不良反应。③指导治疗方案的个性化调整,炎症反应具有时空动态特征,急性期以促炎反应为主,恢复期则转向抗炎修复。通过多模态影像的动态监测(如不同时间点NanoGd-MRI信号变化、FLAIR序列评估炎症相关水肿),可实时评估炎症活动度,调整治疗强度与疗程,例如AIS患者若早期炎症信号强烈,可短期强化抗炎干预;若恢复期炎症消退,则及时转为神经保护及康复治疗。④实时评估治疗效果,将炎症指标作为治疗反应的“风向标”,若治疗后多模态影像显示炎症信号减弱(如NanoGd-MRI低信号区域缩小、BOLD-CVR改善)、血清炎症标志物下降,提示治疗有效;反之则提示治疗方案需调整,例如卒中患者接受溶栓或取栓治疗后,若炎症指标持续升高,可能预示再灌注损伤加重,需及时加强神经保护与抗炎干预。⑤识别卒中高危个体,慢性神经系统炎症是脑血管病的重要危险因素,长期炎症可导致血管内皮损伤、动脉粥样硬化进展加速。通过多模态影像(如MRA结合炎症靶向成像评估血管壁炎症)、血清炎症标志物筛查,可识别出无症状但高炎症负荷的脑血管病高危人群,通过抗炎、控制危险因素等早期干预,延缓血管病变进展,降低卒中发生风险。

## 6 新兴技术深度解析:成熟度、挑战与转化路径

### 6.1 纳米探针技术

近年,纳米探针技术的突破为神经炎症可视化提供了新维度。Hubert等<sup>[30]</sup>开发的NanoGd纳米颗粒通过整合MRI、双光子活体显微成像及同步辐射X射线相衬成像技术,首次实现了卒中后小胶质细胞/巨噬细胞时空动态的多尺度追踪。该钆基纳米颗粒具有28 nm流体直径和-42 mV电势特性,可被吞噬细胞高效内化,在7 T的MRI上产生特征性T<sub>2</sub>/T<sub>2</sub>\*低信号,48 h信号覆盖率达缺血核心区的44%,与免疫细胞浸润区域高度吻合。该研究创新性地通过活体双光子显微镜证实了CX3CR1<sup>+</sup>细胞对纳米颗粒的动态吞噬过程,结合透射电镜观察到溶酶体内纳米颗粒聚集,为MRI信号源提供了细胞级验证。相

较于传统超小超顺磁性氧化铁颗粒,其钆基特性为未来光子计数CT的分子成像预留了技术接口,这种多模态协同验证模式为炎症监测提供了新的技术范式。

当前仍面临的挑战:①纳米材料的体内代谢途径尚不明确,长期滞留可能引发免疫反应或器官毒性,尤其是钆基纳米探针可能存在潜在的肾毒性与脑内沉积风险,需通过长期毒理学研究明确其生物相容性。②NanoGd等探针的最佳成像效果依赖高场强MRI(如7T),而临床常规应用的多为1.5T或3.0T的MRI,低场强下的信号灵敏度与空间分辨率不足,需优化探针设计,以适配临床常规设备。

## 6.2 纳米探针驱动的成像技术创新

新型纳米探针设计正在突破传统成像技术的生物学限制。NanoGd的研究证实,通过表面PEG-双膦酸盐修饰可显著提升吞噬细胞靶向性,体外实验显示0.5 mmol/L浓度即可被68%的小胶质细胞内化,且不引发白细胞介素-6和肿瘤坏死因子 $\alpha$ 等炎性因子释放。其独特优势体现在:①长循环特性(半衰期>6h)允许48h持续监测窗口;②钆元素K-edge与光子计数CT能谱匹配,临床前实验已通过同步辐射相衬CT实现3D纳米分布可视化;③双光子荧光标记支持微米级细胞动态观察。这种“一次注射,多模成像”的特性,未来可协同MRI的宏观定位、CT的元素特异性及光学成像的细胞分辨率,为血脑屏障通透性评估-免疫细胞追踪-治疗反应监测提供完整技术链。

转化路径:①早期临床试验阶段,开展小规模人体临床试验(I~II期),纳入脑血管病患者,评估探针的体内安全性、成像效果及临床可行性;探索探针在神经炎症评估、治疗反应监测中的临床价值,建立标准化成像流程与判读标准。②技术推广与产业化阶段,建立规模化、标准化的探针生产工艺,实现质量可控;联合影像设备厂商开发专用成像序列与分析软件;通过III期临床试验验证其在多中心、大样本人群中的临床有效性,获取药品注册审批;最终在三甲医院神经科、影像科推广应用,逐步向基层医院辐射。

## 6.3 人工智能在影像领域的应用

研究表明,3D卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)模型可实现急诊头部CT自动分级,处理速度较人工提升150倍;CNN模型将DSC-MRI重建时间从2min缩至1s;10%剂量钆对比剂生成全剂量质量MRI;CNN有效消除CT金属伪影(动脉瘤线圈等);多尺度CNN使MRI分辨率提升4倍;3DCNN动脉瘤检测模型使医生诊断准确率提升3.8%,敏感度提升5.9%<sup>[31]</sup>。Zhang等<sup>[2]</sup>研究人员进一步拓展了人工智能(artificial intelligence, AI)在脑血管病影像中的应用边界,在慢性病变量化方面,nnU-Net基于SWI的模型,将脑微出血检测灵敏度提升了23%;在跨模态整合方面,Transformer架构可解析电子病历中的非结构化语义特征(如“短暂性单眼失明”),

与FLAIR序列白质高信号体积(>5.2 mL)融合,实现了5年卒中风险预测。针对AI“黑箱”问题,SHAP值可视化和Grad-CAM技术可明确关键决策权重(如侧支循环分级贡献58%),使临床医生对AI工具的接受度从42%提升至89%,为AI与多模态影像的协同应用扫清障碍<sup>[32]</sup>。但使用AI并非取代影像科医师,而是一种更加好用的工具辅助医师快速诊断。

当前仍面临的挑战:①数据质量与泛化能力不足,AI模型训练依赖大规模、高质量标注数据,但临床影像数据存在异质性(如设备型号、扫描参数差异)、标注标准不统一等问题;单中心数据训练的模型在多中心应用中易出现性能下降,泛化能力有限。②伦理与法律风险,AI诊断可能存在误诊、漏诊风险,其责任界定尚不明确;影像数据包含患者隐私信息,数据共享与使用过程中存在隐私泄露风险;缺乏统一的AI医疗产品审批标准与规范。

转化路径:①数据标准化与模型优化,建立多中心、标准化的脑血管病影像数据库,统一数据格式、扫描参数与标注标准;采用联邦学习、迁移学习等技术,解决数据隐私与泛化能力问题;开发可解释的AI模型,可视化诊断决策过程,提升临床信任度。②行业规范与推广应用,制定AI医疗影像产品的审批标准、伦理规范与责任界定准则;开展临床医生AI应用培训,提升其对AI工具的接受度与使用能力;在三甲医院率先推广成熟的AI辅助诊断系统,逐步向基层医院普及,最终实现AI在脑血管病影像诊断、治疗规划、预后预测中的全流程应用。

## 7 总结与展望

在AIS的早期评估与临床管理中,多模态CT与MRI成像技术形成了“优势互补、场景适配”的诊疗体系。多模态CT凭借亚秒级扫描速度、高普及率及对急性出血的100%灵敏度,成为急诊科排除脑出血的核心工具,尤其在基层医院等资源有限场景中扮演着不可或缺的角色。CTA亚毫米级空间分辨率可精确定位LVO,CTP通过rCBF等参数量化缺血核心与半暗带,为溶栓、取栓等EVT提供快速决策依据,但辐射暴露及碘造影剂肾损伤风险,限制了在肾功能不全患者以及儿童中的应用。多模态MRI以“无辐射、高软组织分辨、功能代谢评估”为核心优势,DWI序列可以在缺血发作30min内检出细胞毒性水肿(灵敏度>95%),FLAIR序列为不明发病时间卒中患者精准界定4.5h溶栓时间窗,PWI与DWI的不匹配区域可识别出“可挽救脑组织”<sup>[33]</sup>。MRI的多参数成像能力,如DWI和PWI,为诊断提供了更丰富的信息。尽管MRI在扫描时间、成本和普及度方面存在局限性,但其在早期缺血性变化检测上的优势使其成为CT的重要补充。多参数MRI通过rCBV(血管生成)、ADC(细胞密度)、Cho(代谢活性)三维评估,显著优化了脑肿瘤分级、靶区引导及治疗反应监测。未来需推进扫描协议标准化,并探索影像组学

与基因表达的关联性<sup>[34]</sup>。MRA(尤其是3.0 T的MRA)对ICAD的检出与DSA的一致性达92.3%。尽管MRI单序列扫描耗时较长(全程15~30 min)、设备普及率较低,且存在金属植入物禁忌。但有研究表明,通过优化卒中专用MRI检查流程,其DNT可缩短至(61.23±9.32)min,甚至优于传统多模态CT组的(87.22±14.26)min,且功能预后与CT评估相当,使MRI成为不明发病时间患者的首选工具<sup>[35]</sup>。

多模态成像技术的跨场景价值持续拓展,在卒中神经炎症机制探索中,通过MRI追踪A1腺苷受体的表达动态(早期下调致神经元损伤、中期上调调控炎症),为靶向抗炎药物研发提供了影像学依据<sup>[36]</sup>。另外,有研究表明,多模态影像验证了帕金森病存在“脑优先”和“身体优先”两种亚型,揭示了帕金森病发病机制的异质性<sup>[25]</sup>。

随着技术的发展,未来的影像医学在AIS的评估与管理中将扮演更加关键的角色。灌注成像(CTP/MRP)通过识别“梗死核心”和“可挽救的缺血半暗带”,有望实现“组织状态导向”治疗,突破时间窗限制。有研究提出,神经元死亡速度存在个体差异(如侧支良好者梗死进展慢),影像所示的“组织状态”比发病时间更能准确预测治疗获益;EVT患者中,“从DWI到再通的时间”比“从发病到再通的时间”更能预测预后,说明影像指标是更可靠的决策依据。便携式MRI的出现或应用为重症医学科和急诊科的神经影像诊断提供新方向<sup>[37]</sup>。有研究发现,0.064 T的便携式MRI在整合临床病史和深度学习算法后,对ICH的灵敏度达92.1%,特异度99.3%。其便携性和快速部署能力为卒中急救提供了新工具,尤其适用于床旁和资源有限场景<sup>[38]</sup>。超高场MRI技术的发展也为脑血管病精准诊疗开辟了新赛道。有研究表明,7 T的CS TOF MRA通过超高分辨率成像,可精准捕捉微小血管病变的解剖细节,解决了常规成像技术对丘脑穿通动脉、豆纹动脉等细小血管显示不足的难题,为小血管病的病因诊断和治疗靶点探索提供了直接依据<sup>[39]</sup>。随着压缩感知、深度学习等加速技术的优化,7 T MRI的扫描时间有望进一步缩短至5 min内,辐射剂量相关顾虑也将通过技术革新逐步缓解。未来需重点推进7 T MRI与多模态影像(如DWI、SWI)的融合应用,同时开发适配基层的轻量化超高场成像技术,让微小血管病变的精准检测惠及更多患者,推动脑血管病诊疗向“亚毫米级”精准时代迈进<sup>[39]</sup>。

未来,多模态影像组学联合血清生物标志物(如神经胶质细胞纤维酸性蛋白、神经元特异性烯醇化酶)可能实现更精准的卒中分型与预后预测。通过整合弗雷明汉卒中风险评分与分子MRI斑块强化特征揭示斑块强化与微循环障碍的协同致病作用,为高危ICAD患者的强化抗炎治疗(如PCSK9抑制剂)提供决策依据。未来需扩大样本验证模型的稳定性,并探索便携式MRI在移动卒中单元中的应用。

未来,量化分析、AI驱动的工作流程优化及多模态影像融合,将进一步提升早期诊断精度,拓展治疗时间窗,改善患者预后。

#### 参 考 文 献

- [1] 徐志鹏,王秀霞,李新华,等. 多模式影像指导下的急性缺血性脑卒中处理[J]. 世界复合医学, 2018, 4(4): 96-98.
- [2] ZHANG L, WANG Y, LIU J, et al. Diagnostic accuracy of multimodal CT and MRI in acute ischemic stroke: a prospective cohort study[J]. Front Neurol, 2022, 13: 887634.
- [3] CZAP AL, SHETH SA. Overview of imaging modalities in stroke[J]. Neurology, 2021, 97(20 Suppl 2): S42-S51.
- [4] DEMCHUK AM, DOWLATSHAHI D, RODRIGUEZ-LUNA D, et al. Prediction of haematoma growth and outcome in patients with intracerebral haemorrhage using the CT-angiography spot sign (PREDICT): a prospective observational study[J]. Lancet Neurol, 2012, 11(4): 307-314.
- [5] ALBERS GW, MARKS MP, KEMP S, et al. Thrombectomy for stroke at 6 to 16 hours with selection by perfusion imaging[J]. N Engl J Med, 2018, 378(8): 708-718.
- [6] WEN XH, XIAO YN, HU XF, et al. Prediction of hemorrhagic transformation via pre-treatment CT radiomics in acute ischemic stroke patients receiving endovascular therapy[J]. Br J Radiol, 2023, 96(1147): 20220439.
- [7] PARTHASARATHY R, KATE M, REMPEL JL, et al. Prognostic evaluation based on cortical vein score difference in stroke[J]. Stroke, 2013, 44(10): 2748-2754.
- [8] SILLANPÄÄ N. Role of perfusion imaging in acute stroke[J]. Panminerva Med, 2013, 55(1): 29-41.
- [9] POPA BV, MINOIU AC, JURATU C, et al. The utility of multimodal imaging and artificial intelligence algorithms for overlying two volumes in the decision chain for the treatment of complex pathologies in interventional neuroradiology: a case series study[J]. Life (Basel), 2023, 13(3): 784.
- [10] XIAO ZP, JIN K, WAN JQ, et al. Measurement of cerebrovascular reserve by multimodal imaging for cerebral arterial occlusion or stenosis patients: protocol of a prospective, randomized, controlled clinical study[J]. Trials, 2020, 21(1): 49.
- [11] KIM BJ, KANG HG, KIM HJ, et al. Magnetic resonance imaging in acute ischemic stroke treatment[J]. J Stroke, 2014, 16(3): 131-145.
- [12] BAIRD AE, WARACH S. Diffusion-weighted MRI in acute ischemic stroke[J]. Ann Neurol, 2011, 50(4): 580-598.
- [13] SCHELDEMAN L, WOUTERS A, DUPONT P, et al. Diffusion-weighted imaging and fluid-attenuated inversion recovery quantification to predict diffusion-weighted imaging-fluid-attenuated inversion recovery mismatch status in ischemic stroke with unknown onset[J]. Stroke, 2022, 53(5): 1665-1673.
- [14] CHENG F, TANG Y. Diagnostic value of 3D-TOF MRA in intracranial small vessel disease compared with DSA[J]. J Neuroimaging, 2021, 31(3): 382-388.

- [15] POWERS WJ, RABINSTEIN AA, ACKERSON T, et al. 2018 guidelines for the early management of patients with acute ischemic stroke: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. *Stroke*, 2018, 49(3): e46-e110.
- [16] LI JA, LI JR, HUANG LJ, et al. Outcome assessment in stroke using multiparametric MRI: integrating infarct location, radiomics, and global brain frailty[J/OL]. *J Magn Reson Imaging*. (2026-01-07)[2026-01-20]. <https://doi.org/10.1002/jmri.70233>.
- [17] CHAVEZ JC, ZALESKA MM, WANG XK, et al. Multimodal magnetic resonance imaging for assessing evolution of ischemic penumbra: a key translational medicine strategy to manage the risk of developing novel therapies for acute ischemic stroke[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2009, 29(1): 217-219.
- [18] SUZUKI S, KIDWELL CS, STARKMAN S, et al. Use of multimodal MRI and novel endovascular therapies in a patient ineligible for intravenous tissue plasminogen activator[J]. *Stroke*, 2005, 36(9): e77-e79.
- [19] BAHR-HOSSEINI M, SHAKUR S F, AMIN-HANJANI S, et al. Angiographic correlates of cerebral hemodynamic changes with Diamox challenge assessed by quantitative magnetic resonance angiography[J]. *Stroke*, 2016, 47(6): 1658-1660.
- [20] LIN GH, CHEN WY, GENG YK, et al. A multimodal MRI-based machine learning framework for classifying cognitive impairment in cerebral small vessel disease[J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 13112.
- [21] TANER BULUT H, ALTUN Y, ARIK A, et al. Use of multiparametric magnetic resonance imaging as a screening tool for the determination of acute ischemic stroke duration[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2022, 26(3): 846-852.
- [22] FIERSTRA J, VAN NIFTRIK C, WARNOCK G, et al. Staging hemodynamic failure with blood oxygen - level - dependent functional magnetic resonance imaging cerebrovascular reactivity: a comparison versus gold standard ( $^{15}\text{O}$ )- $\text{H}_2\text{O}$ -positron emission tomography[J]. *Stroke*, 2018, 49(3): 621-629.
- [23] JOYA A, PLAZA - GARCÍA S, PADRO D, et al. Multimodal imaging of the role of hyperglycemia following experimental subarachnoid hemorrhage[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2024, 44(5): 726-741.
- [24] MILLER - THOMAS MM, BENZINGER TLS. Neurologic applications of PET/MR imaging[J]. *Magn Reson Imaging Clin N Am*, 2017, 25(2): 297-313.
- [25] PUSHIE MJ, MESSMER M, SYLVAIN NJ, et al. Multimodal imaging of hemorrhagic transformation biomarkers in an ischemic stroke model[J]. *Metallomics*, 2022, 14(4): mfac007.
- [26] ABDALKADER M, SIEGLER JE, LEE JS, et al. Neuroimaging of acute ischemic stroke: multimodal imaging approach for acute endovascular therapy[J]. *J Stroke*, 2023, 25(1): 55-71.
- [27] ZHOU JG, LI GF, MENG Y, et al. Application of multimodal magnetic resonance imaging in green channel of acute and hyperacute ischemic stroke[J]. *Contrast Media Mol Imaging*, 2022, 2022: 2452282.
- [28] LIEBESKIND DS, ALEXANDROV AV. Advanced multimodal CT/MRI approaches to hyperacute stroke diagnosis, treatment, and monitoring[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2012, 1268: 1-7.
- [29] CHARLES JH, DESAI S, JEAN PAUL A, et al. Multimodal imaging approach for the diagnosis of intracranial atherosclerotic disease (ICAD): basic principles, current and future perspectives[J]. *Interv Neuroradiol*, 2024, 30(1): 105-119.
- [30] HUBERT V, HRISTOVSKA I, KARPATI S, et al. Multimodal imaging with NanoGd reveals spatiotemporal features of neuroinflammation after experimental stroke[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2021, 8(17): e2101433.
- [31] YEDAVALLI VS, TONG E, MARTIN D, et al. Artificial intelligence in stroke imaging: current and future perspectives[J]. *Clin Imaging*, 2021, 69: 246-254.
- [32] ZHANG H, MA W, ZHOU X, et al. Anonymous. Artificial intelligence in cerebrovascular disease management: a comprehensive review of risk prediction, diagnosis, therapeutic optimization, and clinical translation[J]. *Vasc Health Risk Manag*, 2025, 21: 949-964.
- [33] PROVOST C, SOUDANT M, LEGRAND L, et al. Magnetic resonance imaging or computed tomography before treatment in acute ischemic stroke[J]. *Stroke*, 2019, 50(3): 659-664.
- [34] KIMURA M, CRUZ LCHDA Jr. Multiparametric MR imaging in the assessment of brain tumors[J]. *Magn Reson Imaging Clin N Am*, 2016, 24(1): 87-122.
- [35] JOYA A, ARDAYA M, MONTILLA A, et al. In vivo multimodal imaging of adenosine A1 receptors in neuroinflammation after experimental stroke[J]. *Theranostics*, 2021, 11(1): 410-425.
- [36] LEV MH. Perfusion imaging of acute stroke: its role in current and future clinical practice[J]. *Radiology*, 2013, 266(1): 22-27.
- [37] MAZUREK MH, PARASURAM NR, PENG TJ, et al. Detection of intracerebral hemorrhage using low - field, portable magnetic resonance imaging in patients with stroke[J]. *Stroke*, 2023, 54(11): 2832-2841.
- [38] Lakhani DA, Zhou X, TAO S, et al.. Clinical application of ultra-high resolution compressed sensing time-of-flight MR angiography at 7T to detect small vessel pathology[J]. *Neuroradiol J*, 2023, 36(5): 335-340.
- [39] SUN JL, SUI Y, CHEN Y, et al. Predicting acute ischemic stroke using the revised Framingham stroke risk profile and multimodal magnetic resonance imaging[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1264791.

责任编辑:龚学民