

4D CTA 联合 CTP 成像对急性缺血性脑卒中患者预后的评估价值

卢洪艳¹, 王娟¹, 刘衡¹, 张高峰²

1. 遵义医科大学附属医院医学影像科, 贵州 遵义 563003

2. 遵义医科大学第二附属医院医学影像科, 贵州 遵义 563000

DOI:10.61369/MRP.2026080006

摘要 : 目的 基于4D CTA 和全脑定量 CTP 联合成像, 分析单侧大脑中动脉中度以上狭窄患者, 侧枝循环开放程度与临床预后相关性, 为临床个性化治疗脑卒中患者提供影像参考依据。方法 回顾性纳入 72 例首诊急性缺血性脑卒中患者, 经全脑 CTP 与 CTA 证实存在一侧大脑中动脉中度以上狭窄, 且灌注伪彩图存在对应异常区域, 利用全脑 CTP 灌注原始数据重建得到动态 CTA 融合图像, 评估患者侧枝循环状态及卒中事件发生 3 月后预后评分。结果 侧支循环与预后呈弱负相关 ($R=-0.21$), 但该相关性未达到统计学显著水平 ($p=0.079>0.05$); 侧支循环与梗死核心呈弱负相关 ($R=-0.26$, $p=0.025$)。年龄和梗死核心对预后具有一定预测效能, 其中年龄预测预后的敏感度为 52.9%、特异性为 89.5%, 梗死核心预测预后的敏感度为 67.6%, 特异性为 65.8%。结论 侧枝循环不良与更严重的脑损伤相关, 但直接预测预后的能力有限, 侧枝循环可能通过影响梗死核心大小间接影响预后。

关键词 : CT 灌注; 动态 CTA; 急性缺血性脑卒中; 预后

Evaluating the Prognostic Value of 4D CTA Combined with CTP Imaging in Patients with Acute Ischemic Stroke

Lu Hongyan¹, Wang Juan¹, Liu Heng¹, Zhang Gaofeng²

1 Department of Medical Imaging, Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi, Guizhou 563003

2 Department of Medical Imaging, Second Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi, Guizhou 563000

Abstract : Objective: To analyze the correlation between collateral circulation patency and clinical prognosis in patients with moderate-to-severe unilateral middle cerebral artery stenosis using combined 4D CTA and whole-brain quantitative CTP imaging, providing an imaging reference for personalized clinical treatment of stroke patients. Methods: A retrospective study included 72 patients with first-visit acute ischemic stroke who exhibited confirmed unilateral middle cerebral artery stenosis (moderate or severe) on whole-brain CTP and CTA, with corresponding abnormal areas identified on perfusion pseudocolor images. Dynamic CTA fusion images were reconstructed from original whole-brain CTP perfusion data to assess collateral circulation status and post-stroke 3-month prognosis scores. Results: Collateral circulation showed a weak negative correlation with prognosis ($R = -0.21$), though this correlation was not statistically significant ($p = 0.079 > 0.05$). Collateral circulation also demonstrated a weak negative correlation with the infarct core ($R = -0.26$, $p = 0.025$). Age and infarct core demonstrated predictive value for prognosis, with age showing a sensitivity of 52.9% and specificity of 89.5%, while the infarct core exhibited a sensitivity of 67.6% and specificity of 65.8%. Conclusion: Poor collateral circulation is associated with more severe brain injury, but its ability to directly predict prognosis is limited. Collateral circulation may indirectly influence prognosis by affecting the size of the infarct core.

Keywords : CT perfusion; dynamic CTA; acute ischemic stroke; prognosis

缺血性脑卒中系多种病因所致颅内血流灌注异常、脑循环障碍, 引发脑组织局灶性缺血缺氧、不可逆性细胞坏死, 并继发对应定位神经功能缺损的一组缺血性脑血管综合征, 其损害程度取决于责任血管闭塞的严重程度与持续时间、代偿机制的有效性以及接受医疗干预的时机等。对于急性中风此类急性重症, 跨学科合作治疗对于患者生存和功能恢复至关重要, 早期影像学精准评估责任血管狭窄及区

基金项目: 本课题为遵义市科技计划项目, 合同编号: 遵市科合 HZ 字 (2024)234 号。

作者简介: 卢洪艳 (1997.08-), 女, 汉族, 贵州人, 研究生, 主治医师, 研究方向: 神经影像。邮箱: 3517899091@qq.com。

域灌注状态，是优化救治策略、改善预后的关键。急性缺血性卒中患者的梗死增长速率存在显著异质性，反映出多样的临床生理表型，目前国内联合分析血管狭窄程度、灌注参数及侧支循环状态与神经功能预后相关性的研究仍相对不足。本研究旨在探讨4D-CTA联合CTP成像对急性缺血性脑卒中患者的预后评估价值。

一、研究对象与方法

（一）研究对象

收集2019年7月至2025年9月遵义医科大学第二附属医院及遵义医科大学附属医院神经内科、急诊科首次诊断缺血性脑血管病患者，经头颈部CTA及全脑CTP检查证实一侧大脑中动脉狭窄或闭塞患者共72例。本课题为回顾性研究，已获得遵义医科大学附属医院生物医学伦理委员会的批准（伦理审查批件号：KLLY-2020-060），由于这项研究的回溯性，因此不需患者签署知情同意书。纳入标准：（1）临床诊断缺血性脑血管病患者，CT平扫排除脑出血；（2）行“一站式”头颈CTA及全脑CTP检查并诊断单侧大脑中动脉狭窄，狭窄的大脑中动脉分布区脑灌注存在异常；（3）CTA、CTP、4D-CTA重建图像质量符合诊断要求。排除标准：（1）其它供血大血管严重狭窄或闭塞；（2）入院时CT平扫显示颅内出血，陈旧性一个脑叶以上脑梗死；（3）患者身体不能耐受CT灌注检查者；（4）临床资料不全。

（二）研究方法

收集患者临床资料包括：年龄、性别、高血压、糖尿病、高脂血症、吸烟史、饮酒史、房颤；同型半胱氨酸。影像学参数：半暗带体积、梗死核心体积、侧支循环评分等。成像仪器：西门子双源CT(SOMATOM Force)。头颈CTA及全脑CTP一站式检查方法：先行CTP检查，使用摇篮床式扫描，以听眉线为扫描基线。管电压80KV，管电流120mAs，FOV 200mm×200mm，矩阵512×512，螺距48×1.2mm，层厚、层间距均为5mm，推注造影剂延迟时间4s开始启动扫描，共扫描28期，扫描时间42s，转速0.25s。高压注射器（Ulrich medical）注射碘海醇（350 mgI/mL）40mL，注射速率为6mL/s，后注射30 mL生理盐水（注射速率6mL/s）。头颈部CT血管造影检查于全脑CTP扫描完毕5分钟后进行，头颈CTA扫描方法：自主动脉弓层面至颅顶，对比剂碘海醇（350mgI/mL），总量1.5mL/kg，注射速率为4mL/s。应用自动触发监测扫描（Bolos Tracking），ROI检测部位颈内动脉，阈值100HU。扫描参数：管电压100KV，管电流450mAs，层厚1.0mm。全脑CTP数据处理：采用西门子CT自带软件（syngo.via VB20A），对原始图校正，重建获得CBF、CBV、MTT、Tmax、TTDD灌注图，梗死核心区及半暗带测量方法：syngo Via20自动分析，设定低灌注区及缺血核心阈值，Tmax > 6s、rCBF < 30%。灌注图、4D-CTA由经验丰富的放射科后处理工作人员运用GE AW工作站（AW 4.7, GE Healthcare, Milwaukee, WI, US）重建完成。头颈CTA数据处理：运用加菲智能医疗平台（CareSphere™）软件自动评估责任血管狭窄程度，根据北美症状性动脉内膜切除实验狭窄分级（NASCET），其中血管狭窄<50%定义为轻度狭窄；血管狭窄50~69%定义为中度狭窄；血管狭窄70~99%定义为重度狭窄；血管狭窄100%定义为

闭塞。侧支循环评价：由2名经验丰富的影像诊断医师进行侧支循环的评估。两位评估者互不交流，除发病症状外对患者临床和随访数据均不知情，4D-CTA融合图分次评估以避免偏倚。如有争议，由主任医师评价。4D-CTA的融合图像依据改良Tan评分对侧支循环状态进行评估，其判读标准是：0级，缺血区域不存在可见的侧支血管填充；1级，侧支血管填充<缺血面积的50%；2级，侧支血管区域占总缺血面积的50%~99%；3级，100%的侧支血管填充。临床预后评价：参照改良Rankin量表，在患者出院90天后通过门诊或电话随访对患者预后进行评分，其中mRS 0~2分为预后良好，mRS 3~6分为预后不良。

（三）统计学方法

应用IBM SPSS Statistics 18.0软件对数据进行处理。对于符合正态分布及总体方差齐的连续数值变量以($\bar{x} \pm s$)表示，组间比较采用两独立样本t检验。若不服从正态分布，数值变量采用中位数及四分位间距(interquartile range, IQR)表示，组间比较采用Mann-Whitney U检验。分类变量以频率及百分数表示，组间比较采用卡方检验。侧支评分、灌注参数相关性分析采用Spearman等级相关性分析，运用ROC曲线计算截断值、敏感性 & 特异性。评分者间信度采用Cohen's κ 表示。以P < 0.05为差异具有统计学意义。

二、研究结果

1.72例患者的预后分组及临床、血清生物学检查和影像学参数见表1，典型病例影像表现见图1~12。

2.散点图探究了侧支循环与梗死核心为弱负相关(R=-0.26, p=0.025)。侧支循环与预后呈弱负相关(R=-0.21)，但该相关性未达到统计学显著水平(p=0.079>0.05)，侧支循环与半暗带弱负相关(R=-0.22)，但该相关性未达到统计学显著水平(p=0.062>0.05)，表明侧支循环与半暗带之间的线性相关关联缺乏足够的统计支持。

3.Logistic单因素回归分析，对多项临床及影像学指标进行单因素逻辑回归分析。结果显示仅年龄和梗死核心两项指标可作为患者预后的潜在预测指标。

表1 预后良好不良与预后不好组间比较

	预后良好	预后不好	OR(95CI)	P值
	N=38	N=34		
性别：			2.17[0.84,5.77]	0.1141
男	26(68.42%)	17(50.00%)		
女	12(31.58%)	17(50.00%)		
年龄	60.84(13.54)	71.68(10.60)	1.09[1.04,1.16]	0.0015
时间窗	44.47(66.50)	28.47(36.35)	0.99[0.98,1]	0.2388
高血压：			1.55[0.46,5.64]	0.4865
无	8(21.05%)	5(14.71%)		

	预后良好 N=38	预后不好 N=34	OR(95CI)	P 值
吸烟史：				
有	30(78.95%)	29(85.29%)		
无	19(50.00%)	18(52.94%)	0.89[0.35,2.25]	0.8032
饮酒史：				
有	19(50.00%)	16(47.06%)		
无	30(78.95%)	28(82.35%)	0.80[0.24,2.6]	0.7158
高血脂：				
有	8(21.05%)	6(17.65%)		
无	33(86.84%)	28(82.35%)	1.41[0.39,5.38]	0.5982
糖尿病：				
有	5(13.16%)	6(17.65%)		
无	29(76.32%)	27(79.41%)	0.84[0.26,2.55]	0.7526
房颤：				
有	9(23.68%)	7(20.59%)		
无	35(92.11%)	27(79.41%)	3.02[0.76,15.06]	0.1327
高同型半胱氨酸：				
有	3(7.89%)	7(20.59%)		
无	35(92.11%)	28(82.35%)	2.50[0.6,12.69]	0.2225
4DF-CTA 评分				
不良	17(44.74%)	18(52.94%)		
良好	21(55.26%)	16(47.06%)	0.72[0.28,1.82]	0.4873
半暗带	39.03(50.28)	61.47(57.28)	1.01[1,1.02]	0.0913
梗死核心	12.93(26.08)	31.58(42.26)	1.02[1,1.03]	0.0366
Wills 环变异：				
有	31(81.58%)	26(76.47%)	1.36[0.43,4.38]	0.5949
无	7(18.42%)	8(23.53%)		
同侧 C:				
有	31(81.58%)	27(79.41%)	1.15[0.35,3.76]	0.8166
无	7(18.42%)	7(20.59%)		

表3 预测预后效能表

参数	AUC	Youden 指数	截断值	敏感度	特异性	95%CI	P 值
年龄	0.749	1.424	73.5	0.529	0.895	0.635–0.863	<0.001*
梗死核心	0.657	1.334	5.48	0.676	0.658	0.529–0.785	0.0101*

注：* 为 p<0.05

三、讨论

（一）侧枝循环与灌注参数、预后相关性分析

本研究结果显示侧支循环与梗死核心体积呈弱负相关，两者间线性关联具有统计学意义。侧支循环与预后、半暗带呈弱负相

关，但之间的线性相关关联缺乏足够的统计支持。对多项临床及影像学指标进行单因素 Logistic 回归分析，结果显示仅年龄、梗死核心体积与患者预后存在显著统计学关联。本研究认为对于侧枝状态良好的患者，可能存在较小的梗死核心体积，而较小的梗死核心体积可预测患者良好的预后状态，此结果与既往研究结果一致^[1-5]。但侧枝循环状态却不能直接预测预后，这与既往研究^[6-7]中指出侧支状态可能比再灌注时间更能预测梗死的生长和神经预后稍有差异，推测可能的原因是因为影响预后的因素多样。如本研究中年龄可影响预后与既往研究结果一致^[8-10]。年龄是唯一影响预后的人口统计学因素，一些研究报告称，自然衰老对侧支循环和长期预后有负面影响，同时老年患者多合并中重度脑白质高信号，而脑白质高信号与早期神经功能缺损程度密切相关^[11]。此外可能的原因是与个体间侧枝循环状态的差异及实验室指标如血糖基线水平等有关^[12-14]。

发生卒中后认知障碍（PSCI）是缺血性卒中的常见后遗症，也是导致患者长期残疾、生活质量下降的主要原因之一，研究表明除人口学及血管危险因素外多发急性梗死、梗死总体积及左侧大脑半球受累，可独立预测 PSCI，缺血核心体积、年龄及影像检查至再灌注时间三者共同显著影响该概率^[15]。遗憾的是本研究尚未将再灌注时间纳入分析，但梗死核心体积与年龄可预测患者预后与既往研究一致。梗死核心体积是评估患者预后的关键影像学指标，也是临床干预研究的核心观测终点，但最近的大核心悖论研究指出^[16]大梗死核心并非完全意味着脑组织已不可逆坏死，这直接挑战了经典的核心 / 半暗带模型，提示临床不应再简单以“大核心”排除血管内治疗（EVT）患者，而是需更精准影像区分真正坏死与可挽救组织，这也是未来需要进一步探索的方向。

综上，4D-CTA 联合全脑 CTP 检查可精准评估大脑中动脉狭窄程度，直观显示侧支循环建立状态及脑血流动力学异常，通过灌注参数定量分析脑组织病理生理改变，从“时间窗”到“组织窗”的个体化治疗转型，可为临床提供关键影像诊断依据^[17]。同时医疗条件、护理质量、经济状况也是影响患者预后的重要因素，尤其对于贵州等欠发达地区，这也提出了重要挑战，即在公共医疗体系背景下，如何审慎使用有限的临床资源以应对患者转运、手术能力、急性期及亚急性期照护等方面的需求^[18]，我们通过分析脑卒中预后相关影响因素并进行有效干预，有助于预防神经功能恶化、优化围手术期管理，并积极探索神经保护策略，从而进一步提升患者神经功能预后。这些信息可为与患者家属的沟通或对预立医疗指示的解读提供参考。

（二）本研究的局限性

（1）本研究为单中心、回顾性小样本研究，可能存在选择偏倚，研究结论需经多中心、大样本前瞻性研究进一步验证及推广；（2）血管狭窄程度缺乏与 DSA 作为标准对照的比较。未对血管狭窄长度、斑块性质进行分析，将作为后续研究重点。

参考文献

[1]Gentile L, Paolucci M, Sessagesimi E, et al. The role of brain CT perfusion in acute ischemic stroke patients in the early time window. J Neurol Sci. 2025 Aug 15;475:123576.
[2]Sarraj A, Hassan AE, Abraham MG, et al. Endovascular Thrombectomy for Large Ischemic Stroke Across Ischemic Injury and Penumbra Profiles. JAMA. 2024 Mar 5;331(9):750–763.

- [3]Hong L, Cheng X, Lin L, et al. The blood pressure paradox in acute ischemic stroke[J]. *Ann Neurol*, 2019, 85(3): 331–339.
- [4] 古丽米拉·巴巴什, 武方明, 娄保全, 等. 相对脑血容量评估缺血卒中侧支及血管内治疗预后的价值 [J]. *临床放射学杂志*, 2026, 45(3):382–387.
- [5] 逯瑶, 曹文博, 李京凯, 等. CT 灌注成像低灌注强度比预测急性缺血性卒中梗死核心进展及预后 [J]. *中国医学影像技术*, 2025, 41(5):718–722.
- [6]Kim-Tenser M, Mlynash M, Lansberg MG, et al. CT perfusion core and ASPECT score prediction of outcomes in DEFUSE 3[J]. *International Journal of Stroke*, 2020, 16(3): 288–294.
- [7]Thomalla G, Boutitie F, Ma H, et al. Intravenous alteplase for stroke with unknown time of onset guided by advanced imaging: systematic review and meta-analysis of individual patient data[J]. *The Lancet*, 2020, 396(10262): 1574–1584.
- [8]Almekhlafi MA, Kunz WG, McTaggart RA, et al. Imaging Triage of Patients with Late-Window (6–24 Hours) Acute Ischemic Stroke: A Comparative Study Using Multiphase CT Angiography versus CT Perfusion[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2020, 41(1): 129–133.
- [9]Mishra SM, Dykeman J, Sajobi TT, et al. Early reperfusion rates with IV tPA are determined by CTA clot characteristics[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2014, 35(12): 2265–2272.
- [10]Jiang B, Ball RL, Michel P, et al. Factors influencing infarct growth including collateral status assessed using computed tomography in acute stroke patients with large artery occlusion. *Int J Stroke*. 2019 Aug;14(6):603–612.
- [11] 朱杰, 王浩, 胡文娟, 等. 一站式动态 CTA 结合 CTP 评估单侧大脑中动脉闭塞患者预后的价值 [J]. *放射学实践*, 2021(9).
- [12] van Seeters T, Biessels GJ, Kappelle LJ, et al. CT angiography and CT perfusion improve prediction of infarct volume in patients with anterior circulation stroke. *Neuroradiology*. 2016 Apr;58(4):327–37.
- [13] Pensato U, Bosshart S, Stebner A, et al; ESCAPE-NA1 Investigators. Effect of Hemoglobin and Blood Glucose Levels on CT Perfusion Ischemic Core Estimation: A Post Hoc Analysis of the ESCAPE-NA1 Trial. *Neurology*. 2024 Nov 26;103(10):e209939.
- [14] 夏倩倩, 王希明, 张征宇, 等. 急性缺血性脑卒中 CTA 侧支等级与 CTP 之间的相关性研究 [J]. *临床放射学杂志*, 2019(2).
- [15]Pendlebury ST, Rothwell PM; Oxford Vascular Study. Incidence and prevalence of dementia associated with transient ischaemic attack and stroke: analysis of the population-based Oxford Vascular Study. 2024 Feb;5(2):e131–e140.
- [16]Ter Schiphorst A, Seners P, Arquiza C, et al. The Large Core Paradox. *Stroke*. 2025 Sep;56(9):2786–2797.
- [17] 屈怡纯, 王效春. 灌注成像技术在缺血性脑卒中治疗及预后评估中的研究进展 [J]. *磁共振成像*, 2025, 16(2):130–134
- [18]Sarraj A, Hassan AE, Abraham MG, et al; SELECT2 Investigators. Endovascular Thrombectomy for Large Ischemic Stroke Across Ischemic Injury and Penumbra Profiles. *JAMA*. 2024 Mar 5;331(9):750–763.