DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250478

·专题报道·

急性缺血性脑卒中出血转化影像学研究进展

宋雨婷，田　冰*
海军军医大学（第二军医大学）第一附属医院影像医学科，上海 200433

［摘要］ 急性缺血性脑卒中（AIS）后出血转化是指梗死区域继发性出血的病理过程，是 AIS 患者治疗后常见的并发症之一，也是自然病程的一部分。出血转化被认为与不良预后密切相关，尤其是症状性颅内出血，死亡率高达 40%～50%。近年来，随着影像学技术的飞速发展和人工智能的深度应用，AIS 后出血转化的研究取得了突破性进展。本文综述了多模态 CT 和 MRI 技术、影像组学分析、人工智能预测模型等在 AIS 出血转化中的应用进展。影像组学、深度学习及其融合模型都表现出超越传统方法的预测效能，是临床精准决策的强有力辅助工具。

［关键词］ 急性缺血性脑卒中；出血转化；影像学；人工智能；预测研究
［引用本文］ 宋雨婷，田冰. 急性缺血性脑卒中出血转化影像学研究进展[J]. 海军军医大学学报，2025，46（12）：1538-1546. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250478.

Imaging research progress on hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke

SONG Yuting, TIAN Bing*
Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

［**Abstract**］ Hemorrhagic transformation (HT) following acute ischemic stroke (AIS) refers to the pathological process of secondary bleeding in the cerebral infarction area. It is a common complication after AIS treatment and is also an inherent part of the natural course of disease. HT is considered closely related to poor prognosis, particularly in symptomatic intracranial hemorrhage, with a mortality rate of 40%-50%. In recent years, rapid advances in imaging technology and artificial intelligence have led to significant breakthroughs in HT research. This article reviews recent progress in multimodal computed tomography and magnetic resonance imaging, radiomics, and artificial intelligence-based prediction models. Radiomics, deep learning, and their integrated models have been proven superior to conventional methods in predictive performance and are robust assisting tools for clinical precision decision-making.

［**Key words**］ acute ischemic stroke; hemorrhagic transformation; imaging; artificial intelligence; predictive research
［**Citation**］ SONG Y, TIAN B. Imaging research progress on hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke[J]. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(12): 1538-1546. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250478.

脑卒中是全球第二大死因，急性缺血性脑卒中（acute ischemic stroke，AIS）约占所有脑卒中病例的 87%[1]。在我国，AIS 长期位列居民死亡原因的首位，其发病率以每年约 8% 的速度增长，增速显著超过全球平均水平，且发病呈现明显的年轻化趋势[2]。静脉溶栓和血管内治疗是当前 AIS 患者的核心再灌注治疗方案。AIS 最严重的并发症是出血转化，其可发生在自然病程或再灌注治疗后，静脉溶栓后出血转化发生率为 4.5%～68.0%[3]，血管内治疗后出血转化发生率约 43%[4]。其中，症状性颅内出血（symptomatic intracranial hemorrhage，sICH）预后极差，死亡率高达 40%～50%，且幸存者多遗留严重残疾[5]。因此，影像学早期预测和诊断出血转化是 AIS 救治链中的关键环节，直接影响治疗安全性、患者预后和医疗成本。本文主要探讨多模态 CT 和 MRI、影像组学、人工

［收稿日期］ 2025-07-11　［接受日期］ 2025-09-22
［基金项目］ 上海市卫生健康委员会临床研究专项面上项目（202340057），海军军医大学第一附属医院临床研究专项（2024LYC08），海军军医大学第一附属医院基础研究专项（2023PY46）. Supported by General Program of Clinical Research Project of Shanghai Municipal Health Commission (202340057), Clinical Research Project of The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (2024LYC08), and Basic Research Project of The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (2023PY46).
［作者简介］ 宋雨婷，硕士生. E-mail: 18362256851@163.com
*通信作者（Corresponding author）. E-mail: tianbing2003@163.com

智能预测模型等在早期预测 AIS 出血转化方面的作用。

1　出血转化的危险因素及分型

缺血性脑损伤导致血脑屏障破坏和血管完整性丧失进而引发血液外渗，是出血转化发生的重要病理生理机制。出血转化的危险因素可归纳为患者基础状况、卒中严重程度及治疗相关因素。患者基础情况，如高龄、高血压、糖尿病、心房颤动等均已被证实会增加出血转化风险[6-8]。研究表明，高美国国立卫生研究院卒中量表（National Institutes of Health stroke scale，NIHSS）评分、低 Alberta 卒中项目早期 CT 评分（Alberta Stroke Program early CT score，ASPECTS）和侧支循环不良是出血转化的危险因素[9]。其中，NIHSS 评分是量化 AIS 患者神经功能缺损程度的标准化评分，NIHSS 评分≥ 22 分的患者致死性颅内出血发生率可达到 6.8%[5]。AIS 患者接受血管再通治疗后出血转化发生率增加。ECASS Ⅲ试验显示，阿替普酶溶栓治疗组 sICH 发生率为 2.4%，高于安慰剂组的 0.2%[10]。MR CLEAN-LATE 研究中，血管内治疗组 sICH 发生率为 7%，也高于未接受血管内治疗组的 2%[11]。

基于有无神经功能恶化，出血转化分为 sICH 和无症状性颅内出血（asymptomatic intracranial hemorrhage，aICH）。目前，sICH 较多采用依据 ECASS 研究的定义，ECASS Ⅲ研究将其定义为 NIHSS 评分增加≥4 分或死亡且影像学上有出血征象。根据影像学上有无血肿占位效应，出血转化分为脑实质血肿（parenchymal hematoma，PH）和出血性梗死（hemorrhage infarction，HI）；ECASS Ⅱ研究进一步将其细分为 4 型，即 HI-1、HI-2、PH-1 及 PH-2。临床研究表明，HI-1、HI-2 及轻度 PH（PH-1）多表现为 aICH，发生率较高，但通常不会导致神经功能恶化，因此常与患者 3 个月功能预后无显著关联；而重度 PH（PH-2）因血肿体积超过梗死区域的 30% 或伴有明显占位效应，常进展为 sICH，导致患者死亡或残疾风险增加，是临床干预的重点[12-13]。

2　CT

出血转化的主要诊断依据为复查头颅 CT 以判断有无出血。目前，临床上常采用 CT 平扫（non-contrast CT，NCCT）＋ CT 血管成像（CT angiography，CTA）＋ CT 灌注成像（CT perfusion，CTP）的多模态 CT 对 AIS 患者进行一站式评估。患者仅需一次检查即可获得脑实质、血管及血流动力学的综合信息，且从 NCCT 排除出血至完成 CTA、CTP 仅需 10～15 min。

2.1　NCCT　NCCT 是 AIS 急诊影像评估的首选工具。NCCT 能够快速识别早期梗死及颅内出血征象。美国心脏协会 / 美国卒中协会指南强调，头颅 NCCT 是区分缺血性脑卒中和出血性脑卒中的首选方式[14]。ASPECTS 是一种基于 NCCT 评估 AIS 大脑中动脉供血区域缺血病变的半定量评分系统，ASPECTS＜7 分往往提示病情严重、预后不良，接受血管再通治疗后易出现出血转化。Chen 等[15]在一项纳入 231 例血栓切除术后 AIS 患者的回顾性研究中发现，ASPECTS 系统预测出血转化的最佳临界值为 7 分，特异度为 87.6%，ASPECTS＜7 分的患者出血转化发生率高达 74.2%。张琪等[16]通过对 121 例大脑中动脉供血区域梗死患者的研究显示，ASPECTS 为 0～4 分、5～7 分、8～10 分的患者出血转化发生率分别为 57.1%、26.7%、14.3%，这表明 ASPECTS≤4 分时出血转化风险显著增加。

大脑中动脉高密度征是 AIS 患者 NCCT 上较早出现的重要征象之一，表现为大脑中动脉走行区的异常高密度影，它是大脑中动脉闭塞的影像学标志，也预示着预后不良，且对静脉溶栓治疗反应差。多项研究表明，高密度征是 AIS 后出血转化的独立危险因素。Kang 等[17]的研究纳入了 318 例接受血管内血栓切除术的大脑中动脉闭塞 AIS 患者，发现高密度征阳性的患者血管内治疗后发生出血转化的风险增加。Chrzan 等[18]研究了高密度征与 ASPECTS 之间的相关性，认为高密度征与随访 CT 显示较低的 ASPECTS 显著相关。

2.2　CTA　CTA 能够通过评估侧支循环、血栓负荷及血管闭塞位置，为出血转化风险分层提供关键影像学依据。侧支循环不良意味着缺血区域低灌注时间延长，再灌注后血脑屏障遭到破坏的风险较高，且与 PH 型出血转化显著相关[19]。侧支循环的建立不仅取决于动脉灌注的通畅性，还与静脉系统的引流效率紧密相关。Bala 等[20]基于 CTA 分析了皮质静脉显影与血管内治疗后 PH 之间的相关性，结果显示 CTA 图像中皮质静脉显影不清与血管内

治疗后 PH 风险增加以及临床预后不良密切相关，所以皮质静脉显影不清可用于指导脑卒中患者风险分层。

急性大血管闭塞型脑卒中的动脉闭塞位置和长度与临床预后密切相关。血栓负荷评分（clot burden score，CBS）是一种基于 CTA 评估前循环 AIS 血栓严重程度的 10 分制评分系统，有研究表明 CBS 较高的患者在接受再灌注治疗后血管再通成功率较高，同时梗死体积较小、出血转化风险较低。金雪红等[21]通过对 88 例 AIS 患者进行回顾性研究发现，低血栓负荷组（CBS≥7 分）的出血转化发生率仅为 12.5%，显著低于高血栓负荷组（CBS＜7 分）的 34.2%。Yogendrakumar 等[22]通过一项前瞻性队列研究表明，CBS≤3 分、ASPECTS≤7 分以及颈内动脉血栓位置是血管内治疗后颅内出血的独立预测因子，但 CBS 与 sICH 的关联仍有待更大样本量的研究加以验证。此外，新兴的 4D-CTA 技术能够通过动态造影剂外渗显影识别常规 CT 难以发现的微小出血灶。

2.3　CTP　CTP 已成为临床实践中评估 AIS 梗死核心区与缺血半暗带的首选影像学技术。CTP 可通过定量分析脑血流量、脑血容量、造影剂达峰时间、平均通过时间、血流达峰时间（time to top，Tmax）及渗透－表面积乘积（permeability-surface area product，PS）等参数，快速识别缺血半暗带与梗死核心区，进而预测出血转化风险。由于其能够直观反映梗死核心区的低灌注状态及继发的血脑屏障通透性增高，CTP 在出血转化预测中展现出较高的灵敏度。

脑血容量＜2.1 mL/100 g 的脑组织区域被定义为梗死核心区，有研究显示脑血容量≤0.5 mL/100 g 对出血转化的预测价值最高，这可能与其更精准地反映梗死核心区有关[23]。此外，Otgonbaatar 等[24]发现，相较于脑血流量，脑血容量对 AIS 患者梗死核心体积的预测更准确。脑血流量＜30% 的脑组织区域被认为是梗死核心区，脑血流量＜30% 意味着血脑屏障破坏加重，溶栓再通后易发生出血转化。Shi 等[25]提出基于 CTP 计算的大脑侧裂侧支循环的最大脑血流速度可作为初步预测 AIS 患者转归的指标，最佳临界值为 64 mL/（100 g • min），最大脑血流速度升高是出血转化风险较低和神经功能转归较好的独立预测因素。

Tmax≥6 s 是目前脑组织灌注延迟的标准化阈值。Yassi 等[26]通过前瞻性队列研究评估了预测 AIS 出血转化的最佳 CTP 参数，多因素 logistic 回归分析显示，Tmax＞14 s（*OR*＝3.21，95%*CI* 1.89～5.45，*P*＝0.002）与接受静脉溶栓治疗（*OR*＝2.15，95%*CI* 1.23～3.76，*P*＝0.007）是发生出血转化的独立预测因子，而且 Tmax＞14 s 对出血转化的预测效能显著优于其他参数。

近年来研究发现，低灌注强度比值（hypoperfusion intensity ratio，HIR）是出血转化的独立危险因素，对出血转化具有显著的预测价值[27]。HIR 定义为 Tmax＞6 s 病灶体积与 Tmax＞10 s 病灶体积的比值，低 HIR 提示侧支循环良好。Miller 等[28]研究认为 HIR 预测出血转化的最佳临界值为 0.54，并证明 HIR＞0.54 的患者发生 sICH 的风险显著增加。

PS 是反映血管通透性的参数之一，PS 升高表示血管通透性增加，出血转化风险也随之增高。李翔等[29]研究发现 PS 和 rPS（rPS 代表患侧与健侧 PS 之比）升高是出血转化的预测因子，其中 rPS 的预测效能更高。该研究结果显示，当 PS 的临界值设定为 0.94 mL/（100 g • min）时，其预测出血转化的灵敏度和特异度分别为 95.5%、78.6%；而 rPS 的临界值设定为 2.128 时，其预测出血转化的灵敏度和特异度分别为 86.4% 和 64.3%；该研究还发现全脑 CTP 联合多时相 CTA 相较于单一 CTP 参数可以提升预测出血转化的效能，但是 CTP 对直径＜1.5 cm 的微小出血转化病灶灵敏度较低，需联合磁敏感加权成像（susceptibility weighted imaging，SWI）以提高检出率。

2.4　双能 CT（dual-energy CT，DECT）　急性大动脉闭塞型脑卒中经血管内治疗后，血脑屏障的破坏常导致术后出现造影剂外渗，而传统 CT 由于出血与造影剂滞留的密度重叠鉴别能力有限。既往研究证实，DECT 的三物质分离技术可在此类患者的术后影像评估中鉴别诊断造影剂渗漏与出血转化[30]。DECT 对预测出血转化也有一定的价值。Wang 等[31]探讨了血管内血栓切除术后即刻和 24 h 内 DECT 检查对出血转化的诊断及预测价值，结果显示 24 h DECT 诊断出血转化的灵敏度、特异度、准确度分别为 82.5%、100%、95.5%，而即刻 DECT 的灵敏度和准确度较低，这表明 24 h DECT 在预测延迟性出血转化方面表现突出。有较高比例

的造影剂渗漏患者会发生延迟性出血转化。刘克勤等[32]将虚拟融合影像中病灶密度最高值（HUmax）作为量化造影剂渗漏的标准，发现当HUmax＞77 HU时预测出血转化的灵敏度为80.83%，特异度为74.22%，表明DECT影像中造影剂渗漏量是出血转化的独立预测因素。DECT重建的碘图能够直接量化碘造影剂外渗区域的碘浓度，碘浓度与出血转化风险相关[33]。Pinckaers等[34]开展的单中心回顾性研究通过对CE-ASPECTS（基于ASPECTS的造影剂外渗评分）及脑实质内碘浓度进行定量分析发现，血管内治疗后早期DECT显示的造影剂外渗和碘浓度均与颅内出血相关。此外，CE-ASPECTS在预测卒中进展方面优于局部碘浓度测量，而绝对碘浓度则与sICH的关联更强。Bonatti等[35]研究发现，脑实质高密度区的绝对碘浓度＞1.35 mg/mL可以预测出血转化，灵敏度和特异度分别为100%和67.6%。但是不同研究中可预测出血转化的定量参数临界值存在差异，未来仍需多中心研究验证以确定普适性标准。

3　MRI

MRI凭借其高分辨率、多模态成像能力及无辐射优势，在脑卒中出血转化的检出率方面优于CT。MRI可通过整合梗死核心体积、微出血负荷、血脑屏障通透性等多参数精准识别出血转化高危人群，指导个体化治疗决策，改善患者预后。

3.1　弥散加权成像（diffusion weighted imaging，DWI）　DWI通过量化AIS患者的梗死核心体积、病灶表观扩散系数（apparent diffusion coefficient，ADC）及关键功能区损伤程度，早期预测脑卒中患者的功能独立性和出血转化风险。DWI是测量梗死核心体积最准确的影像学检查方式。DWI梗死核心体积与再灌注治疗后出血转化风险呈正相关。El Nawar等[36]通过一项回顾性队列研究对比了一系列MRI指标，包括DWI梗死核心体积、ADC值、液体衰减反转恢复（fluid attenuated inversion recovery，FLAIR）序列血管高信号征（FLAIR vascular hyperintensity，FVH）、血栓长度等，对静脉溶栓后出血转化的预测效能，多因素logistic回归分析显示DWI梗死核心体积是预测溶栓后出血转化的最佳MRI指标之一（*OR*＝13.16，*P*＜0.001），其预测效能优于ADC值（*OR*＝8.69，*P*＜0.001）和其他影像学特征。Gilgen等[37]研究证实，DWI梗死核心体积＞70 mL是出血转化的独立预测因子（*OR*＝4.20，95%*CI* 2.1～8.3，*P*＜0.001）。2023年美国心脏协会/美国卒中协会指南明确将DWI梗死核心体积＞70 mL列为静脉溶栓的相对禁忌证[14]。Caparros等[38]通过对944例接受静脉溶栓患者的研究发现，DWI异常体积是sICH的最佳预测因素之一，DWI异常体积预测sICH的最佳临界值为4 mL，AUC值为0.72，灵敏度为78%，特异度为58%。

DWI-ASPECTS是在传统NCCT-ASPECTS基础上利用DWI图像建立的评分方法。相较于NCCT-ASPECTS，DWI-ASPECTS系统在观察者间一致性及病灶检出灵敏性方面具有显著优势，而且DWI-ASPECTS对卒中后90 d功能独立的预测效能优于NCCT-ASPECTS[39]。研究表明DWI-ASPECTS≤7分的AIS患者出血转化发生率显著高于DWI-ASPECTS＞7分的患者[40]。

ADC值可通过量化缺血区域的细胞毒性水肿程度及空间分布特征评估出血转化风险。研究表明ADC值降低与血脑屏障破坏程度呈正相关，其中梗死核心区ADC值≤550×10^{-6} mm^2/s被确定为预测出血转化的关键阈值[41]。Liu等[42]研究发现，ADC值＜400×10^{-6} mm^2/s的缺血区域体积对于血管再通后出血转化具有较高的预测价值，并且将ADC阈值和阈值下缺血体积相结合分析发现ADC值＜400×10^{-6} mm^2/s的缺血区域体积≥6.46 mL是出血转化的独立预测因子（*OR*＝5.21，95%*CI* 2.34～11.62，*P*＜0.001）。

近年来，多模态DWI技术不断突破，体素内不相干运动（intravoxel incoherent motion，IVIM）成像、弥散张量成像等技术已深入应用于AIS的预后评估。IVIM成像可获得慢速表观扩散系数（D）、快速表观扩散系数（D*）、灌注分数（f）等灌注参数，直接定量评估AIS病灶区域的微循环灌注异常程度。张华文等[43]研究发现IVIM参数可有效预测AIS患者血管再通治疗后出血转化风险，以相对灌注分数值的预测效能最高，相对灌注分数值的最佳临界值为0.495，灵敏度和特异度分别为84.6%和89.5%。

3.2　FLAIR　FLAIR序列是头颅MRI的常用核心成像技术。在AIS诊疗体系中，该序列可基于

FLAIR-DWI 不匹配现象评估发病时间窗，同时通过检测 FVH 和脑实质水肿范围了解患者是否处于溶栓治疗的有效时间窗。Nam 等[44]通过前瞻性队列研究发现，前循环远端分支 FVH（大脑中动脉 M3、M4 段或以远的血管）是 AIS 患者早期神经功能恶化的独立预测因子；进一步分析结果显示，远端 FVH 与脑大面积梗死后出血转化风险升高相关。相较于单一的 FVH 征象，部分研究认为 FVH-DWI 不匹配对预测 AIS 后出血转化也有一定的价值。FVH-DWI 不匹配是指 FVH 分布范围超出 DWI 显示的病灶边界。FVH-DWI 不匹配患者通常有较好的功能预后。Liu 等[45]对 101 例接受血管内治疗的大脑中动脉 M1 段闭塞 AIS 患者进行 ASPECTS 分析发现，DWI 病灶内 FVH-ASPECTS 升高与出血转化相关（*OR*＝1.30，95%*CI* 1.04～1.51，*P*＝0.019），提示 FVH 在梗死核心区的分布可能是出血转化的独立预测因子。

3.3　灌注加权成像（perfusion weighted imaging，PWI）　PWI 同样是 AIS 多模态 MRI 评估的核心序列。与 CTP 类似，PWI 能提供包括脑血流量、脑血容量、平均通过时间、造影剂达峰时间和 Tmax 等在内的多种灌注参数，指导 AIS 患者的治疗及预后预测[46]。目前临床以动态磁敏感对比增强 PWI（dynamic susceptibility contrast PWI，DSC-PWI）和动脉自旋标记（arterial spin labeling，ASL）技术的应用较多。

Campbell 等[47]通过分析 EPITHET 和 DEFUSE 研究的数据发现极低脑血容量体积（定义为患侧脑血容量低于健侧脑血容量 2.5% 的脑组织区域的体积）对 PH 的预测具有很高的灵敏度，预测出血转化的最佳临界值为＞2 mL。Mishra 等[48]研究发现，相对脑血容量比值＜0.42 且极低脑血容量体积≥3.55 mL 对 PH 预测效能最佳，AUC 值为 0.77，灵敏度为 94%，特异度为 63%。研究表明缺血后高灌注与出血转化显著相关，尤其是在再灌注治疗后，ASL 技术可准确量化脑血流量从而检出高灌注，并且出血转化的分级与高灌注的时间相关[49]。Huang 等[50]的研究纳入了 98 例 AIS 患者，将相对脑血流量比值≥1.4 的区域定义为高灌注区域。研究结果显示，高灌注区域的最大脑血流量是出血转化的独立危险因素（*OR*＝1.020，95%*CI* 1.005～1.042，*P*＝0.012），预测出血转化的最佳临界值为 146.5 mL/（100 g • min），灵敏度和特异度分别为 76.9% 和 69.6%。Li 等[51]的研究通过对比 Tmax＞6 s、＞8 s 和＞10 s 对出血转化的预测效能，发现 Tmax＞10 s 的病灶体积是预测出血转化的最佳指标，临界值为 10.5 mL（AUC 值为 0.897，灵敏度为 87.3%，特异度为 81.2%）。Potreck 等[52]研究表明，DSC-PWI 的灌注延迟 Tmax 图谱可反映脑组织造影剂通过的时间延迟程度，间接评估软脑膜侧支循环的代偿能力。该研究进一步指出，Tmax≥10 s 提示受累区域处于严重低灌注状态，且与数字减影血管造影（digital subtraction angiography，DSA）评估的侧支循环不良具有高度一致性（*P*＜0.001）。这一结果表明，基于 Tmax 的功能性影像参数可无创性替代 DSA 评估侧支循环情况。

3.4　SWI　SWI 是利用组织间磁敏感差异，通过梯度回波序列采集相位和幅度信息并采用后处理技术增强磁敏感效应对比度的成像技术。SWI 对微小出血灶（直径＜5 mm）的检出率显著优于常规 MRI 和 CT。脑微出血在 SWI 上表现为小圆形均匀低信号缺损，周围无水肿带。Nagaraja 等[53]通过对 366 例接受静脉溶栓治疗的 AIS 患者进行研究，发现脑微出血是静脉溶栓治疗后出血转化的独立预测因子。一项 meta 分析认为脑微出血是 AIS 患者血管再通治疗后 sICH 和不良功能结局的预测因子[54]，但有研究认为脑微出血不能预测患有心房颤动或风湿性心脏病的 AIS 患者的出血转化[55]。脑微出血病灶的数量与出血转化风险相关[56]，脑微出血病灶数量越多出血转化的风险越大。Wilson 等[57]研究发现，当脑微出血病灶的数量≥5 个时抗栓或溶栓治疗后 sICH 的发生风险增加近 5 倍，≥20 个时 sICH 发生风险增加可达 8 倍。

不对称突出静脉征可用于评估 AIS 患者缺血半暗带及侧支循环情况。不对称突出静脉征是 SWI 图像上患侧静脉信号与健侧相比呈现数量增多或管径增粗的现象，可分为不对称皮质静脉征和不对称髓质静脉征。有研究发现不对称皮质静脉征与早期神经功能恶化和不良结局有关，但其不会增加出血转化风险[58]。Bu 等[59]的研究却表明不对称皮质静脉征与单侧大脑中动脉闭塞 AIS 患者溶栓治疗后的预后无显著关联，而不对称髓质静脉征是 90 d 不良功能预后的独立影像预测标志物。

毛刷征是 SWI 图像上深部髓质静脉的异常显

示，表现为侧脑室周围的线样低信号，反映了缺血组织严重缺氧[60]。徐超等[61]研究发现，毛刷征是静脉溶栓后发生出血转化的独立危险因素，可用于预测 AIS 患者静脉溶栓后的出血转化。

SWI-DWI 不匹配也可用来评估缺血半暗带，是一种无创性检查。Lu 等[62]研究发现，SWI-DWI 不匹配与 PWI-DWI 不匹配在检测缺血半暗带方面具有很好的一致性，但 SWI 信号变化通常滞后于灌注异常，无法区分可逆性与不可逆性缺血，因此尚不能取代 PWI-DWI 不匹配。

4　影像组学与人工智能模型

人工智能联合影像学技术在预测卒中后出血转化方面展现出强大的潜力，其通过影像组学和深度学习技术能够从 CT、MRI 等多模态影像中自动提取梗死核心异质性、血脑屏障破坏程度等关键特征，并能够与 NIHSS 评分、血压、血糖等临床参数结合构建高精度的 AIS 出血转化预测模型。

影像组学能够通过提取和分析影像中体素在二维及三维空间分布的关联特征量化表征病灶区域细微的纹理异质性信息，挖掘出与出血转化密切相关的影像特征。Zhai 等[63]对 98 例未接受再灌注治疗的 AIS 患者进行回顾性研究，探讨了 MRI 纹理预测急性大面积梗死后出血转化的价值，发现 DWI 提取的纹理特征对出血转化具有显著预测效能（AUC 值为 0.779～0.797），优于 FLAIR 序列（AUC 值为 0.652～0.670）。此外，Jiang 等[64]研究发现相较于单一影像参数，基于多参数影像组学的预测模型展现出更好的诊断效能和更强的泛化能力。

机器学习和深度学习可通过筛选关键预测因子、深度挖掘特征间的复杂关联优化出血转化预测模型，提升了预测的准确性。常见机器学习算法包括极端梯度提升、随机森林、logistic 回归及决策树等。深度学习属于机器学习领域的一个分支，卷积神经网络和循环神经网络是深度学习中较突出的算法包。Issaiy 等[65]通过系统综述分析了 24 项有关机器学习和深度学习模型预测卒中后出血转化的研究，发现机器学习和深度学习模型的预测性能均显著优于传统评分系统，机器学习模型中梯度提升模型的表现最佳（AUC 值为 0.91），卷积神经网络模型（中位 AUC 值为 0.91）的表现与梯度提升模型相当。Choi 等[66]对比了多种机器学习模型对卒中后出血转化的预测效能，发现基于结构化数据构建的人工神经网络模型表现最佳（AUC 值为 0.844），其预测性能优于极端梯度提升、logistic 回归、支持向量机等传统机器学习方法。多种机器学习算法可用于卒中后出血转化的预测，但具体表现因临床环境和研究设计的差异而有所不同，临床实践中应结合数据特点和临床需求选择合适的预测算法。

人工智能技术已能通过自动量化影像特征、融合多模态数据实现 AIS 后出血转化的高精度预测，未来需进一步解决模型的泛化性和临床工作流的整合问题，以推动个体化治疗决策。

5　小　结

近年来，随着多模态影像技术的快速发展和人工智能算法的不断创新，AIS 后出血转化的预测和早期诊断取得了重要进展。基于 CT 和 MRI 影像标志物及人工智能模型，AIS 后出血转化预测的准确性和时效性得到了显著提高。总体来说，融合临床表现、影像特征及生物标志物的多参数预测模型的判别性能明显优于单一参数模型，且有更高的泛化能力。未来研究将致力于前瞻性、多中心研究进行验证，推动扫描方案和影像组学特征的标准化。随着多学科交叉研究的深入和临床转化应用的推进，AIS 后出血转化的防治必将迈向更精准、更有效的个体化诊疗新时代。

［参 考 文 献］

［1］ BARTHELS D, DAS H. Current advances in ischemic stroke research and therapies[J]. Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis, 2020, 1866(4): 165260. DOI: 10.1016/j.bbadis.2018.09.012.

［2］ 《中国脑卒中防治报告》编写组.《中国脑卒中防治报告 2020》概要[J]. 中国脑血管病杂志，2022，19(2)：136-144. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2022.02.011.

［3］ 刘颖，丁晶，汪昕，等. 急性缺血性卒中血管内治疗无效再通的研究进展[J]. 中国卒中杂志，2021，16(10)：1067-1074. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5765.2021.10.016.

［4］ 杨概，朱刚明，何银雀，等. 多模态CT 预测前循环急性缺血性卒中患者经机械取栓后出血性转化[J]. 中国介入影像与治疗学，2024，21(4)：211-215. DOI: 10.13929/j.issn.1672-8475.2024.04.005.

［5］ 中华医学会神经病学分会，中华医学会神经病学分会

脑血管病学组. 中国急性脑梗死后出血转化诊治共识2019[J]. 中华神经科杂志，2019，52(4)：252-265. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2019.04.003.

[6] D'ANNA L, FILIPPIDIS F T, HARVEY K, et al. Extent of white matter lesion is associated with early hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke related to atrial fibrillation[J]. Brain Behav, 2021, 11(8): e2250. DOI: 10.1002/brb3.2250.

[7] KIM T J, LEE J S, PARK S H, et al. Short-term glycemic variability and hemorrhagic transformation after successful endovascular thrombectomy[J]. Transl Stroke Res, 2021, 12(6): 968-975. DOI: 10.1007/s12975-021-00895-4.

[8] SILVERMAN A, KODALI S, SHETH K N, et al. Hemodynamics and hemorrhagic transformation after endovascular therapy for ischemic stroke[J]. Front Neurol, 2020, 11: 728. DOI: 10.3389/fneur.2020.00728.

[9] CAPPELLARI M, PRACUCCI G, SAIA V, et al. Predictors for hemorrhagic transformation and cerebral edema in stroke patients with first-pass complete recanalization[J]. Int J Stroke, 2023, 18(10): 1238-1246. DOI: 10.1177/17474930231185690.

[10] HACKE W, KASTE M, BLUHMKI E, et al. Thrombolysis with alteplase 3 to 4.5 hours after acute ischemic stroke[J]. N Engl J Med, 2008, 359(13): 1317-1329. DOI: 10.1056/NEJMoa0804656.

[11] OLTHUIS S G H, PIRSON F A V, PINCKAERS F M E, et al. Endovascular treatment versus no endovascular treatment after 6-24 h in patients with ischaemic stroke and collateral flow on CT angiography (MR CLEAN-LATE) in the Netherlands: a multicentre, open-label, blinded-endpoint, randomised, controlled, phase 3 trial[J]. Lancet, 2023, 401(10385): 1371-1380. DOI: 10.1016/S0140-6736(23)00575-5.

[12] LARRUE V, VON KUMMER R R, MÜLLER A, et al. Risk factors for severe hemorrhagic transformation in ischemic stroke patients treated with recombinant tissue plasminogen activator: a secondary analysis of the European-Australasian Acute Stroke Study (ECASS Ⅱ)[J]. Stroke, 2001, 32(2): 438-441. DOI: 10.1161/01.str.32.2.438.

[13] VON KUMMER R, BRODERICK J P, CAMPBELL B C V, et al. The Heidelberg bleeding classification: classification of bleeding events after ischemic stroke and reperfusion therapy[J]. Stroke, 2015, 46(10): 2981-2986. DOI: 10.1161/STROKEAHA.115.010049.

[14] HOH B L, KO N U, AMIN-HANJANI S, et al. 2023 guideline for the management of patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: a guideline from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. Stroke, 2023, 54(7): e314-e370. DOI: 10.1161/STR.0000000000000436.

[15] CHEN L, XU Z, ZHANG C, et al. Post-ASPECTS based on hyperdensity in NCCT immediately after thrombectomy is an ultra-early predictor of hemorrhagic transformation and prognosis[J]. Front Neurol, 2022, 13: 887277. DOI: 10.3389/fneur.2022.887277.

[16] 张琪，樊凌华. 阿尔伯塔卒中项目早期CT评分和溶栓后出血评分以及相关因素对急性脑梗死溶栓后出血转化的预测价值[J]. 中国中西医结合急救杂志，2017，24(4)：351-354，408. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2017.04.005.

[17] KANG Z, WU L, SUN D, et al. Proximal hyperdense middle cerebral artery sign is associated with increased risk of asymptomatic hemorrhagic transformation after endovascular thrombectomy: a multicenter retrospective study[J]. J Neurol, 2023, 270(3): 1587-1599. DOI: 10.1007/s00415-022-11500-5.

[18] CHRZAN R, GLEŃ A, URBANIK A. Hyperdense middle cerebral artery sign as the only radiological manifestation of hyperacute ischemic stroke in computed tomography[J]. Neurol Neurochir Pol, 2017, 51(1): 33-37. DOI: 10.1016/j.pjnns.2016.10.003.

[19] BANG O Y, SAVER J L, KIM S J, et al. Collateral flow predicts response to endovascular therapy for acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2011, 42(3): 693-699. DOI: 10.1161/STROKEAHA.110.595256.

[20] BALA F, SINGH N, MENON B K, et al. Poor cortical venous opacification on baseline computed tomography angiography predicts parenchymal hemorrhage after thrombectomy[J]. Stroke Vasc Interv Neurol, 2022, 2(6): e000299. DOI: 10.1161/svin.121.000299.

[21] 金雪红，裴少芳，张红，等. 急性缺血性脑卒中血栓负荷的影响因素及其与临床转归的相关性[J]. 中华脑血管病杂志(电子版)，2021，15(5)：308-313. DOI: 10.11817/j.issn.1673-9248.2021.05.007.

[22] YOGENDRAKUMAR V, AL-AJLAN F, NAJM M, et al. Clot burden score and early ischemia predict intracranial hemorrhage following endovascular therapy[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2019, 40(4): 655-660. DOI: 10.3174/ajnr.A6009.

[23] 张哲宇，徐良额，江秉泽，等. 基于CT灌注成像评估侧支循环在急性缺血性脑卒中取栓前后脑梗死进展及预后评估中的应用[J]. 中华神经医学杂志，2021，20(1)：8-15. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20200802-00621.

[24] OTGONBAATAR C, LEE J Y, JUNG K H, et al. Quantifying infarct core volume in ischemic stroke: what is the optimal threshold and parameters of computed tomography perfusion?[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2023, 32(6): 107062. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2023.107062.

[25] SHI F, ZENG Q, GONG X, et al. Quantitative collateral assessment on CTP in the prediction of stroke etiology[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2022, 43(7): 966-971. DOI: 10.3174/ajnr.A7549.

[26] YASSI N, PARSONS M W, CHRISTENSEN S, et al. Prediction of poststroke hemorrhagic transformation using computed tomography perfusion[J]. Stroke, 2013, 44(11): 3039-3043. DOI: 10.1161/STROKEAHA.113.002396.

[27] YOU J, LI X, XIA J, et al. Hypoperfusion intensity ratio and hemorrhagic transformation in patients with successful recanalization after thrombectomy[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2024, 45(10): 1475-1481. DOI: 10.3174/ajnr.A8329.

[28] MILLER M M, WIDEMAN B, KHAN M, et al. Hypoperfusion intensity ratio is associated with early neurologic deficit severity and deterioration after mechanical thrombectomy in large-vessel occlusion ischemic stroke[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2024, 45(7): 879-886. DOI: 10.3174/ajnr.A8234.

[29] 李翔，刘欢，熊秋霞，等. 全脑灌注联合多时相CT血管成像预测大脑中动脉M1段闭塞卒中患者出血转化[J]. 中国医学影像学杂志，2020，28(8)：575-579. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5185.2020.08.004.

[30] CHEN S, ZHANG J, QUAN X, et al. Diagnostic accuracy of dual-energy computed tomography to differentiate intracerebral hemorrhage from contrast extravasation after endovascular thrombectomy for acute ischemic stroke: systematic review and meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2022, 32(1): 432-441. DOI: 10.1007/s00330-021-08212-1.

[31] WANG T, DING W, CHEN Q, et al. Hemorrhagic transformation assessment based on dual energy CT of immediately and twenty-four hours after endovascular thrombectomy for acute ischemic stroke[J]. Diagnostics, 2023, 13(15): 2493. DOI: 10.3390/diagnostics13152493.

[32] 刘克勤，蒋琳，阮婕，等. 基于双能CT的造影剂渗漏征对大动脉闭塞脑梗死出血转化的预测价值[J]. 心脑血管病防治，2020，20(6)：596-598，601. DOI: 10.3969/j.issn.1009-816x.2020.06.013.

[33] QIU T, FENG H, SHI Q, et al. Dual-energy computed tomography (DECT) predicts the efficacy of contrast medium extravasation and secondary cerebral hemorrhage after stent thrombectomy in acute ischemic cerebral infarction[J]. Biotechnol Genet Eng Rev, 2024, 40(1): 202-216. DOI: 10.1080/02648725.2023.2183311.

[34] PINCKAERS F M, MENTINK M M, BOOGAARTS H D, et al. Early post-endovascular treatment contrast extravasation on dual-energy CT is associated with clinical and radiological stroke outcomes: a 10-year single-centre experience[J]. Eur Stroke J, 2023, 8(2): 508-516. DOI: 10.1177/23969873231157901.

[35] BONATTI M, LOMBARDO F, ZAMBONI G A, et al. Iodine extravasation quantification on dual-energy CT of the brain performed after mechanical thrombectomy for acute ischemic stroke can predict hemorrhagic complications[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2018, 39(3): 441-447. DOI: 10.3174/ajnr.A5513.

[36] EL NAWAR R, YEUNG J, LABREUCHE J, et al. MRI-based predictors of hemorrhagic transformation in patients with stroke treated by intravenous thrombolysis[J]. Front Neurol, 2019, 10: 897. DOI: 10.3389/fneur.2019.00897.

[37] GILGEN M D, KLIMEK D, LIESIROVA K T, et al. Younger stroke patients with large pretreatment diffusion-weighted imaging lesions may benefit from endovascular treatment[J]. Stroke, 2015, 46(9): 2510-2516. DOI: 10.1161/STROKEAHA.115.010250.

[38] CAPARROS F, KUCHCINSKI G, DRELON A, et al. Use of MRI to predict symptomatic haemorrhagic transformation after thrombolysis for cerebral ischaemia[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 2020, 91(4): 402-410. DOI: 10.1136/jnnp-2019-321904.

[39] TAO Z, ZHOU F, ZHANG H, et al. Value of MRI T2 FLAIR vascular hyperintensities combined with DWI ASPECTS in predicting the prognosis of acute cerebral infarction with endovascular treatment[J]. Curr Med Imaging, 2023, 19(11): 1273-1278. DOI: 10.2174/1573405619666230201103813.

[40] 李宝娜，杨晓莉，张庆欣，等. 突出的皮质静脉-磁敏感加权评分和分级与高海拔地区缺血性脑卒中出血转化相关性研究[J]. 中华老年心脑血管病杂志，2024，26(8)：942-947. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0126.2024.08.019.

[41] SELIM M, FINK J N, KUMAR S, et al. Predictors of hemorrhagic transformation after intravenous recombinant tissue plasminogen activator: prognostic value of the initial apparent diffusion coefficient and diffusion-weighted lesion volume[J]. Stroke, 2002, 33(8): 2047-2052. DOI: 10.1161/01.str.0000023577.65990.4e.

[42] LIU H, LI T, DING Y, et al. Predictive accuracy of an ADC map for hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke patients after successful recanalization with endovascular therapy[J]. Ann Transl Med, 2022, 10(10): 591. DOI: 10.21037/atm-22-2255.

[43] 张华文，周欣，刘同辉，等. 基于IVIM对急性缺血性脑卒中血管再通治疗后出血转化的预测[J]. 磁共振成像，2019，10(2)：110-114. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2019.02.007.

[44] NAM K W, KWON H M, PARK S W, et al. Distal hyperintense vessel sign is associated with neurological deterioration in acute ischaemic stroke[J]. Eur J Neurol, 2017, 24(4): 617-623. DOI: 10.1111/ene.13259.

[45] LIU D, SCALZO F, RAO N M, et al. Fluid-attenuated inversion recovery vascular hyperintensity topography, novel imaging marker for revascularization in middle cerebral artery occlusion[J]. Stroke, 2016, 47(11): 2763-2769. DOI: 10.1161/STROKEAHA.116.013953.

［46］ LU J, YASSIN M M, GUO Y, et al. Ischemic perfusion radiomics: assessing neurological impairment in acute ischemic stroke[J]. Front Neurol, 2024, 15: 1441055. DOI: 10.3389/fneur.2024.1441055.

［47］ CAMPBELL B C V, CHRISTENSEN S, PARSONS M W, et al. Advanced imaging improves prediction of hemorrhage after stroke thrombolysis[J]. Ann Neurol, 2013, 73(4): 510-519. DOI: 10.1002/ana.23837.

［48］ MISHRA N K, CHRISTENSEN S, WOUTERS A, et al. Reperfusion of very low cerebral blood volume lesion predicts parenchymal hematoma after endovascular therapy[J]. Stroke, 2015, 46(5): 1245-1249. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.008171.

［49］ YU S, LIEBESKIND D S, DUA S, et al. Postischemic hyperperfusion on arterial spin labeled perfusion MRI is linked to hemorrhagic transformation in stroke[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2015, 35(4): 630-637. DOI: 10.1038/jcbfm.2014.238.

［50］ HUANG J, HAO P, CHEN Z, et al. Quantitative assessment of hyperperfusion using arterial spin labeling to predict hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke patients with mechanical endovascular therapy[J]. Eur Radiol, 2024, 34(1): 579-587. DOI: 10.1007/s00330-023-10007-5.

［51］ LI M, LV Y, WANG M, et al. Magnetic resonance perfusion-weighted imaging in predicting hemorrhagic transformation of acute ischemic stroke: a retrospective study[J]. Diagnostics, 2023, 13(22): 3404. DOI: 10.3390/diagnostics13223404.

［52］ POTRECK A, SEKER F, HOFFMANN A, et al. A novel method to assess pial collateralization from stroke perfusion MRI: subdividing T_{max} into anatomical compartments[J]. Eur Radiol, 2017, 27(2): 618-626. DOI: 10.1007/s00330-016-4415-2.

［53］ NAGARAJA N, TASNEEM N, SHABAN A, et al. Cerebral microbleeds are an independent predictor of hemorrhagic transformation following intravenous alteplase administration in acute ischemic stroke[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2018, 27(5): 1403-1411. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.12.044.

［54］ YAN J, QIU J, WU X, et al. Pretreatment cerebral microbleeds and symptomatic intracerebral hemorrhage post-thrombolysis: a systematic review and meta-analysis[J]. J Neurol, 2020, 267(2): 301-307. DOI: 10.1007/s00415-018-9156-5.

［55］ LIU J, WANG D, LI J, et al. Cerebral microbleeds do not predict hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke patients with atrial fibrillation and/or rheumatic heart disease[J]. Curr Neurovasc Res, 2017, 14(2): 104-109. DOI: 10.2174/1567202614666170313111251.

［56］ DANNENBERG S, SCHEITZ J F, ROZANSKI M, et al. Number of cerebral microbleeds and risk of intracerebral hemorrhage after intravenous thrombolysis[J]. Stroke, 2014, 45(10): 2900-2905. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.006448.

［57］ WILSON D, AMBLER G, LEE K J, et al. Cerebral microbleeds and stroke risk after ischaemic stroke or transient ischaemic attack: a pooled analysis of individual patient data from cohort studies[J]. Lancet Neurol, 2019, 18(7): 653-665. DOI: 10.1016/S1474-4422(19)30197-8.

［58］ LIU Y L, XIAO W M, LU J K, et al. Asymmetrical cortical vessel sign predicts prognosis after acute ischemic stroke[J]. Brain Behav, 2020, 10(7): e01657. DOI: 10.1002/brb3.1657.

［59］ BU J, HAN X, WU Y, et al. Correlation between asymmetrical vein sign of SWI and long-term clinical outcomes in patients with middle cerebral artery ischemic stroke[J]. Jpn J Radiol, 2024, 42(10): 1122-1129. DOI: 10.1007/s11604-024-01596-2.

［60］ KISHI S, MAEDA M, KOGUE R, et al. SWI brush sign of cerebral parenchymal veins in central nervous system diseases[J]. Jpn J Radiol, 2025, 43(5): 726-735. DOI: 10.1007/s11604-024-01723-z.

［61］ 徐超，陈智才，唐欢，等. 磁敏感加权成像毛刷征预测急性缺血性卒中患者静脉溶栓后出血转化的意义[J]. 浙江大学学报（医学版），2015，44（6）：625-631. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9292.2015.11.05.

［62］ LU X, MENG L, ZHOU Y, et al. Quantitative susceptibility-weighted imaging may be an accurate method for determining stroke hypoperfusion and hypoxia of penumbra[J]. Eur Radiol, 2021, 31(8): 6323-6333. DOI: 10.1007/s00330-020-07485-2.

［63］ ZHAI H, LIU Z, WU S, et al. Predictive value of magnetic resonance imaging-based texture analysis for hemorrhage transformation in large cerebral infarction[J]. Front Neurosci, 2022, 16: 923708. DOI: 10.3389/fnins.2022.923708.

［64］ JIANG L, ZHOU L, YONG W, et al. A deep learning-based model for prediction of hemorrhagic transformation after stroke[J]. Brain Pathol, 2023, 33(2): e13023. DOI: 10.1111/bpa.13023.

［65］ ISSAIY M, ZAREI D, KOLAHI S, et al. Machine learning and deep learning algorithms in stroke medicine: a systematic review of hemorrhagic transformation prediction models[J]. J Neurol, 2024, 272(1): 37. DOI: 10.1007/s00415-024-12810-6.

［66］ CHOI J M, SEO S Y, KIM P J, et al. Prediction of hemorrhagic transformation after ischemic stroke using machine learning[J]. J Pers Med, 2021, 11(9): 863. DOI: 10.3390/jpm11090863.

［本文编辑］　杨亚红