·临床研究·

CT 灌注成像参数对急性脑梗死患者侧支循环及静脉溶栓后功能结局的预测价值

刘娟

（上海杨思医院神经内科，上海 200126）

【摘要】 **目的** 研究CT灌注成像(CT perfusion, CTP)参数对急性脑梗死(acute cerebral infarction, ACI)患者侧支循环及静脉溶栓后功能结局的预测价值。**方法** 以医院2021年1月至2024年11月收治的100例ACI患者为研究对象，均于入院后行CT灌注成像检查并进行静脉溶栓治疗。以数字血管造影(digital subtraction angiography, DSA)作为金标准将患者分为侧支良好组(46例)与侧支不良组(54例)，对比两组患者CTP参数。根据发病90 d后改良Rankin量表(modified Rankin scale, mRS)评分，将患者分为功能结局良好组(65例)和功能结局不良组(35例)。采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析预测效能。**结果** 相较于侧支不良组，侧支良好组脑血流量(cerebral blood flow, CBF)、脑血容量(cerebral blood volume, CBV)水平更高(P<0.05)、平均通过时间(mean transit time, MTT)、达峰时间(time to peak, TTP)水平更低(P<0.05)；ROC曲线结果显示，CBF、CBV、MTT、TTP及联合检测均对患者侧支循环有预测效能(P<0.05)，其AUC分别为0.857、0.800、0.814、0.713、0.931，单独检测中CBF效能最高，但仍低于联合预测效能。采用独立样本Z检验得到CBF、CBV、MTT、TTP对联合预测的Z值分别为1.37(P>0.05)、2.21(P<0.05)、1.71(P>0.05)、3.54(P<0.05)。ROC曲线结果显示，CBF、CBV、MTT、TTP及联合检测均对患者静脉溶栓后功能结局有预测效能(P<0.05)，其AUC分别为0.796、0.811、0.718、0.784、0.902，单独检测中CBV效能最高，但仍低于联合预测效能。采用独立样本Z检验得到CBF、CBV、MTT、TTP对联合预测的Z值分别为1.91(P>0.05)、1.65(P>0.05)、3.14(P<0.05)、2.13(P<0.05)。**结论** ACI患者侧支循环良好组CBF、CBV较侧支循环不良组高，MTT、TTP水平更低，功能结局良好组CTP参数与侧支循环良好组趋势相似。分析ROC得到CTP参数具有侧支循环及静脉溶栓后功能结局的预测效能。

【关键词】 CT灌注成像；急性脑梗死；静脉溶栓治疗；评估价值

【中图分类号】 R743.3; R619+.2 【文献标识码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202503013

The predictive value of CT perfusion imaging parameters for collateral circulation and functional outcomes after intravenous thrombolysis in patients with acute cerebral infarction

Liu Juan

(*Department of Oncology*, *Shanghai Yangsi Hospital*, *Shanghai 200126*, *China*)

【**Abstract**】 **Objective** To study the predictive value of CT perfusion imaging (CTP) parameters for collateral circulation and functional outcomes after intravenous thrombolysis in patients with acute cerebral infarction (ACI). **Methods** A total of 100 patients with ACI admitted to the hospital from January 2021 to November 2024 were selected as the research subjects. All of them underwent CT perfusion imaging examination and received intravenous thrombolytic therapy after admission. The patients were divided into the good collateral group (46 cases) and the poor collateral group (54 cases) using digital subtraction angiography (DSA) as the gold standard. Compare the CTP parameters of the two groups of patients. According to the modified Rankin scale (mRS) score 90 days after the onset of the disease, the patients were divided into the good functional outcome group (65 cases) and the poor

第一作者：刘娟，女，本科，主治医师，研究方向：脑血管疾病诊断与治疗

functional outcome group (35 cases). The predictive efficacy was analyzed using the receiver operating characteristic (ROC) curve. **Results** Compared with the poor collateral group, the good collateral group had higher levels of cerebral blood flow (CBF) and cerebral blood volume (CBV) (P<0.05). The levels of mean transit time (MTT) and time to peak (TTP) were lower (P<0.05). The ROC curve results showed that CBF, CBV, MTT, TTP and the combined detection all had predictive efficacy for collateral circulation in patients (P<0.05), with AUC being 0.857, 0.800, 0.814, 0.713 and 0.931 respectively. Among the individual detections, CBF had the highest predictive efficacy but was still lower than the combined predictive efficacy. The Z values of CBF, CBV, MTT and TTP for the combined detection were calculated to be 1.37（P>0.05）, 2.21（P<0.05）, 1.71（P>0.05） and 3.54（P<0.05） respectively. The ROC curve results showed that CBF, CBV, MTT, TTP and the combined detection all had efficacy for the functional outcome of patients after intravenous thrombolysis (P<0.05), with AUC of 0.796, 0.811, 0.718, 0.784 and 0.902 respectively. Among the individual detects, CBV had the highest efficacy but was still lower than the combined predictive efficacy. The Z values of CBF, CBV, MTT and TTP for the combined detection were calculated to be 1.91（P>0.05）, 1.65（P>0.05）, 3.14（P<0.05）and 2.13（P<0.05） respectively. **Conclusion** In ACI patients, the levels of CBF and CBV in the good collateral circulation group were higher than those in the poor collateral circulation group, while the levels of MTT and TTP were lower. The CTP parameters in the good functional outcome group showed a similar trend to those in the good collateral circulation group. ROC analysis revealed that the CTP parameters had predictive efficacy for good collateral circulation and functional outcomes after intravenous thrombolysis.

【**Key words**】 CT perfusion imaging； Acute cerebral infarction； Intravenous thrombolytic therapy；Evaluation value

急性脑梗死（acute cerebral infarction, ACI）是一种突然起病的脑血液循环障碍性疾病，是由脑部血管因各种原因发生阻塞，导致局部脑组织血液供应中断，引起脑组织缺血、缺氧，进而发生坏死或软化，最终出现一系列相应的神经功能缺损症状的疾病[1]。据权威统计数据显示，我国每年新增脑梗死患者数量高达数百万，脑梗死已然成为威胁国民健康的“头号杀手”[2]。侧支循环能够为缺血区域提供替代的血液供应，维持缺血半暗带区脑组织的基本代谢，延缓梗死灶的扩大和病情的快速发展。侧支循环的存在使得脑组织在血管闭塞后能够维持更长时间的存活，从而延长了再灌注治疗的有效时间窗[3]。ACI发病期内，部分脑组织因缺血状态发生不可逆的坏死，及时进行静脉溶栓能够恢复这部分脑组织的血流，拯救缺血半暗带，减少最终梗死面积[4]。CT灌注成像（CT perfusion, CTP）是一种能够快速、无创地评估脑组织血流灌注情况的影像学检查技术[5]，它通过在短时间内进行一系列动态CT扫描，在发病早期快速检测出脑组织的灌注异常，帮助医师确定缺血核心和缺血半暗带的范围，从而判断患者是否适合进行静脉溶栓或机械取栓等再灌注治疗[6-7]。有研究[8]发现，运用多模式CT影像可对急性缺血性卒中患者缺血半暗带、侧支循环与预后进行评估。本研究主要探讨CTP参数对ACI患者侧支循环及静脉溶栓后功能结局的预测价值，现报告如下。

1 资料和方法

1.1 一般资料

选取医院2021年1月至2024年11月收治的100例ACI患者为研究对象，均于入院后行CTP检查，并进行静脉溶栓治疗。纳入标准：①符合ACI的临床诊断标准[9]；②发病时间在4.5~9.0 h；③急诊时完成一站式颅脑CT检查，通过自动化软件处理得到CTP数据；④获得患者知情同意书。排除标准：①CTP图像模糊，无法进行分析；②合并严重心脏、肝、肾功能损伤者；③合并严重凝血或免疫系统疾病者。本研究已获得本院医学伦理委员会批准（审批号：shysyy–017）。

1.2 研究方法

1.2.1 CTP检查

所有患者均进行全脑灌注扫描，检查设备采用西门子SOMATOM Force双源CT扫描仪（德国西门子医疗系统公司）。患者取仰卧位，头部置入头颅专用扫描架，确保头部位置居中且稳定。扫描范围从颅底至颅顶，覆盖整个脑部。

扫描参数为管电压120 kV，管电流200 mAs，层厚5 mm，重建间隔2.5 mm。动态扫描的循环次

数为20次，时间间隔为3 s，总扫描时间为60 s。经肘静脉团注碘对比剂碘普罗胺注射液（成都倍特药业股份有限公司，国药准字H20223632），剂量为1.0~2.0 mL/kg，注射流率为4.0~5.0 mL/s，随后以相同流率注射30~40 mL生理盐水冲洗。利用MIStarv 4.0软件处理数据，得到时间—密度曲线。由两名影像医师独立勾画感兴趣区域（region of interest, ROI），如有差异，两名医师共同讨论差异区域，分析原因，达成初步共识。获得CTP参数：脑血流量（cerebral blood flow, CBF）、脑血容量（cerebral blood volume, CBV）、平均通过时间（mean transit time, MTT）和达峰时间（time to peak, TTP）。

1.2.2 分组

在CTP前对患者进行数字减影血管造影（digital subtraction angiography, DSA）检查并采用改良ASTIN评级标准[10]对侧支循环进行分级。①0级：无侧支循环，动脉闭塞远端无对比剂填充；②1级：仅有少量侧支循环，动脉闭塞远端有少量血管床对比剂填充，但不完全；③2级：中度侧支循环，动脉闭塞远端大约一半的血管床有对比剂填充；④3级：良好侧支循环，动脉闭塞远端血管床对比剂填充良好，但填充速度较慢；⑤4级：完全代偿的侧支循环，动脉闭塞远端血管床对比剂填充与正常侧相同，填充速度也较快。根据评分等级将0~2级的患者归为侧支不良组（54例），将3~4级的患者归为侧支良好组（46例）。侧支不良组中男性30例，女性24例；年龄35~68岁，平均年龄（62.84 ± 10.52）岁。侧支良好组中男性24例，女性22例；年龄35~69岁，平均年龄（61.45 ± 11.78）岁。两组一般资料比较差异无统计学意义（$P>0.05$）。

所有患者均接受阿替普酶溶栓标准治疗，阿替普酶（Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG，国药准字SJ20160055）0.9 mg/kg静脉滴注（最大剂量为90 mg），其中10%在最开始的1 min内静脉推注，剩余保持连续滴注1 h。1 d后进行颅脑MRI或CT检查，若无出血发生则实施规范性基础治疗。

90 d后，对患者进行改良Rankin量表（modified Rankin scale, mRS）[11]评分，分数范围在0~5分之间，0~1分为预后良好，2~5分为预后不良，死亡记作6分。根据mRS评分将mRS<2分的患者归为功能结局良好组（65例），将mRS≥2分的患者归为功能结局不良组（35例）。

1.2.3 观察指标

（1）CTP参数测定：采用仪器测定患者的CTP参数，包括CBF、CBV、MTT、TTP，对患者侧支循环效能及功能结局效能进行预测。

（2）CTP参数对ACI患者侧支循环的预测效能：根据改良ASTIN评级标准对侧支循环进行评分分组，对比侧支循环良好与不良患者的CTP参数，应用ROC曲线对指标进行预测。

（3）CTP参数对ACI患者静脉溶栓后功能结局的预测效能：采用mRS量表对患者预后进行评分分组，应用受试者工作特征（receiver operating characteristic, ROC）曲线对指标进行预测。

1.3 统计学方法

采用SPSS 25.0软件进行统计学分析，计数资料以例数（n）和百分率（%）表示，组间比较采用χ^2检验；符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差（$\bar{x}$ ± s）表示，组间比较采用t检验；绘制ROC曲线分析CTP参数，预测ACI患者侧支循环及静脉溶栓后功能结局的效能。为评估联合模型与单一CT灌注参数在预测效能上的差异，采用Z检验比较各ROC曲线下面积（area under curve, AUC）之间的差异，以$P<0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同侧支循环患者CTP参数比较

相较于侧支不良组，侧支良好组CBF、CBV水平更高（$P<0.05$），MTT、TTP水平更低（$P<0.05$），见表1。

表1 不同侧支循环患者CTP参数比较（$\bar{x}$ ± s）

组别	n	CBF（mL/100 g·min）	CBV（mL/100 g）	MTT（s）	TTP（s）
侧支良好组	46	32.24 ± 9.36	2.32 ± 0.51	2.62 ± 0.39	21.70 ± 3.14
侧支不良组	54	23.57 ± 7.85	1.73 ± 0.44	5.03 ± 0.64	24.65 ± 4.86
t值		5.038	6.211	22.252	3.535
P值		<0.001	<0.001	<0.001	0.001

注：CBF为脑血流量；CBV为脑血容量；MTT为平均通过时间；TTP为达峰时间。

2.2 CTP参数对ACI患者侧支循环的预测效能

ROC曲线结果显示，CBF、CBV、MTT、TTP及联合检测均对患者侧支循环有预测效能（P<0.05），其AUC分别为0.857、0.800、0.814、0.713、0.931，单独检测中CBF效能最高，但仍低于联合预测效能，见表2和图1。采用独立样本Z检验得到CBF、CBV、MTT、TTP对联合预测的Z值分别为1.37（P>0.05）、2.21（P<0.05）、1.71（P>0.05）、3.54（P<0.05）。

表2 CTP参数对ACI患者侧支循环的预测效能

指标	截断值	AUC（95%CI）	灵敏度（%）	特异度（%）	约登指数	P值
CBF（mL/100 g·min）	28.452	0.857（0.782~0.913）	93.50	68.50	0.620	<0.001
CBV（mL/100 g）	2.146	0.800（0.703~0.866）	91.30	63.00	0.543	<0.001
MTT（s）	3.423	0.814（0.620~0.835）	84.80	85.20	0.700	<0.001
TTP（s）	22.584	0.713（0.606~0.782）	71.70	70.40	0.421	<0.001
联合	—	0.931（0.786~0.953）	95.70	85.20	0.830	<0.001

注：CTP为CT灌注成像；ACI为急性脑梗死；CBF为脑血流量；CBV为脑血容量；MTT为平均通过时间；TTP为达峰时间；AUC为受试者工作特征曲线线下面积。

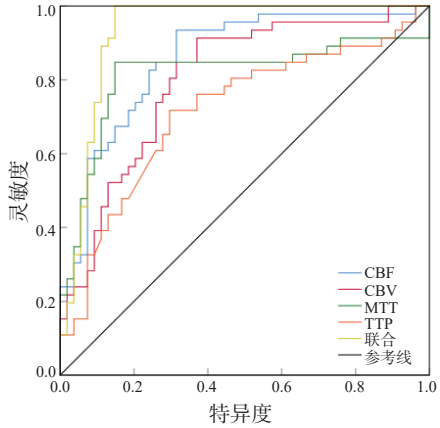


图1 CTP参数对ACI患者侧支循环的预测效能ROC曲线

2.3 CTP参数对ACI患者静脉溶栓后功能结局的预测效能

ROC曲线结果显示，CBF、CBV、MTT、TTP及联合检测均对患者静脉溶栓后功能结局有预测效能（P <0.05），其AUC分别为0.796、0.811、0.718、0.784、0.902，单独检测中CBV效能最高，但仍低于联合预测效能，见表3和图2。采用独立样本Z检验得到CBF、CBV、MTT、TTP对联合预测的Z值分别为1.91（P >0.05）、1.65（P >0.05）、3.14（P<0.05）、2.13（P<0.05）。

表3 CTP参数对ACI患者静脉溶栓后功能结局的预测效能

指标	截断值	AUC（95%CI）	灵敏度（%）	特异度（%）	约登指数	P值
CBF（mL/100g·min）	23.458	0.796（0.704~0.888）	78.50	82.90	0.614	<0.001
CBV（mL/100g）	2.048	0.811（0.721~0.902）	75.40	77.10	0.525	<0.001
MTT（s）	3.149	0.718（0.619~0.817）	44.60	97.10	0.417	<0.001
TTP（s）	21.485	0.784（0.693~0.876）	52.30	88.60	0.409	<0.001
联合	—	0.902（0.844~0.961）	93.80	71.40	0.652	<0.001

注：CTP为CT灌注成像；ACI为急性脑梗死；CBF为脑血流量；CBV为脑血容量；MTT为平均通过时间；TTP为达峰时间；AUC为受试者工作特征曲线线下面积。

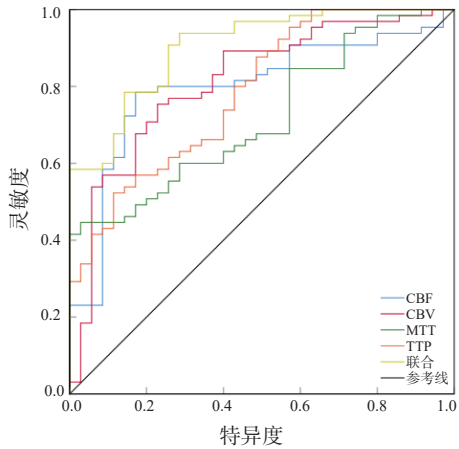


图2 CTP参数对ACI患者静脉溶栓后功能结局的预测效能ROC曲线

3 讨论

CTP在ACI诊断、分期、治疗决策中具有重要价值，其中CBV为量化单位脑组织血管内血容量的核心参数，在ACI急性期患者因缺血区域微循环破坏，其数值呈现显著下降趋势；CBF通过测量单位时间内流经毛细血管网的血流量，直接反映脑组织灌注水平；MTT通过计算对比剂从动脉至静脉的循环时长，可敏感识别缺血脑区；TTP则表征对比剂到达峰值浓度的延迟程度，其延长提示血流动力学障碍[12-14]。值得注意的是，侧支循环效能与上述参数动态相关：侧支循环良好部分可维持缺血脑区血流，这一现象与本研究中侧支循环良好组CBF、

CBV显著高于侧支循环不良组，MTT、TTP显著低于侧支循环不良组的结果一致。ROC曲线结果显示，CBF、CBV、MTT、TTP及联合检测均对患者侧支循环有预测效能，其中CBF最高（0.857），但仍低于联合预测效能（0.931）。有研究[15]通过4D-CTA评估急性缺血性脑卒中患者侧支循环与CTP参数的相关性，发现CTP参数rCBV及低灌注指数（hypoperfusion intensity ratio, HIR）可优先提示急性缺血性脑卒中患者侧支循环状态，良好的侧支循环状态有助于预测较小的最终梗死体积，这与本研究结果相似。另外，本研究发现CTP参数可以直接与ACI患者侧支循环情况进行量化反馈，直观地通过病灶灌注情况来判断患者的侧支循环情况，可以作为评估患者侧支循环是否良好的敏感指标，为临床分层干预提供量化依据。

在静脉溶栓治疗后，ROC曲线结果显示，CBF、CBV、MTT、TTP及联合检测均对患者静脉溶栓后功能结局有预测效能，其中CBV最高（0.811），但仍低于联合预测效能（0.902）。提示CTP参数对患者功能结局具有较高的预测效能。分析原因为CBF为梗死核心标志之一，梗死核心体积越大，神经细胞坏死范围越广，神经功能缺损越严重，患者的功能结局往往越差。CBV和MTT联合可有效区分可逆性脑缺血与不可逆性脑缺血，从而更准确地评估患者的脑组织损伤情况[16]。一般认为，CBV数值越高，脑组织损伤相对较轻，功能恢复的可能性越大[17]。TTP的延长反映了脑血流到达的时间延迟，提示存在血流动力学障碍[18]。MTT延长可能提示缺血半暗带的存在，缺血半暗带内的脑组织处于可逆性损伤状态，但如果侧支循环不足或未及时恢复血流灌注，这些组织可能会进展为不可逆的梗死核心，从而影响患者的功能结局[19]。

综上所述，ACI患者侧支循环良好组的CBF、CBV较侧支循环不良组高，MTT、TTP更低，CTP参数在评估ACI侧支循环方面具有较高的诊断效能，且CTP参数对ACI患者静脉溶栓后功能结局具有预测效能，可以通过检测CBF、CBV、MTT、TTP预测患者的功能结局。

[参 考 文 献]

[1] 葛宏艳, 花村, 戴慧. 急性脑梗死患者中医证型与MRI影像学表现及外周血指标相关性研究[J]. 中国中西医结合杂志, 2023, 43(10): 1177-1183.

[2] 王欣, 刘信东, 李圆圆, 等. 丁苯酞对高龄急性脑梗死患者侧支循环及远期脑梗死复发率的影响[J]. 重庆医学, 2024, 53(S1): 80-82.

[3] 赵松, 何业举, 高国栋, 等. 全脑CT灌注成像对小体积急性梗死灶诊断准确性及影响因素分析[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2023, 29(2): 125-130.

[4] Gao G, Liu S M, Hao F B, et al. Factors influencing collateral circulation formation after indirect revascularization for Moyamoya disease: a narrative review[J]. Transl Stroke Res, 2024, 15(6): 1005-1014.

[5] 刘冬, 张慎和, 郭菲. CTP成像对重度颈动脉狭窄患者保守治疗反应性的评估价值[J]. 中国动脉硬化杂志, 2023, 31(10): 872-878.

[6] 田臻, 杨扬, 李明超. 基于多模态CT影像学参数构建急性脑梗死预后评估的Nomogram模型分析[J]. 影像科学与光化学, 2024, 42(2): 104-112.

[7] 季连红, 刘沛桉, 厉励, 等. 基于CTA/CTP评价协定方通脑饮改善急性脑梗死痰瘀阻络证患者脑血流动力学疗效[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(12): 105-111.

[8] 麦盛始, 周辉, 张猛, 等. 基于多模式CT影像的急性缺血性卒中超时间窗再灌注治疗的效果[J]. 南昌大学学报（医学版）, 2025, 65(1): 50-57.

[9] The ACC Guidelines Committee. Reply: 2013 ACC/AHA guideline on the assessment of cardiovascular risk[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63(25): 2886.

[10] 罗根培, 李润雄, 吴志强, 等. 血管内取栓治疗急性后循环缺血性脑卒中临床分析[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2020, 23(11): 930-934.

[11] 吴培培, 董少军, 孙田田, 等. 丁苯酞联合阿司匹林和硫酸氢氯吡格雷对急性脑梗死患者NIHSS评分和mRS评分影响[J]. 河北医学, 2022, 28(2): 327-331.

[12] 谭慧敏. 急性脑梗死患者颅内侧支循环形成影响因素的模型构建及分析[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2022, 49(6): 13-17.

[13] Tang S, Liu Y, Wang Z, et al. Study on model iterative reconstruction algorithm vs. filter back projection algorithm for diagnosis of acute cerebral infarction using CT images[J]. Journal of Healthcare Engineering, 2021, 2021(1): 5000102.

[14] Wu X, Yang J, Ji X, et al. Delta radiomics modeling based on CTP for predicting hemorrhagic transformation after intravenous thrombolysis in acute cerebral infarction: an 8-year retrospective pilot study[J]. Frontiers in Neurology, 2025, 16: 1545631.

[15] Franx B A, Tiebosch I A, van der Toorn A, et al. Chronic hypertension and perfusion deficits conjointly affect disease outcome after tPA treatment in a rodent model of thromboembolic stroke[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2025, 45(5): 831-841.

[16] Vu E L, Brown C H Ⅳ, Brady K M, et al. Monitoring of cerebral blood flow autoregulation: physiologic basis, measurement, and clinical implications[J]. Br J Anaesth, 2024, 132(6): 1260-1273.

[17] Scully M, Howells L, Lester W A. Impact of new medications on the treatment of immune TTP[J]. Blood, 2025,145(13):1353-1357.

[18] Imaoka Y, Shindo S, Miura M, et al. Hypoperfusion intensity ratio and CBV index as predictive parameters to identify underlying intracranial atherosclerotic stenosis in endovascular thrombectomy[J]. J Neuroradiol, 2023, 50(4): 424-430.

[19] Yao M, Walker G, Gamcsik M P. Assessing MTT and sulforhodamine B cell proliferation assays under multiple oxygen environments[J]. Cytotechnology, 2023, 75(5): 381-390.