

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20260079

• 专题报道 •

## 急性缺血性脑卒中血栓影像学评估新进展

金韵, 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)是我国成人致死、致残的首位病因,其治疗的关键在于快速实现血管再通。血栓作为AIS的主要病理因素,其位置、长度、成分、渗透性及负荷程度等特征直接影响治疗决策、手术策略和临床预后。本文系统综述AIS血栓影像学评估方法的最新研究进展,重点阐述CT、MRI等在识别血栓征象以及血栓评估在鉴别卒中病因、预测静脉溶栓与机械取栓治疗反应中的价值,并展望影像组学与深度学习在解析血栓异质性、构建预后预测模型方面的应用前景。现代影像学通过多模态、跨尺度的精细化评估,推动AIS治疗从传统“时间窗”依赖模式向以“组织窗”和“血栓特征”为核心的个体化模式转变,成为实现AIS精准诊疗的有力支撑。

**[关键词]** 急性缺血性脑卒中; 血栓; 影像学评估; 计算机断层摄影术; 磁共振成像; 影像组学

**[引用本文]** 金韵, 田冰. 急性缺血性脑卒中血栓影像学评估新进展[J]. 海军军医大学学报, 2026, 47(4): 466-474. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20260079.

### Advances in imaging assessment of thrombus in acute ischemic stroke

JIN Yun, TIAN Bing\*

Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

**[Abstract]** Acute ischemic stroke (AIS) is the leading cause of adult mortality and disability in China and its treatment lies in rapid revascularization. As the key pathological factor in AIS, thrombus characteristics (such as location, length, composition, permeability, and burden) profoundly influence treatment decisions, interventional strategies, and clinical outcomes. This review systematically summarizes recent advances in imaging assessment for AIS thrombi, highlighting the value of CT and MRI in identifying thrombus signs, as well as the role of thrombus evaluation in differentiating stroke etiology and predicting responses to intravenous thrombolysis and mechanical thrombectomy. It also prospects the promising potential of radiomics and deep learning in characterizing thrombus heterogeneity and developing predictive models. Ultimately, we propose that modern imaging, through multimodal and multiscale refined assessment, is shifting AIS treatment from the traditional “time window”-dependent mode to an individualized paradigm centered on “tissue window” and “thrombus characteristics”, thereby serving as a key driver of precision diagnosis and treatment.

**[Key words]** acute ischemic stroke; thrombus; imaging assessment; computed tomography; magnetic resonance imaging; radiomics

**[Citation]** JIN Y, TIAN B. Advances in imaging assessment of thrombus in acute ischemic stroke[J]. Acad J Naval Med Univ, 2026, 47(4): 466-474. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20260079.

急性缺血性脑卒中(acute ischemic stroke, AIS)具有高发病率、高复发率、高致残率、高死亡率等特点,随着人口老龄化及高血压、糖尿病等危险因素的高发流行,AIS治疗给患者家庭带来

沉重的经济负担<sup>[1]</sup>。当前国际上广泛使用的Org 10172急性脑卒中治疗试验(Trial of Org 10172 in Acute Stroke Treatment, TOAST)分型按照病因将AIS分为大动脉粥样硬化型、心源性栓塞型、小动

[收稿日期] 2026-01-31 [接受日期] 2026-03-11

[基金项目] 上海市卫生健康委员会临床研究面上项目(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),国家自然科学基金(82572183)。Supported by Clinical Research General Program of Shanghai Municipal Health Commission (202340057), Project for Clinical Research of The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (2024LYC08), Project for Basic Research of The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (2023PY46), and National Natural Science Foundation of China (82572183).

[作者简介] 金韵, 硕士生. E-mail: 1574738484@qq.com

\*通信作者( Corresponding author ). E-mail: tianbing2003@163.com

脉闭塞型、其他明确病因型和不明原因型5种,其中最常见的是大动脉粥样硬化型和心源性栓塞型<sup>[2]</sup>。Niesten等<sup>[3]</sup>研究发现,大动脉粥样硬化性血栓的红细胞比例最高,这是因为不稳定斑块发生破裂出血首先激活血小板形成血栓,继而造成管腔狭窄,致使血流减慢、红细胞大量瘀滞,最终形成以红细胞为主的混合血栓。心源性栓塞性血栓则在血流缓慢的心脏中形成,其原因主要包括心房颤动、心肌梗死、心力衰竭等,此类血栓含有较多的血小板与纤维蛋白<sup>[4]</sup>。血栓的成分与治疗 and 预后息息相关,静脉溶栓及血管内治疗是目前AIS的2种标准治疗方法。富含红细胞的血栓纤维蛋白网疏松,利于阿替普酶渗透与纤维蛋白降解,更易被溶解;而富含血小板与纤维蛋白的血栓纤维蛋白网致密,对阿替普酶反应不佳,因此首选机械取栓。同时,AIS的预后还受血栓位置、侧支循环等因素影响,是一个复杂的过程<sup>[4-5]</sup>。影像学检查作为AIS首选的无创检查方法,其价值已远超单纯的“诊断”与“定位”。如何利用日益丰富的影像学技术实现对血栓本身特征(如成分、来源、机械性质)的精细化、无创评估,并将其与组织窗信息整合,以指导个体化血管再通策略,是当前卒中影像学研究的核心前沿。本文系统梳理影像学技术在血栓评估中的原理与应用进展,并深入探讨血栓评估如何赋能AIS的精准诊疗。

## 1 AIS血栓的影像学评估

### 1.1 CT

1.1.1 平扫CT(non-contrast CT, NCCT) NCCT是脑卒中首选的影像学检查方法<sup>[6]</sup>,其核心优势在于可以快速鉴别缺血性与出血性脑卒中,避免因错误治疗导致病情恶化。尽管NCCT不能直接显示血栓本身,但可通过一些间接征象提示可能存在的大血管闭塞,指导后续检查方案的选择。在NCCT中,血栓因富含红细胞且铁的原子序数较高,致使X线吸收增加,呈现高密度动脉征(hyperdense artery sign),表现为受累血管走行区的局限性高密度影<sup>[7]</sup>。Boodt等<sup>[8]</sup>的研究显示,非心源性栓塞型脑卒中患者的高密度动脉征发生率(70%)显著高于心源性栓塞型脑卒中(51%),表明高密度动脉征是鉴别脑卒中病因的重要影像学征象。Alberta脑卒中计划早期计算机断层扫描评分(Alberta

Stroke Program early computed tomography score, ASPECTS)是一种基于NCCT的半定量评分系统,用于评估AIS早期大脑中动脉供血区缺血性改变的范围和程度,是辅助临床治疗决策的关键影像学依据之一<sup>[9]</sup>。

1.1.2 CT血管成像(CT angiography, CTA) 根据指南,对于符合机械取栓条件或疑似大血管闭塞的患者,必须尽快行CTA检查,甚至在静脉溶栓期间或者肾功能不明确的情况下也可酌情进行<sup>[10]</sup>。相较于NCCT,CTA扫描范围更广,也能够清晰显示闭塞的血管段,还可通过软件对血栓的长度、密度、体积进行精确计算<sup>[11-15]</sup>,指导治疗策略。血栓渗透性是描述血栓内部允许血液和造影剂穿透能力的指标,用来衡量血栓疏松程度,间接判断血栓成分,可以通过NCCT和CTA上同一血栓的CT值(HU)之差来量化<sup>[14,16]</sup>。血栓负荷评分(clot burden score)是一种基于CTA的半定量评分系统,可用于评估前循环AIS患者的颅内血栓负荷程度,它不仅能反映闭塞血管部位,还可以体现总体血栓范围,有助于评估溶栓治疗后出血转化风险<sup>[17]</sup>。

1.1.3 CT灌注成像(CT perfusion, CTP) CTP是一种准确、多参数的功能影像学检查方法,其主要参数包括脑血容量(cerebral blood volume,单位体积脑组织中所含血液的总体积)、脑血流量(cerebral blood flow,单位时间内流经单位质量脑组织的血流量)、平均通过时间(mean transit time,血液从动脉端流经脑组织毛细血管至静脉端的平均时间)、达峰时间(time to peak,从造影剂首次到达成像脑区的主要动脉开始至其浓度达到峰值所需的时间)<sup>[18]</sup>。CTP检查最大的价值在于可以量化缺血核心和半暗带,评估血栓导致的脑组织坏死程度,指导临床治疗决策<sup>[19]</sup>。CTP存在后处理依赖性强、辐射剂量较大等局限性。Wang等<sup>[20]</sup>研究表明,在预测AIS患者临床结局方面,CTP参数的预后判断能力与多时相CTA相比差异无统计学意义,提示在必要时CTP可作为一种可靠的替代方案。

1.1.4 双能CT(dual-energy CT, DECT) 钙化伪影(尤其是开花伪影)会严重影响血管狭窄程度的评估,而DECT利用钙、碘、软组织之间K-edge值的差异,通过三物质分解算法生成虚拟去钙图像,从而消除钙化斑块对血管腔的遮挡和干扰,

提高血栓的检出率<sup>[21]</sup>。在脑卒中患者接受再通治疗后,血脑屏障的破坏导致常规CT难以区分高密度区域为出血还是造影剂滞留,DECT则可通过碘图(iodine overlay map)和虚拟平扫(virtual non-contrast)图像实现准确区分,避免进行错误的临床操作。Tijssen等<sup>[22]</sup>研究证实,DECT对出血的阳性预测值和准确率均显著高于普通CT(100% vs 25%、89% vs 63%)。

## 1.2 MRI

1.2.1 T1加权成像(T1 weighted imaging, T1WI)、T2加权成像(T2 weighted imaging, T2WI)和液体抑制反转恢复(fluid attenuated inversion recovery, FLAIR)序列 T1WI和T2WI作为MRI的常规序列,在评估AIS中的作用有限,仅起到辅助和排除作用。T1WI最主要的作用是排除出血灶,如在亚急性期,由于细胞内正铁血红蛋白含量增加,血肿表现为高信号,有助于鉴别诊断;T1WI对不同软组织结构有良好的对比度,可以较为清晰地显示脑解剖结构,但对于梗死灶信号的变化不灵敏;大动脉急性闭塞时,部分血栓在T1WI表现为高信号,类似于CT的高密度动脉征,但不如在CT上常见和可靠<sup>[23]</sup>。

T2WI的主要作用是显示梗死的位置和范围,脑细胞缺血后,能量代谢衰竭导致细胞毒性水肿,随后血脑屏障破坏,出现血管源性水肿,组织内自由水增加,水肿组织在T2WI上表现为高信号,有助于判断责任病灶,间接推断血栓的存在,这种改变通常在发病6h后才可发现<sup>[23-24]</sup>。

FLAIR序列是基于T2WI的一种特殊序列,通过抑制自由水的信号使脑脊液呈低信号,增加病灶与正常组织对比,在显示病灶方面比常规T2WI更优。在FLAIR序列图像上,闭塞动脉的远端血管内血流缓慢,脱氧血红蛋白比例增加,表现为线性高信号,这是血栓导致血流动力学改变的间接征象,提示大血管闭塞。Huang等<sup>[25]</sup>研究显示,FLAIR序列图像上的高信号血管征象是90d良好神经功能预后的一个独立、有力的预测指标( $OR=0.049$ )。

1.2.2 弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)和表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)图像 DWI是诊断早期梗死灶最可靠的序列,它对细胞毒性水肿高度灵敏,在发病数分钟内即表现为高信号,研究表明,DWI在AIS发病72h

内灵敏度高达96.4%<sup>[26]</sup>;尽管如此,DWI仍存在漏诊(后循环病灶、小病灶、超早期病灶等)和误诊(感染、肿瘤等)的情况,例如在血管源性水肿严重的区域,由于组织内总水分量显著增加,会在DWI上呈现出高信号,这种现象被称为“T2透过效应”(T2 shine-through),此时需要借助ADC图像。

ADC图像是通过DWI序列采集到的数据计算而来,用于量化水分子在组织内的扩散难易程度。在ADC图像上AIS表现为低信号,与DWI联合应用有助于排除假性弥散受限<sup>[27]</sup>。DWI和ADC图像的主要观测对象是脑实质,不能清晰地显示血栓,但可以根据异常信号间接推测血栓的存在。血栓机化过程中,其结构演变可引起相应DWI信号变化。研究表明,ADC值随血栓演变呈动态变化,中间机化期血栓的ADC值最高,与磁化转移成像(magnetization transfer imaging)联合使用可精准识别富含纤维蛋白的血栓(灵敏度87.5%,特异度83.3%)<sup>[28]</sup>。

1.2.3 磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)和定量磁敏感成像(quantitative susceptibility mapping, QSM) SWI是一种基于三维梯度回波T2加权序列的高分辨率MRI技术,能够灵敏地检测血栓内顺磁性物质(脱氧血红蛋白、含铁血黄素等)引起的局部磁场不均匀,该技术通过质子失相位效应使血栓在T2WI上呈显著的低信号区,即磁敏感血管征(susceptibility vessel sign, SVS)<sup>[29]</sup>。研究表明,SVS在大脑中动脉M1段闭塞中表现出非常好的血栓诊断效能(准确度92%,灵敏度85%,特异度100%)<sup>[30]</sup>。Dillmann等<sup>[31]</sup>发现,SVS阳性患者血栓中的红细胞比例显著高于SVS阴性患者,并且由于磁敏感伪影的“晕染效应”(blooming effect),低信号区常大于实际血栓尺寸,且其范围与红细胞含量呈正相关,这表明SVS可辅助判断脑卒中类型。值得注意的是,新鲜血栓的主要成分是氧合血红蛋白,顺磁效应有限,导致SVS的识别存在困难;另外,颅底磁敏感伪影的存在也可能造成SVS假阴性。此时可采用三维黑血(three-dimensional black blood)MRI增强成像,它可以区分动脉管壁和管腔,能够更好地检测血栓<sup>[32]</sup>。

QSM是一种定量MRI技术,它通过解析SWI

的原始相位数据并进行计算,可得出反映组织磁化率分布的图像,从而实现对组织成分的精确量化。红色血栓富含顺磁性的脱氧血红蛋白,其磁化率远高于以血小板和纤维蛋白为主的白色血栓,QSM可以通过测量两者的磁化率并将这种物理性质的差异量化显像,从而区分血栓成分。研究发现红色血栓的平均磁化率显著高于白色血栓,表明QSM可在术前无创评估血栓成分,为再灌注治疗策略的选择提供重要依据<sup>[33]</sup>。

**1.2.4 对比增强磁共振血管成像 (contrast enhanced magnetic resonance angiography, CE-MRA)** CE-MRA的核心价值在于无创显示血管腔。当血栓导致血管狭窄或闭塞时,CE-MRA能快速定位责任血管并评估狭窄的程度和范围。与此同时,CE-MRA可辅助判断病因与预后:心源性栓子随血流移动,容易卡在血管弯曲或分叉处,并且由于管壁本身没有病变,取栓后管腔多恢复正常;而动脉粥样硬化斑块破裂形成的原位血栓可引发局限性狭窄,常位于动脉中段,取栓后管腔狭窄依然存在<sup>[34]</sup>。此外,时间飞跃磁共振血管成像 (time-of-flight magnetic resonance angiography, TOF-MRA) 是一种无需造影剂且分辨率高的成像方式,对于快速血流的检测十分灵敏,适合筛查脑动脉病变,但扫描时间长、范围有限、易产生血流伪影且对慢血流不灵敏,可与CE-MRA互补,作为重要的筛查工具<sup>[35]</sup>。两者共同的局限性在于无法直接显示管壁以及分析血栓成分,且可能因血管正性重构而漏诊非狭窄性病变,其判断也易受慢血流及侧支循环干扰。

**1.2.5 高分辨率血管壁成像 (high-resolution vessel wall imaging, HR-VWI)** 流动的血液是MRI的主要伪影来源之一,影响血管壁观察。传统血管成像技术如CTA和磁共振血管成像 (magnetic resonance angiography, MRA) 等,仅能显示血管管腔的狭窄或闭塞,无法明确病因,而基于三维黑血技术的HR-VWI能够抑制血流信号,直接显示血管壁的结构,其不仅能识别血栓,还能通过分析血栓的形态、位置及其与血管壁的关系推断病因<sup>[36]</sup>。动脉粥样硬化斑块成分复杂,T2WI信号通常不均匀;斑块内出血则表现为T1WI高信号(信号强度高于参考肌肉信号的1.5倍),且管壁呈偏心性增厚伴明显强化,是斑块易损和血栓形成的重要标志<sup>[37]</sup>。对于动脉夹层,HR-VWI能清晰地、多层

面地显示壁内血肿(即存在于血管壁内的血栓),呈典型的偏心性T1WI高信号,与低信号的血管壁形成鲜明对比,且增强后呈轻至中度强化<sup>[38]</sup>。在动脉瘤评估中,HR-VWI能直接显示动脉瘤内的血栓,其中稳态自由进动 (steady-state free precession) 序列为最佳技术,它凭借血栓与流动血液及脑脊液之间的卓越对比度清晰勾勒血栓形态。在稳态自由进动序列和T1WI上,血栓呈中高信号。Martin等<sup>[39]</sup>发现,约44%的患者在近动脉瘤壁侧出现特征性的外周高信号环,提示血栓处于动态重塑状态。血管炎是管壁本身的病变,虽可引起管腔狭窄,但其具有典型同心圆状、均匀强化的表现,可与血栓鉴别<sup>[40]</sup>。HR-VWI是一种革命性的血管成像技术,除管腔成像外,还能直接评估管壁病变,显著提升了临床对颅内血管病变的诊断与鉴别能力。

**1.3 影像组学与深度学习** 影像组学通过对医学影像 (CT、CTA、DECT、MRI等) 进行高通量特征提取、定量化和机器学习建模,捕捉血栓形态、密度、纹理、渗透性等方面人眼难以辨识的信息,为血栓的成分、来源判断及治疗选择提供客观依据,在AIS的早期识别、治疗策略优化和预后预测方面展现出巨大潜力。传统AIS影像组学多聚焦于脑组织本身(如半暗带)<sup>[41-42]</sup>,而血栓影像组学则将分析目标转向了责任血栓本身。它主要基于NCCT上的高密度动脉征或CTA上的血栓本身特征,通过提取人眼无法分辨的定量特征,揭示血栓的内在异质性,目前在AIS中的应用主要集中于预测血栓成分与病理类型、预测首次取栓效果与手术难度以及预测临床预后等方面。

Jiang等<sup>[43]</sup>开展的一项多中心回顾性研究基于CTA构建影像组学模型,用来区分心源性栓塞型与大动脉粥样硬化型脑卒中,AUC值达到了0.838。Sommer等<sup>[44]</sup>的单中心回顾性研究基于CTA影像组学深度学习模型预测大血管闭塞性脑卒中术后3个月的功能结局,在独立测试集中AUC值达到了0.86。上述2项研究显示影像组学与深度学习的潜在应用价值,但都存在模型泛化能力不足、生物学可解释性差等问题,其根本原因是仅使用血栓影像组学进行病因及预后预测,未探究血栓影像组学特征背后的血栓异质性本质。最近的一项多中心回顾性研究建立了基于DECT的血栓异质性影像组学模型,其预测脑卒中病因和90d临床结局的AUC

值分别达到了 0.923 和 0.869, 但是 DECT 并不能作为 AIS 患者急诊影像学检查的首选<sup>[45]</sup>。目前影像组学在 AIS 中的应用仍存在以下局限: 首先, 多数研究仅基于影像组学或临床特征, 缺乏与组织病理学的关联验证, 导致模型的生物学可解释性不足; 其次, 多数研究为单中心回顾性研究, 模型泛化能力有限, 其结论有待更大样本量的外部验证; 最后, 现有研究多关注脑组织或斑块特征, 直接针对血栓本身的研究较为缺乏。多模态数据融合、跨尺度信息关联以及人工智能技术的深度融合, 将成为未来 AIS 精准诊疗研究的主要方向。

## 2 AIS 血栓评估的临床意义

AIS 治疗的关键在于快速实现血管再通, 影像学评估正成为 AIS 再通方式决策、器械选择及预后预测的关键依据。现代影像学技术通过明确闭塞位置决定治疗方式, 通过评估脑组织状态权衡治疗获益与风险, 通过解析血栓的位置、长度、成分、渗透性等特征辅助规划手术策略, 还可根据各类指标预测预后, 从而推动 AIS 治疗从经验驱动向个体化精准评估迈进。

**2.1 辅助治疗决策** 指南推荐, 对于发病 4.5 h 内的 AIS 患者, 应在排除禁忌证后尽快予静脉溶栓治疗<sup>[10]</sup>。对于发病时间不明的患者(如醒后卒中), DWI-FLAIR 不匹配是一种有潜力的影像学标志, 其含义是 DWI 已明确显示的缺血病灶在 FLAIR 上相应区域信号无显著增高, 表明缺血病灶仍新鲜, 能用于筛选可能处于发病 4.5 h 内的患者, 对避免延误治疗导致症状加重尤为重要; 但 DWI-FLAIR 不匹配的灵敏度有限, 仍需结合其他 MRI 指标以提高识别能力<sup>[46]</sup>。灌注-弥散不匹配是指低灌注区域的体积显著大于弥散受限区域, 即存在可挽救的缺血半暗带。EXTEND 试验证实, 对于在发病 4.5~9 h 内通过灌注成像确认存在灌注-弥散不匹配的患者, 静脉溶栓仍能带来获益<sup>[47]</sup>; 此外, TRACE-III 试验证实了替奈普酶对于存在灌注-弥散不匹配但因条件限制无法接受血管内治疗的前循环大血管闭塞患者的治疗作用, 且静脉溶栓的时间窗可进一步延长至 24 h<sup>[48]</sup>。对于大血管闭塞患者, 血管内治疗的效果得到了最高等级的证据支持<sup>[10]</sup>, 因此对于 CTA 或 MRA 确定的大血管闭塞患者应积极行血管内治疗。DEFUSE 3 和 DAWN 试验均

证实, 经过影像学筛选的灌注-弥散不匹配患者取栓时间窗可从传统的 6 h 内延长至 6 h 后(分别至 16 h 和 24 h)<sup>[49-50]</sup>。由此可见, AIS 的治疗方式选择已从单纯依赖“时间窗”模式转变为以“组织窗”为核心的个体化决策模式, 通过评估是否存在可挽救的脑组织, 突破传统的时间限制, 为患者争取更多获益。

**2.2 规划手术策略** 血管内治疗主要有支架取栓、接触抽吸取栓等方式, 血栓密度和渗透性是影响取栓策略的重要因素。Ye 等<sup>[51]</sup>研究表明, 支架取栓器更易取出高密度血栓, 而接触抽吸更易取出低密度血栓, 原因可能与组织学成分有关, 高密度血栓富含红细胞, 质地较软、疏松, 有更充分的灌注, 对溶栓药物反应较好, 易于支架嵌入和取出; 而低密度血栓富含纤维蛋白, 质地较硬, 接触性抽吸方式对血栓清除效果更好<sup>[4]</sup>。当血栓评估存在困难时, 联合取栓技术可作为备选方案。

血栓渗透性可以通过 CTA 上的“半月征”来衡量, 是指血栓未完全贴附血管壁, 周围存在空隙, 使通过的造影剂呈半月形、边缘状或“鸟嘴样”填充, 与心源性栓塞高度相关。Nie 等<sup>[52]</sup>针对急性大脑中动脉闭塞患者的“半月征”进行研究, 发现渗透性良好的血栓适用于接触抽吸取栓, 原因是渗透性高可使血流及其携带的氧气送往远端脑组织, 有助于改善预后。此外, 血栓渗透性与侧支循环状态有关, 血栓渗透性高的患者若同时具备良好侧支循环, 则可能有更好的再灌注治疗效果与预后; 侧支循环差的患者即使血栓渗透性高, 其预后改善仍可能有限<sup>[53]</sup>。

**2.3 评估患者预后** 血栓长度和位置是影响静脉溶栓和血管内治疗患者预后的重要因素。Kamalian 等<sup>[54]</sup>研究证实, 血栓长度 $\geq 8$  mm 是静脉溶栓治疗抵抗的关键预测指标, 并且血栓长度与闭塞部位呈强相关性, 在颈内动脉末端、大脑中动脉 M1 段和 M2 段闭塞中, 血栓长度 $\geq 8$  mm 的比例分别为 94%、73% 和 22%。Ohara 等<sup>[55]</sup>研究发现, 随着血栓从颈内动脉向远端血管逐渐移动, 再通可能性逐渐增加。换言之, 不同部位的血栓长度具有差异, 对静脉溶栓的反应也不相同。血栓长度也会受到侧支循环影响, 侧支循环充盈缓慢会导致血栓长度增加<sup>[56]</sup>。此外, Dutra 等<sup>[57]</sup>研究表明, 血栓长度每增加 1 mm, 血管内治疗手术时间延长 7~8 min; 与

颈内动脉血栓相比,大脑中动脉M1段的血管内治疗手术时间缩短14~15 min。首次通过效应(first-pass effect, FPE)是指在使用机械取栓装置治疗大动脉闭塞性AIS时,首次尝试取栓即实现血管成功再通。早期研究曾认为血栓密度、渗透性和长度等可预测FPE,但Byun等<sup>[58]</sup>研究显示血栓影像特征与FPE无显著相关性,而血栓长度与远端栓塞并发症显著相关,可作为预测远端栓塞风险的潜在指标。

血栓负荷评分是AIS患者预后预测的可靠指标,其分值越低代表血栓负荷越重、预后越差。ASTER试验表明,血栓负荷评分 $\geq 7$ 分的患者血管再通率明显高于血栓负荷评分 $\leq 6$ 分的患者,并且90 d良好功能结局的比例更高<sup>[59]</sup>。还有研究表明,血栓负荷评分越低的患者梗死面积越大,出血风险越高<sup>[17]</sup>。

侧支循环状态是影响AIS预后的重要因素,可以通过单时相和多时相CTA评估。区域软脑膜侧支评分(regional leptomeningeal collateral score)是基于单时相CTA对软脑膜侧支代偿状态进行的区域性评分,可反映静态侧支状态。Nambiar等<sup>[60]</sup>研究证明,侧支状态是血管内治疗效果的关键调节因素,侧支代偿良好或中等的患者若实现血管再通,可能有更好的临床结局。ESCAPE试验采用了多时相CTA进行侧支评估,它通过捕捉侧支血流的动态充盈过程弥补了单时相CTA可能遗漏需要延迟扫描才能显示侧支循环的不足,能够更精准地筛选出即使就诊时间稍晚但仍有可挽救脑组织的患者<sup>[61]</sup>。

### 3 当前挑战与争议

尽管血栓影像学评估技术取得了显著进展,并在临床决策中发挥着日益重要的作用,其在实际应用中仍面临若干挑战与争议。

3.1 各影像学技术评估血栓成分和特征的标准尚未统一 目前,CT、MRI等不同影像学技术均可用于血栓成分和特征的间接评估,如通过CT值推测红细胞比例、通过SWI/QSM识别顺磁性物质以区分不同类型血栓<sup>[7,31,33]</sup>。然而,不同设备、扫描协议、后处理方法及测量标准之间存在差异,导致各中心数据难以直接比较与整合。例如,血栓渗透性作为一个有潜力的影像学生物标志物,其量化方

法目前呈现多元化、非标准化的特点,尚未形成临床广泛接受的评估标准<sup>[14,16,52]</sup>。这种标准化缺失限制了影像学参数在AIS跨中心研究及临床应用中的广泛采纳,未来亟须开展技术标准化建设、多中心验证与临床整合研究。

3.2 影像组学模型可解释性与临床转化之间的鸿沟 影像组学与深度学习在血栓特征挖掘和预后预测中表现出优越性能(如Jiang等<sup>[43]</sup>模型AUC值达0.838, Sommer等<sup>[44]</sup>建立的模型AUC值达0.86)。然而,大多数模型仍为回顾性研究,模型的泛化能力受限于单中心、小样本数据,且模型多为“黑箱”,缺乏明确的病理生理学解释。医生难以理解模型依据哪些影像特征做出决策,从而降低了其临床可信度与接受度。此外,虽有研究尝试将血栓异质性与组织学关联<sup>[45]</sup>,但如何将影像特征转化为指导治疗的直观、可操作指标,仍是制约临床转化的瓶颈。

3.3 关于血栓特征与取栓方式选择的争议 尽管部分研究提示血栓影像特征可能影响取栓策略选择,如Ye等<sup>[51]</sup>指出高密度血栓更适于支架取栓,低密度血栓更适于接触抽吸;Nie等<sup>[52]</sup>认为渗透性好的血栓可能更适合接触抽吸取栓。但这些结论尚未形成共识。Byun等<sup>[58]</sup>研究发现血栓影像特征与FPE无显著相关性,提示其预测取栓效率的价值可能有限。此外,血栓长度对治疗方式的影响亦存争议。Kamalian等<sup>[54]</sup>认为血栓长度 $\geq 8$  mm是静脉溶栓治疗抵抗的预测指标。但血栓长度受侧支循环状态影响显著,且其在动脉不同节段中的临床意义可能不同<sup>[56]</sup>。这些争议反映出血栓特征与取栓方式之间关系的复杂性,未来仍需开展前瞻性、多中心研究以明确各类特征对手术策略的具体指导价值。

### 4 总结和展望

本文通过系统梳理AIS血栓影像学评估的现状与前沿,概括出以下3点核心结论:评估维度的深化、技术路径的融合与临床决策的精准化。首先,现代影像技术已超越单纯显示血栓位置,能无创评估其成分、渗透性、异质性等,为理解血栓生物学特性提供全面信息。其次,多模态影像技术的互补与融合构成了全面评估血栓的基石,不同检查方式各具优势,未来的方向是将这些不同尺度的信息进行整合。最后,这些技术进步都服务于一个目标,

即实现个体化、精准化的临床决策。影像学评估使 AIS 治疗从僵化的“时间窗”依赖模式转变为以“组织窗”和“血栓特征”为核心的个体化模式,有助于筛选出超时间窗但仍可能获益的患者,从而指导再灌注方式决策、器械选择和手术规划,最大化治疗效益,改善患者预后。未来研究方向可能包括:建立基于多中心、前瞻性数据的血栓影像特征标准化采集与报告体系;开发嵌入临床工作流的实时人工智能决策支持系统,将血栓特征、组织窗与临床信息自动整合,输出个体化治疗推荐概率;探索影像基因组学,揭示血栓异质性背后的分子生物学机制等。

### [参考文献]

- [1] 《中国脑卒中防治报告 2021》编写组.《中国脑卒中防治报告 2021》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2023, 20(11): 783-792, 封3. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2023.11.009.
- [2] ADAMS H P Jr, BILLER J. Classification of subtypes of ischemic stroke: history of the Trial of Org 10172 in Acute Stroke Treatment classification[J]. Stroke, 2015, 46(5): e114-e117. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.007773.
- [3] NIESTEN J M, VAN DER SCHAAF I C, VAN DAM L, et al. Histopathologic composition of cerebral thrombi of acute stroke patients is correlated with stroke subtype and thrombus attenuation[J]. PLoS One, 2014, 9(2): e88882. DOI: 10.1371/journal.pone.0088882.
- [4] BYRNES J R, WOLBERG A S. Red blood cells in thrombosis[J]. Blood, 2017, 130(16): 1795-1799. DOI: 10.1182/blood-2017-03-745349.
- [5] HO-TIN-NOÉ B, DESILLES J P, MAZIGHI M. Thrombus composition and thrombolysis resistance in stroke[J]. Res Pract Thromb Haemost, 2023, 7(4): 100178. DOI: 10.1016/j.rpth.2023.100178.
- [6] 中华医学会影像技术分会. 急性卒中多层螺旋 CT 检查技术专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(9): 839-845. DOI: 10.3760/cma.j.cn112149-20191226-01008.
- [7] BENSON J C, KALLMES D F, LARSON A S, et al. Radiology-pathology correlations of intracranial clots: current theories, clinical applications, and future directions[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2021, 42(9): 1558-1565. DOI: 10.3174/ajnr.A7249.
- [8] BOODT N, COMPAGNE K C J, DUTRA B G, et al. Stroke etiology and thrombus computed tomography characteristics in patients with acute ischemic stroke: a MR CLEAN registry substudy[J]. Stroke, 2020, 51(6): 1727-1735. DOI: 10.1161/STROKEAHA.119.027749.
- [9] ESMAEL A, ELSHERIEF M, ELTOUKHY K. Prevalence of cognitive impairment in acute ischaemic stroke and use of Alberta Stroke Programme early CT score (ASPECTS) for early prediction of post-stroke cognitive impairment[J]. Neurol Neurochir Pol, 2021, 55(2): 179-185. DOI: 10.5603/PJNNS.a2021.0006.
- [10] POWERS W J, RABINSTEIN A A, ACKERSON T, et al. Guidelines for the early management of patients with acute ischemic stroke: 2019 update to the 2018 guidelines for the early management of acute ischemic stroke: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association[J]. Stroke, 2019, 50(12): e344-e418. DOI: 10.1161/STR.0000000000000211.
- [11] QIU W, KUANG H, NAIR J, et al. Radiomics-based intracranial thrombus features on CT and CTA predict recanalization with intravenous alteplase in patients with acute ischemic stroke[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2019, 40(1): 39-44. DOI: 10.3174/ajnr.A5918.
- [12] YE G, CAO R, LU J, et al. Histological composition behind CT-based thrombus density and perviousness in acute ischemic stroke[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2021, 207: 106804. DOI: 10.1016/j.clineuro.2021.106804.
- [13] SANTOS E M, NIESSEN W J, YOO A J, et al. Automated entire thrombus density measurements for robust and comprehensive thrombus characterization in patients with acute ischemic stroke[J]. PLoS One, 2016, 11(1): e0145641. DOI: 10.1371/journal.pone.0145641.
- [14] BILGIC A B, GOCMEN R, ARSAVA E M, et al. The effect of clot volume and permeability on response to intravenous tissue plasminogen activator in acute ischemic stroke[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2020, 29(2): 104541. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.104541.
- [15] SANTOS E M, MARQUERING H A, BERKHEMER O A, et al. Development and validation of intracranial thrombus segmentation on CT angiography in patients with acute ischemic stroke[J]. PLoS One, 2014, 9(7): e101985. DOI: 10.1371/journal.pone.0101985.
- [16] GENSICKE H, EVANS J W, AL AJLAN F S, et al. Comparison of different methods of thrombus permeability measurement and impact on recanalization in the INTERRSeCT multinational multicenter prospective cohort study[J]. Neuroradiology, 2020, 62(3): 301-306. DOI: 10.1007/s00234-019-02320-y.
- [17] BAHRAMI K, SABI M S, SASANNEJAD P, et al. Prognostic value of the modified clot burden score in predicting outcomes of acute ischemic stroke patients[J]. BMC Neurol, 2026, 26(1): 139. DOI: 10.1186/s12883-026-04626-w.
- [18] SHAKER H, KHAN M, MULDERINK T, et al. The role of CT perfusion in defining the clinically relevant core infarction to guide thrombectomy selection in patients with acute stroke[J]. J Neuroimaging, 2019, 29(3): 331-

334. DOI: 10.1111/jon.12599.
- [19] JIANG B, BALL R L, MICHEL P, et al. Factors influencing infarct growth including collateral status assessed using computed tomography in acute stroke patients with large artery occlusion[J]. *Int J Stroke*, 2019, 14(6): 603-612. DOI: 10.1177/1747493019851278.
- [20] WANG Z, XIE J, TANG T Y, et al. Collateral status at single-phase and multiphase CT angiography versus CT perfusion for outcome prediction in anterior circulation acute ischemic stroke[J]. *Radiology*, 2020, 296(2): 393-400. DOI: 10.1148/radiol.2020192029.
- [21] POÉSY S, ANDREU-ARASA V C, TAKUMI K, et al. The role of dual-energy CT in head and neck emergency[J]. *Emerg Radiol*, 2025, 32(5): 773-783. DOI: 10.1007/s10140-025-02374-x.
- [22] TIJSSEN M P, HOFMAN P A, STADLER A A, et al. The role of dual energy CT in differentiating between brain haemorrhage and contrast medium after mechanical revascularisation in acute ischaemic stroke[J]. *Eur Radiol*, 2014, 24(4): 834-840. DOI: 10.1007/s00330-013-3073-x.
- [23] BACHTIAR N A, MURTALA B, MUIS M, et al. Non-contrast MRI sequences for ischemic stroke: a concise overview for clinical radiologists[J]. *Vasc Health Risk Manag*, 2024, 20: 521-531. DOI: 10.2147/VHRM.S474143.
- [24] TEDYANTO E H, TINI K, PRAMANA N A K. Magnetic resonance imaging in acute ischemic stroke[J]. *Cureus*, 2022, 14(7): e27224. DOI: 10.7759/cureus.27224.
- [25] HUANG X, LIU W, ZHU W, et al. Distal hyperintense vessels on FLAIR: a prognostic indicator of acute ischemic stroke[J]. *Eur Neurol*, 2012, 68(4): 214-220. DOI: 10.1159/000340021.
- [26] FARHAN N, KHAN S, RASHEED B, et al. Role of diffusion-weighted imaging in diagnosing acute ischemic stroke and its limitations in stroke mimics[J]. *Ro J Neurol*, 2025, 24(2): 160-166. DOI: 10.37897/rjn.2025.2.4.
- [27] NAGARAJA N. Diffusion weighted imaging in acute ischemic stroke: a review of its interpretation pitfalls and advanced diffusion imaging application[J]. *J Neurol Sci*, 2021, 425: 117435. DOI: 10.1016/j.jns.2021.117435.
- [28] PHINIKARIDOU A, ANDIA M E, SAHA P, et al. *In vivo* magnetization transfer and diffusion-weighted magnetic resonance imaging detects thrombus composition in a mouse model of deep vein thrombosis[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(3): 433-440. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.112.000077.
- [29] 耿悦, 陈雨昂, 张蜜, 等. 磁敏感血管征在急性缺血性脑卒中疾病中的研究进展[J]. *磁共振成像*, 2025, 16(5): 198-203. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2025.05.030.
- [30] ROMERO J M, LIBERATO A C P, MONTES D, et al. Accuracy of MRI T2\*-weighted sequences (GRE-EPI) compared to CTA for detection of anterior circulation large vessel thrombus[J]. *Emerg Radiol*, 2020, 27(3): 269-275. DOI: 10.1007/s10140-020-01754-9.
- [31] DILLMANN M, BONNET L, VUILLIER F, et al. Factors that influence susceptibility vessel sign in patients with acute stroke referred for mechanical thrombectomy[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 893060. DOI: 10.3389/fneur.2022.893060.
- [32] CHO S M, PARK S Y, KWAK H S, et al. Strong contrast stagnation of unilateral vertebral artery on three-dimensional black blood-enhanced MRI predicts acute medulla infarction[J]. *Neurointervention*, 2023, 18(1): 38-46. DOI: 10.5469/neuroint.2023.00017.
- [33] HAN S, LV Y, GAO K, et al. Quantitative susceptibility mapping as a biomarker to assess middle cerebral artery thrombus composition in acute ischemic stroke[J]. *J Vasc Dis*, 2023, 2(1): 112-121. DOI: 10.3390/jvd2010009.
- [34] DE HAVENON A, ZAIDAT O O, AMIN-HANJANI S, et al. Large vessel occlusion stroke due to intracranial atherosclerotic disease: identification, medical and interventional treatment, and outcomes[J]. *Stroke*, 2023, 54(6): 1695-1705. DOI: 10.1161/STROKEAHA.122.040008.
- [35] BOUJAN T, NEUBERGER U, PFAFF J, et al. Value of contrast-enhanced MRA versus time-of-flight MRA in acute ischemic stroke MRI[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2018, 39(9): 1710-1716. DOI: 10.3174/ajnr.A5771.
- [36] ALEXANDER M D, YUAN C, RUTMAN A, et al. High-resolution intracranial vessel wall imaging: imaging beyond the lumen[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2016, 87(6): 589-597. DOI: 10.1136/jnnp-2015-312020.
- [37] TURAN T N, BONILHA L, MORGAN P S, et al. Intraplaque hemorrhage in symptomatic intracranial atherosclerotic disease[J]. *J Neuroimaging*, 2011, 21(2): e159-e161. DOI: 10.1111/j.1552-6569.2009.00442.x.
- [38] EDJLALI M, ROCA P, RABRAIT C, et al. 3D fast spin-echo T1 black-blood imaging for the diagnosis of cervical artery dissection[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2013, 34(9): E103-E106. DOI: 10.3174/ajnr.A3261.
- [39] MARTIN A J, HETTS S W, DILLON W P, et al. MR imaging of partially thrombosed cerebral aneurysms: characteristics and evolution[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32(2): 346-351. DOI: 10.3174/ajnr.A2298.
- [40] FERLINI L, LIGOT N, RANA A, et al. Sensitivity and specificity of vessel wall MRI sequences to diagnose central nervous system angiitis[J]. *Front Stroke*, 2022, 1: 973517. DOI: 10.3389/fstro.2022.973517.
- [41] ZHANG R, ZHU L, ZHU Z, et al. Apparent diffusion coefficient map based radiomics model in identifying

- the ischemic penumbra in acute ischemic stroke[J]. *Ann Palliat Med*, 2020, 9(5): 2684-2692. DOI: 10.21037/apm-20-1142.
- [42] TANG T Y, JIAO Y, CUI Y, et al. Penumbra-based radiomics signature as prognostic biomarkers for thrombolysis of acute ischemic stroke patients: a multicenter cohort study[J]. *J Neurol*, 2020, 267(5): 1454-1463. DOI: 10.1007/s00415-020-09713-7.
- [43] JIANG J, WEI J, ZHU Y, et al. Clot-based radiomics model for cardioembolic stroke prediction with CT imaging before recanalization: a multicenter study[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(2): 970-980. DOI: 10.1007/s00330-022-09116-4.
- [44] SOMMER J, DIERKSEN F, ZEEVI T, et al. Deep learning for prediction of post-thrombectomy outcomes based on admission CT angiography in large vessel occlusion stroke[J]. *Front Artif Intell*, 2024, 7: 1369702. DOI: 10.3389/frai.2024.1369702.
- [45] JIANG J, WANG S, XIAO F, et al. Dual-energy CT-based assessment of thrombotic heterogeneity for predicting stroke source and response to machine thrombectomy: a step toward visualization thrombus treatment[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2025, 12(32): e17295. DOI: 10.1002/advs.202417295.
- [46] BENZAKOUN J, SCHELDEMAN L, WOUTERS A, et al. Automated DWI-FLAIR mismatch assessment in stroke using DWI only[J]. *Eur Stroke J*, 2025: 23969873251362712. DOI: 10.1177/23969873251362712.
- [47] MA H, CAMPBELL B C V, PARSONS M W, et al. Thrombolysis guided by perfusion imaging up to 9 hours after onset of stroke[J]. *N Engl J Med*, 2019, 380(19): 1795-1803. DOI: 10.1056/NEJMoa1813046.
- [48] XIONG Y, CAMPBELL B C V, SCHWAMM L H, et al. Tenecteplase for ischemic stroke at 4.5 to 24 hours without thrombectomy[J]. *N Engl J Med*, 2024, 391(3): 203-212. DOI: 10.1056/NEJMoa2402980.
- [49] ALBERS G W, MARKS M P, 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. DOI: 10.1056/NEJMoa1713973.
- [50] NOGUEIRA R G, JADHAV A P, HAUSSEN D C, et al. Thrombectomy 6 to 24 hours after stroke with a mismatch between deficit and infarct[J]. *N Engl J Med*, 2018, 378(1): 11-21. DOI: 10.1056/NEJMoa1706442.
- [51] YE G, CAO R, LU J, et al. Association between thrombus density and reperfusion outcomes using different thrombectomy strategies: a single-center study and meta-analysis[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 843. DOI: 10.3389/fneur.2019.00843.
- [52] NIE C, KANG Z, TU M, et al. Clot meniscus sign is associated with thrombus permeability and choice of mechanical thrombectomy technique in acute middle cerebral artery occlusion[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 850429. DOI: 10.3389/fneur.2022.850429.
- [53] ALVES H C, TREURNIET K M, DUTRA B G, et al. Associations between collateral status and thrombus characteristics and their impact in anterior circulation stroke[J]. *Stroke*, 2018, 49(2): 391-396. DOI: 10.1161/STROKEAHA.117.019509.
- [54] KAMALIAN S, MORAIS L T, POMERANTZ S R, et al. Clot length distribution and predictors in anterior circulation stroke: implications for intra-arterial therapy[J]. *Stroke*, 2013, 44(12): 3553-3556. DOI: 10.1161/STROKEAHA.113.003079.
- [55] OHARA T, MENON B K, AL-AJLAN F S, et al. Thrombus migration and fragmentation after intravenous alteplase treatment: the INTERSeCT study[J]. *Stroke*, 2021, 52(1): 203-212. DOI: 10.1161/STROKEAHA.120.029292.
- [56] ZHANG R, ZHOU Y, YAN S, et al. Slow collateral flow is associated with thrombus extension in patients with acute large-artery occlusion[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2018, 39(6): 1088-1092. DOI: 10.3174/ajnr.A5614.
- [57] DUTRA B G, TOLHUISEN M L, ALVES H C B R, et al. Thrombus imaging characteristics and outcomes in acute ischemic stroke patients undergoing endovascular treatment[J]. *Stroke*, 2019, 50(8): 2057-2064. DOI: 10.1161/STROKEAHA.118.024247.
- [58] BYUN J S, NICHOLSON P, HILDITCH C A, et al. Thrombus perviousness is not associated with first-pass revascularization using stent retrievers[J]. *Interv Neuroradiol*, 2019, 25(3): 285-290. DOI: 10.1177/1591019918825444.
- [59] ZHU F, LAPERGUE B, KYHENG M, et al. Similar outcomes for contact aspiration and stent retriever use according to the admission clot burden score in ASTER[J]. *Stroke*, 2018, 49(7): 1669-1677. DOI: 10.1161/STROKEAHA.118.021120.
- [60] NAMBIAR V, SOHN S I, ALMEKHLAFI M A, et al. CTA collateral status and response to recanalization in patients with acute ischemic stroke[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2014, 35(5): 884-890. DOI: 10.3174/ajnr.A3817.
- [61] GOYAL M, DEMCHUK A M, MENON B K, et al. Randomized assessment of rapid endovascular treatment of ischemic stroke[J]. *N Engl J Med*, 2015, 372(11): 1019-1030. DOI: 10.1056/NEJMoa1414905.