

❖ 专论

Whole brain CT perfusion combined with artificial intelligence iterative reconstruction for evaluating acute ischemic stroke

WANG Minke¹, WANG Tiantian², HUANG Jinbiao¹, LIN Youyou¹, XIE Jicheng^{1*}

(1. Department of Radiology, Taizhou Hospital of Zhejiang Province affiliated to Wenzhou Medical University, Taizhou 317000, China; 2. United Imaging Healthcare, Shanghai 201800, China)

[Abstract] **Objective** To observe the value of whole brain CT perfusion (CTP)-derived arterial phase images combined with artificial intelligence iterative reconstruction (AIIR) for evaluating acute ischemic stroke (AIS). **Methods** Fifty AIS patients were prospectively enrolled, and whole brain CTP followed by routine CT angiography (CTA) were performed. CTP images were reconstructed using AIIR (CTP-AIIR group) and hybrid iterative reconstruction (HIR, CTP-HIR group), respectively, and CTA images were derived from CTP at the arterial phase. Meanwhile, routine CTA images were obtained using HIR (CTA-HIR group). Then image quality was subjectively evaluated with a 5-point scale. The noise of basilar artery trunk, cavernous segment of internal carotid artery, M1 segment of middle cerebral artery and the brain parenchyma were calculated, and signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) of the above 3 arteries were measured. Taken digital subtraction angiography as the reference standard, the accuracy of CTP and CTA for localizing the responsible vessel of AIS was assessed. **Results** In CTP-AIIR group, the subjective scoring of 4 subjective metrics, including image noise, sharpness of vessel margin, small vessel visibility and overall diagnosability were significantly higher than, the noise of 3 arteries and brain parenchyma were lower than, and SNR and CNR of 3 arteries were higher than those in CTP-HIR group and CTA-HIR group (all $P < 0.017$). The diagnostic accuracy of responsible vessel based on CTP-AIIR group and CTA-HIR group were both 96.00% (48/50), not significantly different with that in CTP-HIR group (44/50, 88.00%) ($P = 0.142$). **Conclusion** Whole brain CTP-derived arterial phase CTA combined with AIIR could achieve comparable image quality and diagnostic performance of routine CTA for evaluating AIS.

[Keywords] stroke; tomography, X-ray computed; perfusion imaging; angiography

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2025.04.002

全脑 CT 灌注联合深度学习全模型迭代算法 用于评估急性缺血性脑卒中

王敏可¹, 王甜甜², 黄金标¹, 林优优¹, 谢继承^{1*}

(1. 浙江省台州医院放射科, 浙江 台州 317000; 2. 上海联影医疗科技股份有限公司, 上海 201800)

[摘要] **目的** 观察全脑 CT 灌注(CTP)动脉期图像联合深度学习全模型迭代算法(AIIR)用于评估急性缺血性脑卒中(AIS)的价值。**方法** 前瞻性对 50 例 AIS 行全脑 CTP 与 CT 血管造影(CTA), 之后分别行 AIIR(CTP-AIIR 组)及混合迭代重建(HIR, CTP-HIR 组)并提取 CTP 动脉期 CTA 图像; 对常规 CTA 行 HIR(CTA-HIR 组)。以 5 分法对各组图像质量进行主观评分; 测量基底动脉干、颈内动脉海绵状段、大脑中动脉 M1 段及脑实质噪声, 计算 3 支动脉信噪比(SNR)和对比度噪声比(CNR)。以数字减影血管造影为参考标准, 评估 CTP 及 CTA 定位责任血管的准确性。**结果** CTP-

[第一作者] 王敏可(1983—), 女, 浙江台州人, 本科, 主治医师。研究方向: 医学影像学。E-mail: wangmk@enzemed.com

[通信作者] 谢继承, 浙江省台州医院放射科, 317000。E-mail: xiejc@enzemed.com

[收稿日期] 2024-10-29 **[修回日期]** 2025-02-25

AIIR 组噪声、血管边缘锐利度、小血管可见性和整体可诊断性 4 项主观评分均显著高于,3 支动脉及脑实质噪声均低于,而 SNR、CNR 均高于 CTP-HIR 和 CTA-HIR 组(P 均 <0.017)。基于 CTP-AIIR 组与 CTA-HIR 组判断责任血管的准确率均为 96.00%(48/50),与基于 CTP-HIR 组(44/50,88.00%)差异无统计学意义($P=0.142$)。结论 全脑 CTP 动脉期图像结合 AIIR 评估 AIS 可获得与常规 CTA 相当的图像质量及诊断效能。

[关键词] 脑卒中; 体层摄影术,X 线计算机; 灌注成像; 血管造影术
[中图分类号] R743.3; R816.2 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2025)04-0515-05

急性缺血性脑卒中(acute ischemic stroke, AIS) 发病率及死亡率均较高^[1]。利用全脑 CT 灌注(CT perfusion, CTP)联合 CT 血管造影(CT angiography, CTA)可定量评估脑缺血状态与颅内血管病变而诊断 AIS^[2],但存在一定局限性^[3]。宽体探测器 CT 可实现全脑 CTP 与 CTA 成像^[4-5],但相比常规 CTA,于 CTP 中提取 CTA 的图像质量与诊断效能均面临挑战。深度学习全模型迭代算法(artificial intelligence iterative reconstruction, AIIR)融合深度学习及全模型迭代重建的优势,能有效降低噪声、提高血管对比度且保证图像纹理清晰^[6-9]。本研究观察全脑 CTP 联合 AIIR 用于评估 AIS 的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性纳入 2024 年 3 月—7 月浙江省台州医院 50 例疑诊 AIS 患者,男 35 例、女 15 例,年龄 33~93 岁、中位年龄 73 岁。纳入标准:①疾病发作 12 h 内;②肾功能正常;③接受全脑 CTP 及 CTA 检查,无碘对比剂过敏史。排除标准:①未接受数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)检查;②平扫 CT 显示脑出血;③合并其他严重脑血管疾病;④后经临床证实非 AIS。本研究获医院伦理委员会批准[K20240815(EZ)]。检查前所有患者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用联影 uCT960+ 320 排螺旋 CT 仪行全脑 CTP 联合 CTA 扫描。嘱患者仰卧,经肘前静脉以 5 ml/s 流率团注 45 ml 碘海醇(350 mgI/ml)并跟注生理盐水 40 ml,于之后 5 s 以管电压 100 kVp、分段设置管电流、转速 0.5 s/rot、z 轴覆盖范围 16 cm 行全脑 CTP,共扫描 19 期、扫描时长 55.5 s;①平扫期(5.0~5.5 s),管电流 150 mAs,扫描

1 期,间隔 3 s;②流入期(11.0~15.5 s),管电流 75 mAs,扫描 3 期,间隔 2 s;③动脉期(17.0~27.5 s),管电流 150 mAs,扫描 6 期,间隔 2 s;④静脉期(30.0~36.5 s),管电流 75 mAs,扫描 4 期,间隔 2 s;⑤流出期(40.0~60.5 s),管电流 75 mAs,扫描 5 期,间隔 5 s。于完成 CTP 后 5 min 内采用对比剂智能追踪技术行常规 CTA,对比剂注射方案与前一致,将 ROI 置于降主动脉,其内 CT 值达触发阈值 180 HU 后延迟 3.5 s 扫描;参数:管电压 100 kVp,参考管电流 200 mAs,转速 0.5 s/rot,准直 80 mm,螺距 0.59。

分别以 AIIR 及混合迭代重建(hybrid iterative reconstruction, HIR)算法重建 CTP 图像,提取 CTP 动脉期 CTA 图像,分别记为 CTP-AIIR 组和 CTP-HIR 组;以 HIR 算法重建常规 CTA(CTA-HIR 组),层厚、层间距均为 1 mm。将所有图像传至联影后处理工作站(uWS-CT),进行容积再现(volume rendering, VR)、最大密度投影(maximum intensity projection, MIP)及多平面重建(multi-planar reformatting, MPR)等后处理。

1.3 图像评价

1.3.1 主观评价 由 2 名具有 15 年以上神经影像学诊断经验的医师(医师 1、2)利用双盲法以 5 分制对 3 组图像进行主观评分,包括图像噪声、血管边缘锐利度、小血管(3 级及以上血管分支)可见性及整体可诊断性(表 1),以 ≥ 3 分为满足临床诊断需要。

1.3.2 客观评价 由 1 名具有 10 年工作经验的放射科医师(医师 3)对 3 组图像进行客观评价,避开伪影、血管壁及钙化斑块等,分别于基底动脉干、颈内动脉海绵段及大脑中动脉 M1 段放置直径为对应管腔 1/2~

表 1 CTP 及 CTA 重建图像质量主观评分标准

指标	1 分	2 分	3 分	4 分	5 分
图像噪声	极显著	重度	中度	轻度	几乎无
血管边缘锐利度	显示不清	血管边缘显影模糊,与周围组织边界不清	血管边缘显影尚清晰	较清晰可见,与周围组织边界清晰	血管光滑、显影锐利
小血管可见性	显示不清	描绘差,小血管难以辨认	描绘一般,小血管部分可见	描绘良好,小血管丰富	描绘极佳,小血管及细节显示清晰
整体可诊断性	极差,无法诊断	差,诊断困难	一般,基本可诊断	良好,诊断信心较高	极佳,诊断信心高

2/3 的圆形 ROI,于脑实质内放置 1 个 100 mm² 的圆形 ROI,使各组所有 ROI 大小、形态及位置均保持一致,测量其内 CT 值及其标准差(standard deviation, SD);均测量 3 次,取均值。计算各 ROI 信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)及各血管相对于脑实质的对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR):SNR=CT_{血管}/SD_{血管};CNR=(CT_{血管}-CT_{脑实质})/SD_{脑实质}。

1.3.3 判断责任血管 根据狭窄率将目标血管分为轻度狭窄(<30%)、中度狭窄(≥30%且<70%)、重度狭窄(≥70%且<100%)及完全闭塞(100%)。由医师 1、2 参考 DSA 以双盲法评估单侧颈内动脉、大脑中、前、后动脉、椎动脉或基底动脉,若仅发现 1 处狭窄,则视其为责任血管,若发现多处狭窄,则以狭窄最严重者为责任血管;意见不一致时经讨论达成共识。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 27.0 统计分析软件。以 Kappa 检验评估观察者间主观评分结果的一致性:

Kappa≤0.40 为一致性较差,0.40<Kappa<0.75 为一致性较好,Kappa≥0.75 为一致性高。采用 χ^2 检验比较组间诊断准确率。以 $\bar{x}\pm s$ 表示计量资料,采用 Homogeneity 法进行方差齐性检验,若方差齐,则组间行单因素方差分析,采用 LSD 法进行两两比较;若方差不齐,以 Friedman 检验比较计量资料及主观评分,差异有统计学意义时采用 Wilcoxon 符号秩检验进行两两比较,并对检验水准进行校正。 $P<0.05$ (3 组间)/ $P<0.017$ (3 组间两两比较)为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 主观评价 观察者间对 3 组图像各项主观评分结果具有较好一致性(Kappa=0.52~0.72)。3 组图像噪声、血管边缘锐利度、小血管可见性、整体可诊断性主观评分差异均有统计学意义(P 均<0.05),CTP-AIRR 组各指标评分均高于 CTP-HIR 组和 CTA-HIR 组(P 均<0.017)。见表 2 及图 1。

表 2 50 例 AIS CTP 及 CTA 图像主观评价结果比较(分)

组别	噪声			血管边缘锐利度		
	医师 1	医师 2	Kappa 值	医师 1	医师 2	Kappa 值
CTP-AIRR 组($n=50$)	4.94±0.24*#	4.88±0.33*#	0.638	4.70±0.46*#	4.80±0.40*#	0.632
CTP-HIR 组($n=50$)	2.92±0.34	2.88±0.44	0.721	2.86±0.61	2.94±0.68	0.574
CTA-HIR 组($n=50$)	3.94±0.37*	4.00±0.29*	0.713	4.32±0.59*	4.52±0.58*	0.541
F/χ^2 值	98.031	95.703	—	88.011	91.707	—
P 值	<0.001	<0.001	—	<0.001	<0.001	—

组别	小血管可见性			整体可诊断性		
	医师 1	医师 2	Kappa 值	医师 1	医师 2	Kappa 值
CTP-AIRR 组($n=50$)	4.94±0.24*#	4.92±0.27*#	0.540	4.84±0.42*#	4.88±0.33*#	0.675
CTP-HIR 组($n=50$)	2.80±0.40	2.90±0.42	0.568	2.78±0.42	2.72±0.45	0.522
CTA-HIR 组($n=50$)	4.02±0.51*	4.30±0.61*	0.529	4.30±0.54*	4.14±0.40*	0.555
F/χ^2 值	88.011	87.801	—	93.701	91.090	—
P 值	<0.001	<0.001	—	<0.001	<0.001	—

注:*,与 CTP-HIR 组比较 $P<0.017$;#:与 CTA-HIR 组比较 $P<0.017$

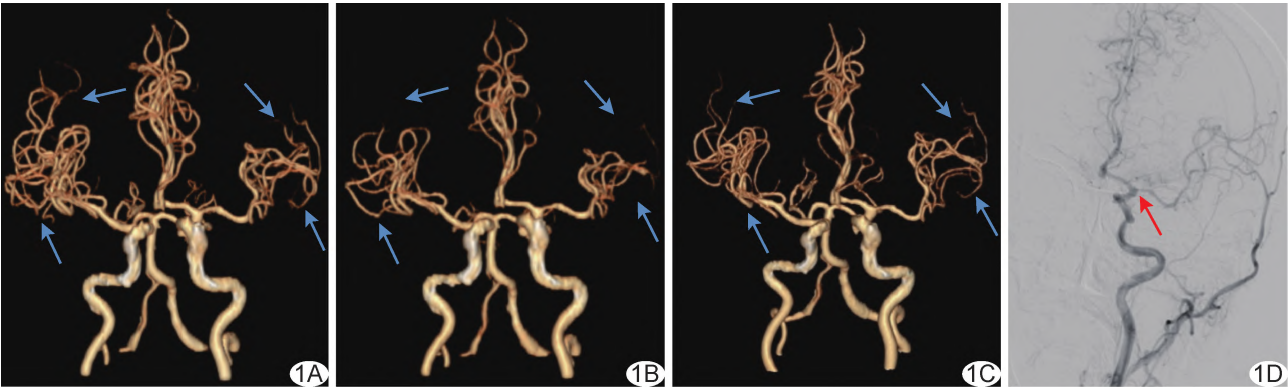


图 1 患者男,80 岁,AIS A. CTP 动脉期 CTA-AIRR VR 图,主观评分 5 分;B. CTP 动脉期 CTA-HIR VR 图,主观评分 3 分;C. 常规 CTA-HIR VR 图,主观评分 4 分;D. DSA 图示责任血管为左侧大脑中动脉(箭)(蓝箭示血管边缘及远端小血管)

2.2 客观评价 3 组各动脉及脑实质噪声、SNR、CNR 差异均有统计学意义(P 均 <0.05);CTP-AIIR 组噪声低于而 SNR 和 CNR 均高于 CTP-HIR 组和 CTA-HIR 组(P 均 <0.017)。见表 3。

2.3 责任血管评价 DSA 显示 42 例单支狭窄(7 例重度狭窄、35 例闭塞),6 例存在 2 支狭窄(均为闭塞),2 例存在 3 支狭窄(1 例均为闭塞,1 例 1 支重度狭窄、2 支闭塞),3 例可见侧支循环。CTP-AIIR 组和 CTA-HIR 组均正确诊断 48 例(48/50,96.00%),包括 7 例重度狭窄、41 例闭塞,错误判断 2 例责任血管(分别为基底动脉和椎动脉闭塞),其中 CTP-AIIR 组示血管边缘显更加锐利,诊断信心更足(图 2);CTP-HIR 组诊

断准确率为 88.00%(44/50),与前 2 组差异无统计学意义($\chi^2=2.152, P=0.142$)。

3 讨论

随着脑容积灌注技术的出现,通过后处理技术利用 CTP 数据重建 CTA 已成为可能^[10];非时变重建 CTA 可用于检测动脉闭塞^[11],时间平均法重建 CTA 可用于检测血管痉挛^[12],而模拟多期 CTA 可用于评估侧支循环^[13]等。本研究于 CTP 中提取动脉期 CTA 图像,发现结合 AIIR 可提升图像显示血管质量,与既往研究^[6-9]相符;基于 AIIR 图像判定责任血管结果与常规 CTA 一致,表明其用于评估 AIS 具有可靠诊断效能。

表 3 50 例 AIS CTP 及 CTA 图像客观评价结果比较

组别	噪声							
	基底动脉干	颈内动脉	大脑中动脉	脑实质	基底动脉干	颈内动脉	大脑中动脉	脑实质
CTP-AIIR 组 ($n=50$)	7.70±4.13*#	6.20±3.45*#	8.88±6.79*#	2.70±0.42*#				
CTP-HIR 组 ($n=50$)	16.10±6.97	12.86±3.45	12.94±5.21	9.42±1.11				
CTA-HIR 组 ($n=50$)	13.69±5.41*	10.13±2.94*	10.95±5.37*	8.93±0.65*				
χ^2 值	62.772	62.390	61.289	66.120				
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001				

组别	SNR				CNR		
	基底动脉干	颈内动脉	大脑中动脉	脑实质	基底动脉干	颈内动脉	大脑中动脉
CTP-AIIR 组 ($n=50$)	43.73±22.18*#	68.94±38.30*#	53.20±31.94*#	10.54±1.86*#	50.66±25.52*#	72.68±33.38*#	62.06±33.20*#
CTP-HIR 组 ($n=50$)	20.39±9.06	25.07±7.27	22.66±10.34	2.77±0.42	20.45±8.08	27.05±8.51	23.50±9.92
CTA-HIR 组 ($n=50$)	24.57±12.74*	37.60±15.69*	36.69±24.09*	3.46±0.54*	25.22±12.34*	35.08±11.61*	32.13±15.26*
χ^2 值	60.125	63.106	66.311	83.087	70.680	73.720	70.875
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: * :与 CTP-HIR 组比较 $P<0.017$; #:与 CTA-HIR 组比较 $P<0.017$

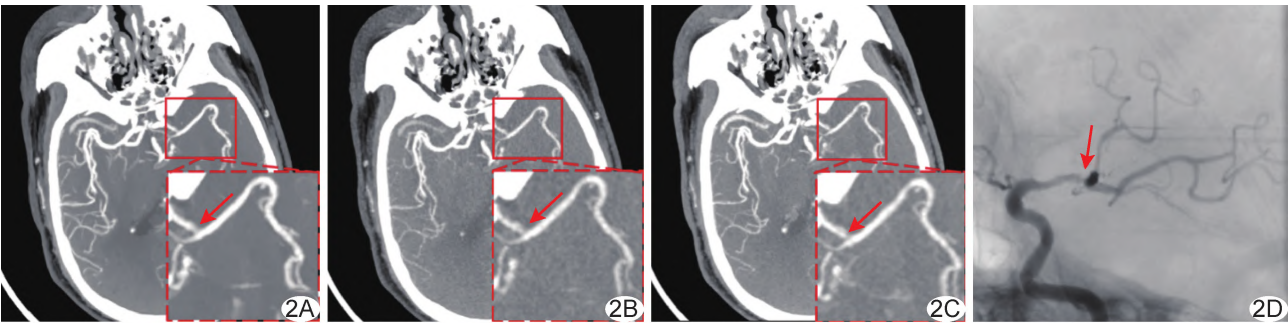


图 2 患者女,77 岁,AIS A. CTP 动脉期 CTA-AIIR MIP 图显示血管清晰,狭窄处密度降低(箭),正确诊断颈内动脉末端重度狭窄; B. CTP 动脉期 CTA-HIR MIP 图显示血管模糊,噪声大(箭),未能正确诊断; C. 常规 CTA-HIR MIP 图显示血管清晰,狭窄处密度降低(箭),正确诊断颈内动脉末端重度狭窄; D. DSA 图示左侧颈内动脉末端严重狭窄(箭)

侧支循环是缺血半暗带恢复和梗死生长的重要影响因素,与 CTP 参数密切相关;评估侧支循环可用于选择适合接受血管内治疗的 AIS 患者^[14]。本研究虽未针对侧支循环展开系统性评估,但对 DSA 证实存在侧支循环的 3 例,2 名医师基于取自 CTP 的 CTA 结合 AIIR 及常规 CTA 均能准确识别其分别由脊髓前动脉、前交通动脉和大脑前动脉经脑膜支代偿供血。

一站式全脑 CTP 扫描具有剂量优势。本研究采用 100 kVp 固定管电压和分段设置管电流行 CTP,容积 CT 剂量指数为 163.2 mGy,低于既往报道的 80 kVp、150 mAs 的 CTP 检查(184.2 mGy)^[15];其有效剂量为 5.48 mSv,较分别进行 CTP 和 CTA 扫描(10 mGv)降低 45.20%^[16]。

综上,全脑 CTP 动脉期图像结合 AIIR 评估 AIS 可获得与常规 CTA 相当的图像质量及诊断效能,有助于降低辐射剂量和对比剂用量、加快工作流程。本研究基于临床实践选择固定管电压为 100 kVp 并主要关注单期 CTA,今后将探索更低管电压,以及 AIIR 在多期 CTA 及评估侧支循环中的价值。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:王敏可研究设计和实施、图像和统计分析、撰写和修改文章;王甜甜研究实施、数据分析和修改文章;黄金标图像和统计分析;林优优数据分析;谢继承指导和审阅文章。

[参考文献]

- [1] VIRANI S S, ALONSO A, APARICIO H J, et al. Heart disease and stroke statistics-2021 update: A report from the American Heart Association[J]. Circulation, 2021,143(8):e254-e743.
- [2] 靖婧,苗延巍.优化低剂量一站式全脑 CT 灌注成像联合 CTA 扫描方案[J].中国医学影像技术,2018,34(3):424-428.
- [3] 张瑞,宋振强,范倩倩,等.640 层螺旋 CT 全脑灌注成像联合 CTA 在急性脑缺血中的可行性及临床价值[J].中国 CT 和 MRI 杂志,2023,21(8):13-15.
- [4] 刘青,李伟栗,王娇娇,等.全脑 CT 灌注成像在侧支循环评估中的辐射剂量和临床应用价值[J].中华放射医学与防护杂志,2024,44(1):47-52.
- [5] 郭睿胡,跃群,胡鹏志,等.头颈部 CTA 联合全脑 CT 灌注一站式扫描中时间间隔对灌注参数的影响[J].中国医学影像技术,2019,35(7):1095-1098.
- [6] GONG H, PENG L, DU X, et al. Artificial intelligence iterative reconstruction in computed tomography angiography: An evaluation on pulmonary arteries and aorta with routine dose settings[J]. J Comput Assist Tomogr, 2024,48(2):244-250.
- [7] LI W, YOU Y, ZHONG S, et al. Image quality assessment of artificial intelligence iterative reconstruction for low dose aortic CTA: A feasibility study of 70 kVp and reduced contrast medium volume[J]. Eur J Radiol, 2022,149:110221.
- [8] 游永春,李万江,刘洪川,等.“三低”技术联合人工智能迭代重建算法在主动脉 CT 血管成像中的临床应用[J].四川大学学报(医学版),2022,53(4):676-681.
- [9] 游永春,李万江,钟思华,等. AIIR 重建算法对 70 kVp 低管电压扫描主动脉 CTA 图像质量影响的研究[J].中国医疗设备,2021,36(10):75-79.
- [10] FRÖLICH A M, PSYCHOGIOS M N, KLOTZ E, et al. Angiographic reconstructions from whole-brain perfusion CT for the detection of large vessel occlusion in acute stroke [J]. Stroke, 2012,43(1):97-102.
- [11] SMIT E J, VONKEN E J, MEIJER F J, et al. Timing-invariant CT angiography derived from CT perfusion imaging in acute stroke: A diagnostic performance study [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2015,36(10):1834-1838.
- [12] GALLISSOT F, LENFANT M, THOUANT P, et al. Temporal averaging angiographic reconstructions from whole-brain CT perfusion for the detection of vasospasm [J]. J Neuroradiol, 2023,50(3):333-340.
- [13] LU S S, ZHANG X, XU X Q, et al. Comparison of CT angiography collaterals for predicting target perfusion profile and clinical outcome in patients with acute ischemic stroke[J]. Eur Radiol, 2019,29(9):4922-4929.
- [14] BERKHEMER O A, JANSEN I G, BEUMER D, et al. Collateral status on baseline computed tomographic angiography and intra-arterial treatment effect in patients with proximal anterior circulation stroke[J]. Stroke, 2016,47(3):768-776.
- [15] LI Z L, LI H, ZHANG K, et al. Improvement of image quality and radiation dose of CT perfusion of the brain by means of low-tube voltage (70 KV)[J]. Eur Radiol, 2014,24(8):1906-1913.
- [16] CHUNG K J, KHAW A V, LEE D H, et al. Low-dose CT perfusion with sparse-view filtered back projection in acute ischemic stroke[J]. Acad Radiol, 2022,29(10):1502-1511.