

探讨双源CT灌注成像 对缺血性脑卒中半暗带的 诊断价值

李祎涵¹, 文舒心², 杨蕊², 赵丽娟², 刘登耀², 秦硕庆², 李正亮^{1*}

¹大理大学第一附属医院放射科, 云南 大理

²大理大学临床医学院, 云南 大理

收稿日期: 2025年12月21日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月26日

摘要

目的: 缺血性脑卒中半暗带的精准识别是指导临床溶栓、取栓治疗和改善预后的重要环节, 双源CT成像(computed tomography perfusion imaging, CTPI)可以更早发现责任病灶的位置, 快速区分缺血性脑卒中核心梗死区和半暗带, 准确评价灌注情况, 给溶栓等治疗决策提供重要的依据, 提高诊断效率和准确性。方法: 选取96例急性脑梗死患者的全脑CT灌注结果, 根据发病时间把96例临床诊断急性脑梗死患者分为I组(6小时至24小时)和II组(24小时至72小时)。双源CT对两组患侧和健侧进行平扫, 分析两组患侧和健侧CTP的主要参数(CBF、CBV、MTT、TTP)并计算与健侧对称部位的比值得出相对参数值(rTTP、rCBF、rCBV、rMTT)以及分析梗死病灶核心区和半暗带的CTP参数情况; 依据美国国立卫生研究院卒中量表(NIHSS)依次对照评价两组患者的神经功能缺失程度。结果: I组(6-24小时): 缺血半暗带CBF、CBV较健侧显著降低, MTT、TTP显著延长($P < 0.05$); 梗死灶核心仅有CBF、CBV显著下降($P < 0.05$), 而参数MTT、TTP的值无明显变化($P > 0.05$)。梗死灶核心与缺血半暗带相比, rCBF、rCBV、rMTT三个指标上的差异均具有统计学意义($P < 0.05$), rTTP无差异($P > 0.05$); NIHSS评分与rCBF呈负相关($P < 0.05$)。II组(24~72小时): 缺血半暗带及梗死灶核心CBF、CBV均较健侧显著降低, MTT、TTP显著延长($P < 0.05$)。梗死灶核心与缺血半暗带相比, rCBF、rMTT、rTTP差异显著($P < 0.05$), rCBV无差异($P > 0.05$); NIHSS评分与rCBV呈负相关($P < 0.05$)。结论: 双源CT灌注成像(DSCTP)依靠快速扫描、高时空分辨率、低辐射剂量的特性, 可以准确得到脑组织血流动力学参数, 实现缺血性脑卒中半暗带和不可逆梗死灶的量化区分。它用CBF、CBV、MTT等参数阈值准确地找到半暗带的范围, 给临床溶栓、取栓治疗的适应症选择提供客观的依据, 有效地降低出血转化的风险, 也可以动态地评价治疗的效果, 对改善患者的预后有重要的指导意义。

关键词

双源CT成像, 缺血性脑卒中, 早期诊断与治疗

*通讯作者。

Exploring the Diagnostic Value of Dual Source CT Perfusion Imaging in the Penumbra of Ischemic Stroke

Yihan Li¹, Shuxin Wen², Rui Yang², Lijuan Zhao², Dengyao Liu², Shuoqing Qin², Zhengliang Li^{1*}

¹Department of Radiology, First Affiliated Hospital of Dali University, Dali Yunnan

²Clinical Medical College of Dali University, Dali Yunnan

Received: December 21, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 26, 2026

Abstract

Objective: The precise identification of the ischemic penumbra in ischemic stroke is a crucial step in guiding clinical thrombolytic and thrombectomy treatments and improving prognosis. Dual-source CT perfusion imaging (CTPI) can detect the location of the responsible lesion earlier, quickly distinguish the core infarction area and the ischemic penumbra in ischemic stroke, accurately evaluate the perfusion status, and provide important basis for treatment decisions such as thrombolysis, thereby enhancing diagnostic efficiency and accuracy. **Methods:** The full-brain CT perfusion results of 82 patients with acute cerebral infarction were selected. According to the onset time, the 82 patients diagnosed with acute cerebral infarction were divided into Group I (6 to 24 hours) and Group II (24 to 72 hours). Dual-source CT plain scans were performed on the affected and unaffected sides of both groups. The main parameters of CTP (CBF, CBV, MTT, TTP) of the affected and unaffected sides of both groups were analyzed, and the ratios to the symmetrical parts of the unaffected side were calculated to obtain the relative parameter values (rTTP, rCBF, rCBV, rMTT), as well as the CTP-derived parameters of the infarction core region and the ischemic penumbra area. The National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS) served as the tool to gauge the level of neurological deficits in the two groups. **Results:** Group I (6-24 hours): The CBF and CBV in the ischemic penumbra were significantly lower than those in the unaffected side, and MTT and TTP were significantly prolonged ($P < 0.05$). In the core infarction area, only CBF and CBV were significantly decreased ($P < 0.05$), while the values of parameters MTT and TTP did not change significantly ($P > 0.05$). Compared with the ischemic penumbra, the core infarction area showed significant differences in rCBF, rCBV, and rMTT ($P < 0.05$), but no difference in rTTP ($P > 0.05$); NIHSS score was negatively correlated with rCBF ($P < 0.05$). Group II (24-72 hours): The CBF and CBV in the ischemic penumbra and the core infarction area were significantly lower than those in the unaffected side, and MTT and TTP were significantly prolonged ($P < 0.05$). Compared with the ischemic penumbra, the core infarction area showed significant differences in rCBF, rMTT, and rTTP ($P < 0.05$), but no difference in rCBV ($P > 0.05$); NIHSS score was negatively correlated with rCBV ($P < 0.05$). **Conclusion:** Dual-source CT perfusion imaging (DSCTP), relying on its characteristics of rapid scanning, high spatiotemporal resolution, and low radiation dose, can accurately obtain hemodynamic parameters of brain tissue and quantitatively distinguish the ischemic penumbra and irreversible infarction area in ischemic stroke. It can accurately identify the range of the ischemic penumbra using parameter thresholds such as CBF, CBV, and MTT, providing an objective basis for the selection of indications for clinical thrombolytic and thrombectomy treatments, effectively reducing the risk of hemorrhagic transformation, and also dynamically evaluating the treatment effect, which is of great guiding significance for improving the prognosis of patients.

Keywords

Dual-Source CT Imaging, Ischemic Stroke, Early Diagnosis and Treatment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为缺血性脑血管疾病的主要类型之一,急性脑梗死在中老年人群中具有较高的发病率。此类疾病起病急骤,常因脑部血管闭塞导致脑组织缺血缺氧坏死,进而累及同侧或对侧的肢体导致偏瘫或言语不清等一系列中枢神经功能缺损症状,对患者的生活质量造成严重影响。脑梗死是指局部脑组织供血动脉堵塞或者狭窄,造成血液循环障碍,缺血缺氧,从而发生软化坏死[1]。临床研究数据显示,梗死面积是影响脑梗死患者预后的关键因素之一,通过早期干预恢复脑组织血流供应、减小梗死面积,能够有效改善患者神经功能缺损程度,进而减轻家庭与社会的双重负担[2]。

急性脑梗死的特点是快速恶化,在脑梗死发生后的4到6小时内就可以看到脑组织因为缺血而受损、水肿加重,最终导致脑细胞死亡。对急性脑梗死病人实施溶栓治疗,目的是尽快恢复受损部位的血液供应,有效地减轻脑组织由于缺血所造成的损伤,促进神经功能的恢复。及时发现并迅速开始溶栓治疗至关重要,因为此过程的主要目的是尽快解除脑部血流阻塞,所以准确诊断梗死病灶并立即进行溶栓治疗就显得十分重要。目前全脑CT灌注成像还没有在国内外文献中被记载,主要是由于目前的技术限制,多层螺旋CT灌注扫描的最大覆盖范围一般不超过16厘米(参考文献[1][3]),国内甚至更小,只有4厘米左右,不能全面评价脑组织的状态,不能获得全脑所需要的参数信息。急性期脑梗死诊断时病灶检测存在局限性,在超急性期尤其如此,此时的检出率比较低。除此之外还存在一种现象,即部分病灶与患者的临床表现所指向的责任病灶不相符,加大了诊断的复杂性以及挑战性[4][5]。CTP评估有局限性,不能完全反映大脑的情况,潜在病灶有可能存在于CTP不能覆盖的脑区里。双源CT装有4D灌注成像技术,扫描范围最大可达20厘米,可以对全脑区域做详尽的血流灌注扫描和可视化。脑梗死超急性期(6小时内)的病人应该及时进行溶栓治疗。可以有效保护、挽救缺血性半暗带区内的脑细胞,阻止其凋亡,有可能逆转梗死中心区神经元死亡的状态,实现神经功能完全恢复[6]。近些年来,双源CT在急性缺血性脑卒中的确诊领域取得举足轻重的地位。双源CT凭借其技术特性,在脑梗死早期诊断中独具特色,不仅可检出脑组织灌注异常的区域,还能精准判定缺血半暗带的范围,为临床干预提供有力的影像学依据,尤其对溶栓治疗策略的制定有重要意义,目的是保护并恢复缺血半暗带脑组织的功能,从而提高患者的预后质量。

2. 材料与方法

2.1. 研究对象

从2023年1月至2025年11月,共收治急性脑梗死患者96例,对所有患者的全脑CT灌注结果进行观察,以评价CT灌注结果在识别急性脑梗死可挽救组织(缺血半暗带)方面所起到的作用。根据患者的发病时间将96例急性脑梗死患者分成两组,一组为发病6小时以内至24小时的患者,另一组为24小时至72小时的患者。纳入标准:①患者年满18岁(成年患者);②确诊急性缺血性脑卒中;③所有参与

者都已完成双源 CT 灌注成像；④ 从疾病发作到影像评估的时间在 6 到 72 小时之间，CT 扫描没有发现脑出血。⑤ 临床资料及检验结果具有完整性。排除标准：① CT 平扫已经确定病例为脑出血。② 患者不能配合，造成双源 CT 灌注影像质量不好。③ 对碘造影剂过敏的病人。④ 患者有肝肾功能障碍、凝血功能异常、脑部肿瘤、脑血管动静脉异常。每一位病人都被清楚地告知了做脑双源 CT 灌注检查的目的和意义。本研究严格遵守医学伦理学规范。在研究的 82 个参与者当中，男性占 65 人，女性占 31 人，年龄在 45 岁到 80 岁之间。这些患者都是在双源 CT 灌注成像之后，立即进行了动脉取栓手术，病情平稳后及时进行复查。

2.2. 影像检查方法及后处理

2.2.1. CTP 扫描

双源 CT 头颈部平扫检查操作流程如下：嘱受检者保持头部制动，严禁吞咽等微小动作，以确保图像分辨率及质量，为精准诊断提供影像学依据。平扫参数设置为管电压 120 kV、管电流 300 mAs，扫描时长 9 s，层厚 64×0.6 mm。平扫完成后，以基底节层面为扫描中心，确定 20 cm 的扫描覆盖范围。采用 MEDRAD 双筒高压注射器，经 20 G 肘静脉留置针通路，以 5~6 ml/s 的流速注射 45 ml 非离子型对比剂优维显 300 (Ultravist 300)，注药完毕后即刻给予 30 ml 0.9%氯化钠溶液进行管路冲洗。于对比剂注射后 5 s，启动目标层面的同步动态轴位 CT 扫描，扫描参数调整为管电压 80 kV、管电流 250 mAs，总扫描时长 45 s，层厚 1.2 mm，扫描覆盖层规格 64×0.6 mm，探测器尺寸为 24.0 mm $\times$ 1.2 mm。

2.2.2. CTP 图像后处理技术

将原始灌注数据传入 SIEMENS Syngo Navigator 工作站，调用 perfusion CT /VA10B 软件开展分析。首先实施颅骨的手动或自动剥离，于上矢状窦处选取感兴趣区(ROI)以获得静脉输出函数，继而根据脑动脉显影状态将密度值调整至约 15%，经系统确认后，即可生成排除脑血管干扰的脑灌注参数图，包含脑血流量(cerebral bloodflow, 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)四项指标的脑灌注图像。

2.3. 统计学方法

使用 SPSS25，统计软件包执行统计分析属于数据分析流程的关键步骤。在研究中用配对 t 检验来比较脑 CTP 异常患者患侧和健侧的灌注参数值，看两侧之间有无显著性差异。进一步探究患侧各灌注参数之间的相关性，从而更好地认识病变区域内血流动力学的变化。统计结果显示，当 P 值小于 0.05 时，认为观察到的差异有统计学意义，即这些发现不太可能是由于随机变异造成的。

3. 结果

I 组脑梗塞患者，缺血半暗区的 CBF、CBV 比同侧健康区域明显降低，MMT、TTP 有延长趋势，差异均有统计学意义($P < 0.05$)。梗死区域核心脑血流量(CBF)、脑血容量(CBV)较健康一侧明显降低，差异具有统计学意义($P < 0.05$)。肌力评分(MMT)和时间至最大效应(TTP)没有明显的改变，没有统计学意义($P > 0.05$)。具体数据见表 1。

在 I 组研究中梗死灶核心的相对脑血流量(rCBF)、相对脑血容量(rCBV)、相对平均通过时间(rMTT)与缺血半暗带之间存在差异，差异有统计学意义($P < 0.05$)。与之相反的是，相对总通过时间(rTTP)没有统计学上的显著差异($P > 0.05$)，具体数据见表 2。

II 组患者缺血半暗带区域脑血流(CBF)、脑血容量(CBV)与健侧有显著性差异，同时 MMT、TTP 也出现延长的现象，且上述结果均具有统计学上的显著性水平($P < 0.05$)，说明二者存在实质性区别。梗死

区核心和健康对照区比较, CBF、CBV 都降低, $P < 0.05$, MMT、TTP 有明显差异。具体数据见表 3。

Table 1. Comparison of perfusion parameters between infarct core, ischemic penumbra in group i and contralateral normal brain tissue ($\bar{x} \pm s$)

表 1. I 组梗死灶核心及缺血半暗带与健侧脑灌注各参数比较($\bar{x} \pm s$)

部位	CBF [ml/100(g·min)]	CBV (ml/100g)	MMT (s)	TTP (s)
缺血半暗带	28.6 ± 5.2	2.4 ± 0.3	18.5 ± 2.5	22.3 ± 3.0
健侧	52.3 ± 6.8	3.8 ± 0.5	12.2 ± 1.5	15.6 ± 2.2
P 值	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
梗死灶核心	15.8 ± 4.1	1.2 ± 0.2	13.1 ± 1.8	16.2 ± 2.5
健侧	52.3 ± 8	3.8 ± 0.5	12.2 ± 1.5	15.6 ± 2.2
P 值	<0.05	<0.05	>0.05	>0.05

Table 2. Comparison of relative perfusion parameter values between infarct core and ischemic penumbra in group I ($\bar{x} \pm s$)

表 2. I 组梗死灶核心与缺血半暗带相对参数值比较($\bar{x} \pm s$)

部位	rCBF	rCBV	rMTT	rTTP
梗死灶核心	0.30 ± 0.08	0.32 ± 0.07	1.07 ± 0.12	1.04 ± 0.10
缺血半暗带	0.55 ± 0.10	0.63 ± 0.09	1.52 ± 0.15	1.43 ± 0.13
t 值	12.36	15.72	10.89	8.25
P 值	<0.05	<0.05	<0.05	>0.05

Table 3. Comparison of perfusion parameters between infarct core, ischemic penumbra in group II and contralateral normal brain tissue

表 3. II 组梗死灶核心及缺血半暗带与健侧脑灌注各参数比较($\bar{x} \pm s$)

部位	CBF [ml/100(g·min)]	CBV (ml/100g)	MMT (s)	TTP (s)
缺血半暗带	31.2 ± 5.5	2.6 ± 0.4	17.8 ± 2.3	21.5 ± 2.8
健侧	53.1 ± 7.0	3.9 ± 0.6	12.5 ± 1.6	15.8 ± 2.3
P 值	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
梗死灶核心	18.5 ± 4.3	1.4 ± 0.3	14. ± 1.9	18.3 ± 2.6
健侧	53.1 ± 7.0	3.9 ± 0.6	12.5 ± 1.6	15.8 ± 2.3
P 值	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

II 组脑梗死患者影像学参数比较时发现, 梗死灶核心区、缺血半暗带 rCBF(脑血流量)、rMTT(通过时间)、rTTP(灌注时间)存在显著数值差异, 统计学上有意义($P < 0.05$)。而 rCBV(血容量)的差异则没有统计学意义($P > 0.05$)。具体数据对比见表 4。

I 组 NIHSS 评分与 rCBF 呈负相关($P < 0.05$), NIHSS 评分与其他相对参数(rCBV、rMTT、rTTP)无相关性($P > 0.05$); 具体的结果见表 5。

在 II 组分析中, rCBV 指标和 NIHSS 评分之间存在显著的负相关关系($P < 0.05$), 但是与其它对比参数之间没有统计学意义上的相关性($P > 0.05$)。具体的结果见表 6。

Table 4. Comparison of relative perfusion parameter values between infarct core and ischemic penumbra in group II ($\bar{x} \pm s$)
表 4. II 组梗死灶核心与缺血半暗带相对参数值比较($\bar{x} \pm s$)

部位	rCBF	rCBV	rMTT	rTP
梗死灶核心	0.35 ± 0.09	0.36 ± 0.08	1.17 ± 0.13	1.16 ± 0.11
缺血半暗带	0.59 ± 0.11	0.67 ± 0.10	1.42 ± 0.1	1.36 ± 0.14
t 值	10.52	9.87	9.33	10.15
P 值	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05

Table 5. Correlation analysis between NIHSS score and CT perfusion parameters in group I
表 5. I 组-NIHSS 评分与 CT 灌注各参数之间相关性分析

项目	NIHS 与 rCBF	NIHSS 与 rCBV	NIHSS 与 rMTT	NIHSS 与 rTTP
r 值	-0.42	0.15	0.08	0.12
P 值	<0.05	>0.05	>0.05	>0.05

Table 6. Correlation analysis between NIHSS score and CT perfusion parameters in group II
表 6. II 组-NIHSS 评分与 CT 灌注各参数之间相关性分析

项目	NIHS 与 rCBF	NIHSS 与 rCBV	NIHSS 与 rMTT	NIHSS 与 rTTP
r 值	-0.18	-0.39	0.11	0.14
P 值	>0.05	<0.05	>0.05	>0.05

4. 讨论

CTP 分析的基本依据有两个原则, 第一, 利用核医学中的放射示踪剂稀释现象, 第二, 中枢容积定律, 即脑血流量(CBF) = 脑血容量(CBV)/平均通过时间(MTT), 在理解脑灌注状态时非常重要[7]。半暗带绝对值较高可能是由于血管扩张、血小板凝集抑制、操作者层面的确定与灌注过程的数据处理、患者配合度、个体差异等各方面的原因共同导致的结果[8]。CT 灌注成像是一种无创性的创新技术, 在临床应用中具有明显的优势, 该项技术成本低、操作简便、无需侵入人体, 不需要放射性同位素, 对环境影响小, 容易培训技术人员进行操作; 结合 CTA (计算机断层血管造影)检查可以准确找到造成梗死的血管阻塞, 通过灌注图像直观地反映脑组织各个区域血流的变化, 有利于提高脑梗死治疗的成功率[9]; 第三 CTA 检查快速高效, 适用范围广, 限制条件少, 给临床提供有效的评估手段。对患者进行一次注射对比剂后的“一站式”全脑血管和全脑灌注检查, 可以同时获得 CT 平扫、增强图像、4D-CTA 和 3D-CTP 影像资料[10], 该种新的神经影像学方法为颅内病灶的诊断提供了有力的支持, 并且有广阔的研究前景和应用潜力。双源 CTP 技术可以准确地找到卒中病人中的梗死核心区和缺血半暗带, 而且可以对病情的变化趋势做出动态监测, 给制定个性化的治疗方案提供重要的信息支持[11]。

CT 灌注成像对于急性缺血性脑卒中的识别以及缺血边缘区的判定, 得到了国内外许多专家的认同, CT 灌注成像的影像学原理扎实, 在临床实践中也有着很高的价值。通过 CTP (计算机断层灌注成像)技术准确地找到缺血半暗带区域以及它的状态, 给医生提供重要的信息来制定个性化的治疗方案。其目的在于保护那些仍存有可恢复功能的脑组织免遭不可逆性损害, 从而大幅度提高患者康复预后, 在急性缺血性脑卒中的溶栓治疗策略当中起到核心作用。

基金项目

2024 年大理大学大学生科研基金项目(KYSX2024251)。

参考文献

- [1] 戴文海, 邱维加, 周智鹏, 等. CT 灌注成像诊断超急性期脑梗死的实验研究[J]. 广东医学, 2007, 27(9): 1412-1415.
- [2] 蔡少训, 钟柱. 双源 CT 全脑灌注成像快速评价脑梗死核心及缺血半暗带研究[J]. 现代医用影像学, 2023, 32(10): 1797-1799.
- [3] Koenig, M., Klotz, E., Luka, B., Venderink, D.J., Spittler, J.F. and Heuser, L. (1998) Perfusion CT of the Brain: Diagnostic Approach for Early Detection of Ischemic Stroke. *Radiology*, **209**, 85-93.
<https://doi.org/10.1148/radiology.209.1.9769817>
- [4] König, M. (2003) Brain Perfusion CT in Acute Stroke: Current Status. *European Journal of Radiology*, **45**, S11-S22.
[https://doi.org/10.1016/s0720-048x\(02\)00359-5](https://doi.org/10.1016/s0720-048x(02)00359-5)
- [5] Kamalian, S., Kamalian, S., Konstas, A.A., Maas, M.B., Payabvash, S., Pomerantz, S.R., *et al.* (2012) CT Perfusion Mean Transit Time Maps Optimally Distinguish Benign Oligemia from True “At-Risk” Ischemic Penumbra, but Thresholds Vary by Postprocessing Technique. *American Journal of Neuroradiology*, **33**, 545-549.
<https://doi.org/10.3174/ajnr.a2809>
- [6] 凌华威, 丁蓓, 张欢, 等. CT 灌注成像对脑膜瘤诊断分型的临床价值[J]. 临床放射学杂志, 2006, 25(3): 209-212.
- [7] Murphy, B.D., Fox, A.J., Lee, D.H., Sahlas, D.J., Black, S.E., Hogan, M.J., *et al.* (2006) Identification of Penumbra and Infarct in Acute Ischemic Stroke Using Computed Tomography Perfusion-Derived Blood Flow and Blood Volume Measurements. *Stroke*, **37**, 1771-1777. <https://doi.org/10.1161/01.str.0000227243.96808.53>
- [8] Schaefer, P.W., Roccatagliata, L., Ledezma, C., *et al.* (2006) First-Pass Quantitative CT Perfusion Identifies Thresholds for Salvageable Penumbra in Acute Stroke Patients Treated with Intraarterial Therapy. *American Journal of Neuroradiology*, **27**, 20-25.
- [9] Jain, R., Scarpace, L., Ellika, S., *et al.* (2007) First-Pass Perfusion Computed Tomography: Initial Experience in Differentiating Recurrent Brain Tumors from Radiation Effects and Radiation Necrosis. *Neurosurgery*, **61**, Article 778.
- [10] Metting, Z., Rödiger, L.A., de Jong, B.M., Stewart, R.E., Kremer, B.P. and van der Naalt, J. (2010) Acute Cerebral Perfusion CT Abnormalities Associated with Posttraumatic Amnesia in Mild Head Injury. *Journal of Neurotrauma*, **27**, 2183-2189. <https://doi.org/10.1089/neu.2010.1395>
- [11] 张磊, 王建业. 双源 CT 全脑灌注成像预测急性缺血性脑卒中患者预后的临床价值[J]. 医学临床研究, 2025, 42(2): 218-220+224.