论著·临床医学

优化时间分辨率以降低脑灌注CT辐射剂量:一项基于灌注参数评估的可行性与稳定性研究

胡钧涛[1,2],李 穗[2],刘 云[1] [1]重庆医科大学附属第二医院放射科,重庆;[2]陆军军医大学(第三军医大学)第一附属医院放射科,重庆

[**摘要**] **目的** 通过降低时间分辨率探究脑灌注CT成像在既满足诊断要求又降低辐射剂量的可行性。**方法** 本研究采用回顾性队列研究设计,纳入于2025年1-9月在陆军军医大学第一附属医院放射科因疑似卒中接受脑灌注成像检查的117例患者。设计并对比以下3种扫描方案,方案一(标准方案):全时间分辨率扫描,共采集21期图像(作为基线);方案二:对原始时间序列图像进行间隔1期采样(即每2期取1帧);方案三:保留对比剂达峰期及其前后各1期(共3期),对其余期相进行间隔1期采样。计算方案二、三相对于方案一的辐射剂量降低百分比。在核心梗死区或显著低灌注区勾画感兴趣区(regions of interest, ROI),测量并计算以下灌注参数的均值(mean)与标准差(SD):残余函数达峰时间(time to maximum of the residue function, Tmax)、平均通过时间(mean transit time, MTT)、脑血容量(cerebral blood volume, CBV)、脑血流量(cerebral blood flow, CBF)。比较3种方案间各参数的统计学差异,同时比较3种方案计算的缺血半暗带体积差异。**结果** 方案二和方案三的辐射剂量较方案一分别显著降低约50.0%和42.9%。在灌注参数方面,3种方案间Tmax的SD值存在显著差异[F(1.92, 222.42)=11.17, P<0.001, 偏η^2=0.09],Bonferroni校正后的事后比较显示方案一与方案二、方案一与方案三的Tmax均值存在显著差异(P<0.016 7),而方案二与方案三间无显著差异。MTT的均值在3种方案间无显著差异[F(1.88, 218.11)=0.47, 偏η^2=0.004],但其SD值存在显著差异,*Bonferroni*校正后方案一与方案二、方案一与方案三差异显著(P<0.016 7),方案二与方案三无显著差异。CBV的SD值在3种方案间存在显著差异[F(1.98, 229.25)=22.97, P<0.001, 偏η^2=0.17],而Friedman检验显示其均值无显著性差异。CBF的均值在3种方案间无显著性差异(*Bonferroni*校正后),但其SD值存在显著差异,*Bonferroni*校正后方案一与方案二、方案一与方案三差异显著(P<0.016 7),方案二与方案三无显著差异。此外,*Bonferroni*校正后比较显示,3种方案计算的缺血半暗带体积均存在显著性差异(P<0.016 7)。**结论** 通过优化时间分辨率可显著降低CTP辐射剂量,且对核心灌注参数(MTT、CBV、CBF)的均值影响较小,CBF在低剂量方案中表现稳定,或可作为界定梗死核心的诊断依据。

[**关键词**] 脑卒中;辐射剂量;脑灌注;体层摄影术;X线计算机

[**中图法分类号**] R743.33;R814.2;R816.1 [**文献标志码**] A

[**基金项目**] 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0595);陆军军医大学第一附属医院博青创新基金(2024BQCXJJ-7)

[**通信作者**] 刘 云,E-mail:yunliu@cqmu.edu.cn

2097-0927/Copyright © 2026, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

引用格式:胡钧涛,李穗,刘云. 优化时间分辨率以降低脑灌注CT辐射剂量:一项基于灌注参数评估的可行性与稳定性研究[J]. 陆军军医大学学报,2026,48(04):461-469. DOI:10.16016/j.2097-0927.202511101.

Citation:HU J T, LI S, LIU Y. Optimizing temporal resolution to reduce radiation dose in cerebral perfusion CT: a feasibility and stability study based on perfusion parameter assessment[J]. J Army Med Univ, 2026, 48(04):461-469. DOI:10.16016/j.2097-0927.202511101.

Optimizing temporal resolution to reduce radiation dose in cerebral perfusion CT: a feasibility and stability study based on perfusion parameter assessment

HU Juntao[1,2], LI Sui[2], LIU Yun[1] [1]Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing; [2]Department of Radiology, First Affiliated Hospital, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, China

[**Abstract**] **Objective** To investigate the feasibility of reducing radiation dose in cerebral perfusion CT (CTP) while maintaining diagnostic accuracy by optimizing temporal resolution. **Methods** This retrospective cohort study included 117 stroke-suspected patients undergoing CTP at the First Affiliated Hospital of Army Medical University from January to September 2025. Three protocols were designed: Protocol 1 (full temporal resolution, 21-phase acquisition, baseline), Protocol 2 (every-other-phase sampling), Protocol 3 (peak-enhancement +1/−1 phase retention with every-other-phase sampling for remaining phases). Radiation reduction percentages relative to Protocol 1 were calculated. Regions of interest (ROI) were placed in ischemic core/penumbra to measure mean±SD of perfusion parameters: time to maximum of the residue function (Tmax), mean transit time (MTT), cerebral blood volume (CBV) and cerebral blood flow (CBF). Inter-protocol differences were assessed, and ischemic penumbra volume discrepancies were also analyzed. **Results** Protocol 2 and 3 reduced radiation dose by 50.0% and 42.9% versus Protocol 1, respectively. For perfusion parameters: Tmax SD differed significantly across protocols [F(1.92,222.42)=11.17, P<0.001, partial η^2=0.09]; post hoc tests showed significant mean differences between Protocol 1 *vs* 2 (P<0.016 7) and Protocol 1 *vs* 3 (P<0.016 7), but not Protocol 2 *vs* 3. MTT means showed no significant difference [F(1.88, 218.11)=0.47, partial η^2=0.004], though SD differed significantly between Protocol 1 *vs* 2 and 1 *vs* 3 (P<0.016 7). CBV SD differed significantly [F(1.98,229.25)=22.97, P<0.001, partial η^2=0.17] with no mean difference (Friedman test). CBF means showed no significant difference (Bonferroni-adjusted) but SD differed significantly between Protocol 1 *vs* 2 and 1 *vs* 3 (P<0.016 7). Ischemic penumbra volumes differed significantly across all protocols (P<0.016 7). **Conclusion** Temporal resolution optimization significantly reduces CTP radiation dose while minimally impacting core perfusion parameters (MTT, CBV, CBF means). CBF remained stable across reduced-dose protocols and may serve as a reliable diagnostic criterion for infarct core delineation.

[**Key words**] stroke; radiation dose; brain perfusion; tomography; X-Ray computed

Supported by the General Program of Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2023NSCQ-MSX0595) and the Youth Innovation Fund for PhDs of the First Affiliated Hospital of Army Medical University (2024BQCXJJ-7). Corresponding author: LIU Yun, E-mail: yunliu@cqmu.edu.cn

脑卒中是由脑血管突发性阻塞或破裂导致脑组织损伤的一组疾病,是神经内科的常见急症[1-2]。其中,急性缺血性脑卒中(acute ischemic stroke, AIS)最为高发,占全部卒中病例的69.6%~77.8%[3]。在AIS的早期诊断与治疗决策中,CT脑灌注成像(computed tomography perfusion, CTP)技术通过评估关键灌注参数,如残余函数达峰时间(time to maximum of the residue function, Tmax)[4]、平均通过时间(mean transit time, MTT)[5]、脑血容量(cerebral blood volume, CBV)[6]及脑血流量(cerebral blood flow, CBF)[7]等,发挥着至关重要的作用[8-9],也为精准界定缺血半暗带(即存在挽救潜力的缺血脑组织)提供了重要依据。

然而,常规动态CTP为实现对对比剂首过动力学的有效追踪并生成可靠的定量参数图,通常需要进行连续多次扫描,导致患者接受的辐射剂量显著升高[10],这一剂量问题在一定程度上限制了CTP技术的广泛应用。尽管多时相CTP作为一种改进方案可降低部分辐射剂量,但其在精确界定缺血半暗带方面仍存在局限性[11]。因此,如何在确保CTP灌注参数诊断效能的前提下,有效降低辐射剂量已成为当前亟待解决的关键临床问题。

降低扫描的时间分辨率被认为是实现辐射剂量

优化的潜在策略之一。然而,该策略在维持灌注参数评估准确性方面的临床可行性尚未得到充分验证。因此,本研究旨在通过系统性地调整CTP扫描中的时间采样间隔,深入探究在满足临床诊断要求的基础上,通过降低时间分辨率实现辐射剂量显著降低的可行性,以期为制定安全、有效且临床可行的低剂量CTP扫描方案提供直接的实验依据与重要参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究采用回顾性队列研究设计方案[12]。收集2025年1-9月在陆军军医大学第一附属医院放射科因疑似脑卒中接受uAI Discover Cerebral CTP脑灌注成像检查的117例患者为研究对象,其中男性74例,女性43例,年龄29~87岁,平均年龄(62.2±12.7)岁。纳入标准:①年龄>18岁;②无肿瘤性病变累积颈部血管;③uAI Discover Cerebral CTP软件分析默认扫描协议数据后,存在低灌注区或核心梗死区。排除标准:①脑出血;②临床及影像学资料不全;③运动伪影影响图像质量。本研究已通过陆军军医大学第一附属医院医学伦理委员会审批[(B)KY2025248]。

1.2 仪器

采用联影UCT860型号160排螺旋CT行脑灌注成像检查,窄体探测器摇篮床扫描模式(螺旋自适应往复扫描)[13]。

1.3 方法

默认协议采样分3段采集共21期(52 s):第一段5期(12 s),间隔3 s采集1次;第二段8期(16 s),间隔2 s采集1次;第三段8期(24 s),间隔3 s采集1次。扫描参数中的管电压设置为80~100 kV,管电流为自动调制,经肘静脉或前臂正中静脉,以5 mL/s的流速高压注射40 mL非离子型对比剂碘普罗胺(370 mg/mL,拜耳医药保健有限公司),并跟注40 mL生理盐水,延迟5 s后开始扫描[14]。

1.4 图像分析

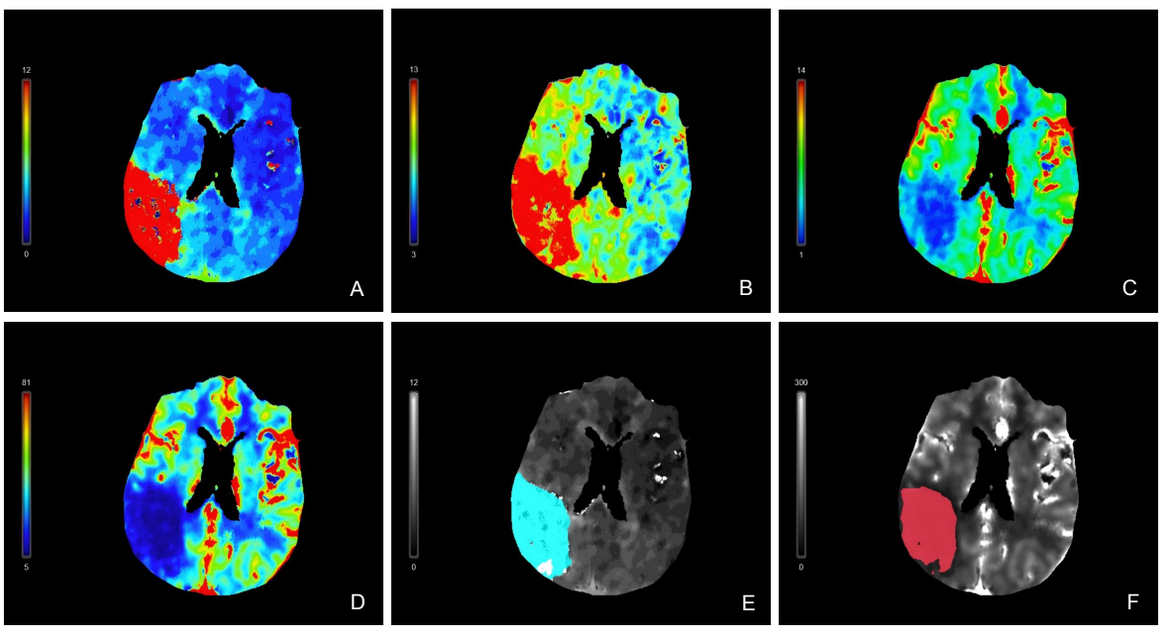
采用uAI Discover Cerebral CTP软件对默认协议的原始数据进行处理,包括运动校正、组织分割、血管结构定义等步骤,最终生成脑灌注参数图(包括但不限于Tmax、MTT、CBV、CBF等关键参数),并计算核心梗死区体积[定义为患侧相对脑血流量(relative cerebral blood flow, rCBF)低于健侧30%的脑区]及低灌注区体积(定义为Tmax>6 s的区域)。在"组织颜色区分"选项卡中找到Tmax>6 s显示为亮蓝色的伪彩图区域(低灌注区)或rCBF<30%显示为红色的伪彩图区域(核心梗死区),并记录低灌注区和核心梗死区体积,通过公式(缺血半暗带体积=低灌注区体积-核心梗死区体积)计算出缺血半暗带体积并记录,然后在其对应位置的Tmax参数图勾画,勾画时避开脑沟、脑室和血管,并复制感兴趣区(region of interest,ROI)到MTT、CBV、CBF参数图(图1)。选取的所有疑似卒中患者有低灌注区,但并非所有疑似卒中患者有核心梗死区。设计并对比以下3种扫描方案,方案一(标准方案):全时间分辨率扫描,共采集21期图像(作为基线);方案二(低分辨率方案1):对原始时间序列图像进行间隔1期采样(即每2期取1帧);方案三(低分辨率方案2):保留对比剂达峰值及其前后各1期(共3期),对其余期相进行间隔1期采样。峰值判定标准:由默认协议(方案一)原始数据计算所得时间密度曲线峰值,对应相应期相以确定峰值所在期相。保留方案一勾画ROI的层面、位置、范围大小信息,并记录该区域Tmax、MTT、CBV、CBF的均值和标准差。在此基础上通过帧数删减计算方案二、三的灌注参数图,可自动保留ROI的层面、位置、范围信息,以保证同一病例在3种方案的ROI层面、位置及范围一致,分别记录方案二、三的灌注参数值(图2)。

1.5 辐射剂量估算

研究已确定方案一为标准方案,以方案一的21期总帧数为基线,假定其辐射剂量为100%(基准值),然后通过帧数比例估算辐射剂量降低比例,计算公式:辐射剂量降低百分比=(标准方案总帧数-优化方案总帧数)/标准方案总帧数×100%。方案二是从21帧中间隔1期取1帧,是一种近似减半的采样模式,21帧减半约为10或11帧(取决于起始点),可估算为10.5帧来计算;方案三是保留时间密度曲线峰值及其前后各1帧,这3帧被完整保留,其余帧数参考方案二的"间隔1期取1帧",从总帧数(21帧)先扣除强制保留的3帧,剩下18帧,然后间隔1期取1帧,约得9帧,最后总帧数为12帧[15]。

1.6 统计学分析

采用SPSS 24.0统计分析软件。连续变量均使用*Shapiro-Wilk*检验判断连续变量是否符合正态分布,符合正态分布的连续变量以$\bar{x}\pm s$表示,不满足正态分布的连续变量使用$M(P_{25},P_{75})$表示。为检验重复测量数据是否满足重复测量方差分析的前提假设,而对数据进行了正态性检验,当球形假设被违背时,采用*Greenhouse-Geisser*校正;非正态分布的使用*Friedman*检验来比较多个相关样本之间的差异,有显著差异的结果使用*Bonferroni*校正。$P<0.05$为差异具有统计学意义。



A: Tmax perfusion parameter maps generated by processing default protocol raw data; B: MTT perfusion parameter maps generated by processing default protocol raw data; C: CBV perfusion parameter maps generated by processing default protocol raw data; D: CBF perfusion parameter maps generated by processing default protocol raw data; E: Low perfusion area (region with Tmax >6 s, displayed as a bright blue area) generated by processing default protocol raw data; F: Core infarction area (rCBF, displayed as a red area) generated by processing default protocol raw data

图1 原始数据在默认协议(方案一)下的脑灌注参数图

Figure 1 The cerebral perfusion parameter maps calculated from the raw data under the default protocol (Protocol 1)

2 结果

2.1 3种方案Tmax的SD差值、MTT的mean差值、CBV的SD差值符合正态分布

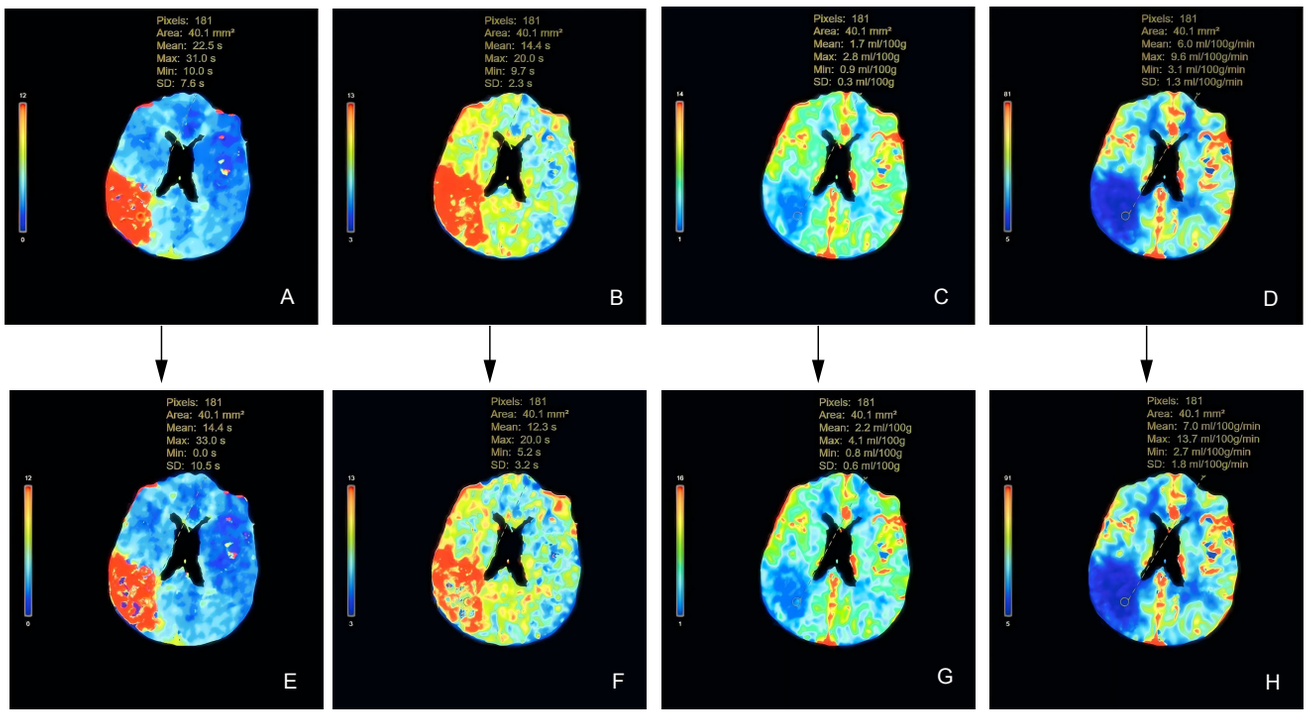
为了检验3组配对样本的正态性,将方案一和方案二记录的4组灌注参数图(Tmax、MTT、CBV、CBF)感兴趣区mean、SD值以及缺血半暗带体积的差值分别使用*Shapiro-Wilk*检验;方案一和方案三、方案二和方案三用同样方法检验正态性。结果发现,3种方案各灌注测量参数两两差值的正态分布如下:Tmax的mean值不符合正态分布($P<0.05$),SD值近似符合正态分布($P>0.05$);MTT的mean值近似符合正态分布($P>0.05$),SD值不符合正态分布($P<0.05$);CBV的mean值不符合正态分布($P<0.05$),SD值近似符合正态分布($P>0.05$);CBF的mean和SD值均不符合正态分布($P<0.05$);缺血半暗带体积不符合正态分布($P<0.05$)。提示Tmax和CBV的SD差值、MTT的mean差值在人群中变异较小,可能更适合作为稳定的诊断基准。

2.2 时间分辨率降低对MTT的mean值影响较小

在方案一、二、三分别测量Tmax的SD值、MTT的mean值、CBV的SD值。结果Tmax的SD值存在显著差异[$F(1.92,222.42)=11.17$,$P<0.001$,$偏\eta^2=0.09$];MTT的mean值不存在显著差异,[$F(1.88,218.11)=0.47$,$P>0.05$,$偏\eta^2=0.004$];CBV的SD值存在显著差异[$F(1.98,229.25)=22.97$,$P<0.001$,$偏\eta^2=0.17$],见表1。提示由于Tmax和CBV的SD值显著差异,低剂量CTP可能引入不稳定性。

2.3 时间分辨率降低对CBV及CBF的mean值均影响较小

在方案一、二、三分别测量Tmax的mean值、MTT的SD值、CBV的mean值、CBF的mean值和SD值。Tmax(mean)值使用*Bonferroni*校正后,方案一和方案二、方案一和方案三存在显著差异($P<0.0167$),方案二和方案三不存在显著差异($P>0.0167$);MTT(SD)值使用*Bonferroni*校正后,方案一和方案二、方案一和方案三存显著差异($P<0.0167$),方案二和方案三不存在显著差异($P>0.0167$);CBV(mean)值使用*Friedman*检验后,方案一、二、三均不存在显著性差异;CBF(mean)值使用*Bonferroni*校正后,方案一、二、三均不存在显著性差异;CBF(SD)值使用*Bonferroni*校



A: ROI delineated by Protocol 1 on Tmax maps; B: ROI delineated by Protocol 1 on MTT maps; C: ROI delineated by Protocol 1 on CBV maps; D: ROI delineated by Protocol 1 on CBF maps; E: ROI delineated by Protocol 2 on Tmax maps; F: ROI delineated by Protocol 2 on MTT maps; G: ROI delineated by Protocol 2 on CBV maps; H: ROI delineated by Protocol 2 on CBF maps

图2 不同方案在感兴趣区(同一层面、位置、范围)的脑灌注参数图

Figure 2 Cerebral perfusion parameter maps under different protocols in the region of interest (same slice, location, and extent)

表1 符合正态分布的测量值在3种方案的结果对比($\bar{x}\pm s$)

Table 1 Comparison of results from 3 protocols for normally distributed measurement values ($\bar{x}\pm s$)

Parameters	Protocol 1	Protocol 2	Protocol 3	*F*	Estimate-ω	Partial -η^2	*P*
SD_{Tmax}	2.11±2.61	3.30±3.46	3.40±3.58	11.17	0.94	0.090	<0.001
$Mean_{MTT}$	9.52±3.08	9.66±3.30	9.73±3.40	0.47	0.94	0.004	>0.05
SD_{CBV}	0.52±0.53	0.66±0.64	0.64±0.54	22.97	0.99	0.170	<0.001

正后,方案一和方案二、方案一和方案三存在显著差异(P<0.016 7),方案二和方案三不存在显著差异(P>0.016 7);缺血半暗带体积使用*Bonferroni*校正后,方案一、二、三均存在显著性差异(P<0.016 7,表2)。CBV的mean值、CBF的mean值在方案间无显著差异,提示核心血流动力学指标对采样率降低不敏感。Tmax的mean值、MTT的SD值、CBF的SD值在方案一与优化方案间存在显著差异,但优化方案间(方案二与方案三比较)无差异,提示采样率降低引入随机误差,但峰值保护策略并未带来额外收益。

2.4 方案二和方案三比方案一辐射剂量均有大幅降低

方案二辐射剂量百分比约为方案一的50%。方案三辐射剂量约为方案一的57.1%(图3)。

3 讨论

3.1 CTP是AIS诊断关键工具,降低其辐射剂量是重要研究方向

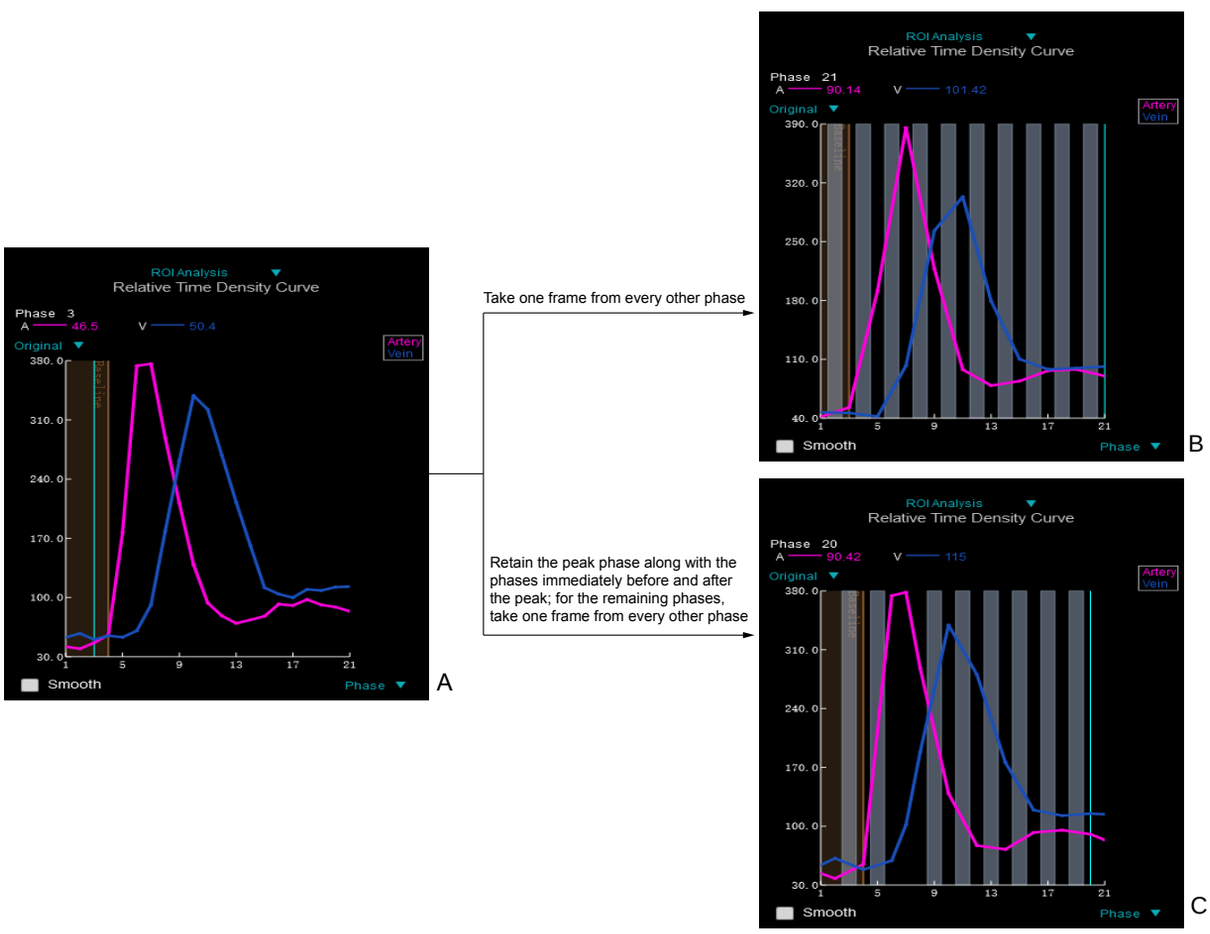
CTP在AIS诊断中的必要性和准确性已得到广泛验证,能够通过定量评估CBF、CBV等参数,准确识别缺血核心与半暗带[16],为静脉溶栓或血管内治疗提供重要依据[17]。多项研究表明,CTP参数与侧支循环状态相关,具备预后判断价值[18]。然而,常规CTP检查辐射剂量较高,存在累积暴露风险,限制了其广泛应用。为应对这一问题,有研究通过延长CTP时间采样间隔来降低辐射剂量,而对灌注参数评估及临床治疗

表2 不符合正态分布的测量值在3种方案的结果对比及3种方案的两两对比结果[$M(P_{25},P_{75})$]

Table 2 Comparison of results from 3 protocols for non-normally distributed measurement values and pairwise comparison results among the 3 protocols [$M(P_{25},P_{75})$]

Protocol	$Mean_{Tmax}$	SD_{MTT}	$Mean_{CBV}$	$Mean_{CBF}$	SD_{CBF}	Mismatch volume/mL
Protocol 1	13.00(11.15,19.90)	1.30(0.90,1.75)	2.60(1.80,4.05)	13.80(10.10,20.15)	1.90(1.40,2.80)	20.60(7.19,64.73)
Protocol 2	12.80(10.05,17.60)[a]	1.50(1.05,2.40)[a]	2.70(1.60,3.90)	13.70(9.65,19.90)	2.30(1.50,3.50)[a]	38.95(15.58,82.09)[a]
Protocol 3	12.80(10.10,18.10)[a]	1.60(1.10,2.50)[a]	2.60(1.65,4.05)	13.70(9.65,19.35)	2.40(1.50,3.20)[a]	27.35(9.73,73.89)[ab]

a: $P<0.0167$, compared with Protocol 1; b: $P<0.0167$, compared with Protocol 2



A: The original time-density curves computed from the default protocol using uAI Discover Cerebral CTP software; B: Time-density curves computed from Protocol 2; C: Time-density curves computed from Protocol 3

图3 默认协议通过不同方式删减时间节点得到优化方案时间密度曲线的示意图

Figure 3 Schematic diagram of the time-density curves for optimized protocols obtained by pruning time points from the default protocol in different ways

决策的影响极小[19]。在所有的灌注参数中,Tmax在检测灌注缺损和定义缺血半暗带方面具有不可替代的独特诊断效能,而MTT、CBV、CBF的最佳角色是作为Tmax的补充,它们共同构成了一个完整、可靠的脑灌注评估方案[20]。因此,在降低辐射剂量的研究中,评估灌注参数的变化尤为重要,这也有助于推动CTP在卒中影像中的更广泛应用[21]。

3.2 Tmax均值对采样策略敏感,降采样可能引入系统性计算偏移

本研究中MTT、CBV、CBF在3种方案的均值(mean)没有显著差异,而Tmax(mean)值出现显著差异,可能是因为Tmax的计算高度依赖于原始时间—

浓度曲线中对比剂首次通过、达到峰值的精确时间点[22]。方案二的降采样方式,极有可能错过或偏移真实的浓度峰值时刻,虽然方案三试图保护峰值,但在峰值附近同样降低了采样密度,且峰值前后的精确形态被改变,这会影响解卷积算法的准确性[23]。当提供给解卷积算法的数据点变少时,算法在拟合曲线时的不确定性增加,基于此计算出的"残余函数"的峰值位置(即Tmax)就会发生改变。但从方案一到方案二、三,Tmax均值(中位数)的变化很小(仅从13.00降至12.80),这表明降采样可能带来的是一个微小但系统性的偏移,因此,很容易在统计检验(如*Friedman*检验)下被检测为"显著"。

3.3 降采样增大各参数变异性,尤以Tmax为甚,可能影响半暗带边界判断

研究发现Tmax、MTT、CBV、CBF这4组灌注参数图在3种方案的SD值均有显著差异。其中Tmax的SD值在3个方案中逐步增加(2.61、3.46、3.58),这印证了随机误差的放大。对于某些病例,降低采样可能影响不大,但对于另一些病例(如对比剂波峰较窄、心排血量较特殊的患者),影响则非常明显,导致不同患者间的Tmax值波动增大。从SD的变化可以看出,这些参数对降采样的敏感度从高到低大致为:Tmax≈MTT>CBV>CBF。Tmax和MTT的SD增大意味着在低剂量方案下,对缺血半暗带(Tmax>6 s)的边界判断会变得更"模糊"。同一个患者,在不同次测量中,计算的低灌注体积可能会有较大波动。这会直接影响到缺血半暗带体积的计算,在方案二的中位数(38.95 mL)较方案一(20.60 mL)有较大幅度增加,而保留了对比剂峰值信息的方案三(27.35 mL)则部分抵消了这一效应,再结合较大的四分位数间距来看,峰值期附近的采样密度对于依赖时间-密度曲线精确形态的Tmax及半暗带体积计算具有关键影响,而采取方案一中不均匀的降低采样方式可能会引入一定的估算偏差。

3.4 缺血半暗带体积的差异凸显算法敏感性,未来需优化采样与后处理以稳定核心参数

RAU等[24]的近期研究虽报告延长采样间隔后半暗带体积一致性极佳(*ICC*>0.97),但也指出绝佳的一致性仍可能导致约1%患者的治疗决策改变。本研究中缺血半暗带体积的中位数变化幅度,在临床决策中通常依据的绝对阈值(如>70 mL)背景下[25],可能并不足以改变多数患者的治疗分类。因此,该差异更可能反映了计算方法在低采样率下的敏感性提升,而非真实灌注状态的本质改变。这为未来研究指明了方向:在降低剂量的同时,需重点优化采样策略或采用先进算法(如人工智能驱动的曲线拟合),以稳定对时间敏感参数(如Tmax)的估算,从而确保缺血半暗带评估的可靠性。CBF的相对稳定是一个比较积极的信号,说明在降低剂量的情况下,用于界定梗死核心(rCBF<30%)的这一关键参数依然是较为可靠的。方案三在CBV的SD控制上似乎比方案二更好一点,但在Tmax和MTT上的改善并不是很明显。这说明单纯保护峰值不足以完全消除降采样对时间参数稳定性的影响。未来进一步的优化方向,可能需要结合先进的去噪算法(如人工智能),在降低采样的同时,对稀疏数据重建出的曲线进行平滑和优化,以抑制SD的增大。

综上所述,方案二和方案三的时间分辨率降低(剂量降低)未改变灌注参数的系统性偏差(均值有显著差异,但其绝对变化很小),表明扫描方案优化保留了关键血流动力学信息的完整性。但时间分辨率降低将引入更大的随机误差,会普遍增大灌注参数的标准差。其中,Tmax、MTT和CBV的参数受影响最严重,而相对标准化后的CBF则展现出较好的稳定性。这一研究为在临床实践中安全、合理地应用低剂量CTP方案提供了重要的理论依据。

利益冲突 本文所有作者声明不存在利益冲突

参考文献:

[1] LIN Y, XING Z, LV S M, *et al*. Colour-coded collateral and venous outflow patterns in estimating infarct progression and predicting functional independence for stroke patients in late time window[J]. Br J Radiol, 2024, 97(1159): 1335-1342. DOI:10.1093/bjr/tqae104.

[2] HOU G S, CHEN H M, LUO L A, *et al*. Discrimination of thrombus types in ischemic stroke using Dual-Energy CT[J]. Eur J Radiol, 2024, 181: 111832. DOI: 10.1016/j.ejrad.2024.111832.

[3] XIAO H, HE Z Y, LI X M, *et al*. Large artery atherosclerotic versus cardioembolism subtypes of large hemispheric infarction in the middle cerebral artery[J]. Neurol Sci, 2025, 46(10): 5173-5181. DOI: 10.1007/s10072-025-08347-9.

[4] 王丽霞,何永桥.急性缺血性脑卒中患者溶栓后梗死核心体积动态分析及其相关因素分析[J].卒中与神经疾病,2024,31(5):427-431. DOI:10.3969/j.issn.1007-0478.2024.05.002.
WANG L X, HE Y Q. Dynamic analysis of infarct core volume and its related factors in patients with acute ischemic stroke after thrombolysis[J]. Stroke Nerv Dis, 2024, 31(5): 427-431. DOI:10.3969/j.issn.1007-0478.2024.05.002.

[5] GUNNARUT I, BUAKATE K. The efficacy of the simple

bypass protocol for chronic cerebral arterial occlusion and moyamoya disease[J]. Chin Neurosurg J, 2025, 11:27. DOI: 10.1186/s41016-025-00413-7.

[6] WANG K, FU W R, LI S J, *et al*. Preoperative symptoms of depression, anxiety, and cognitive impairment in glioma patients: a cerebral perfusion CT study[J]. Brain Behav, 2023, 13(6): e3020. DOI:10.1002/brb3.3020.

[7] MOLDES-ANAYA A, RAGAZZI L, VANGBERG T R, *et al*. Corticolimbic activation patterns during aversive audiogenic stress assessed by cerebral perfusion using [(99m)Tc]HMPAO SPECT/CT[J]. Nucl Med Biol, 2025, 150/151: 109562. DOI:10.1016/j.nucmedbio.2025.109562.

[8] RASHEED Y, BERKHEIMER C, AJAM Z, *et al*. CT brain perfusion imaging utilization following widening of the intracranial mechanical thrombectomy treatment window in a *Cosmos* Multi-institutional population[J]. Appl Sci, 2025, 15(19): 10680. DOI:10.3390/app151910680.

[9] CHEN Z W. Application of CT whole brain perfusion combined with CT angiography in the diagnosis of acute cerebral infarction[J]. Adv Precis Med, 2025, 10(3): 66-71. DOI:10.18063/apm.v10i3.619.

[10] 陆鹏, 洪亮, 汪嫚, 等. CT多模式一站扫描指导急性缺血性脑卒中患者脑血流灌注评估的价值[J]. 转化医学杂志, 2025, 14(6): 72-77. DOI: 10.3639/j.issn.2095-3097.2025.06.014.
LU P, HONG L, WANG M, *et al*. Evaluation value of CT multimodal one-stop scanning for cerebral blood perfusion in patients with acute ischemic stroke[J]. Transl Med J, 2025, 14(6): 72-77. DOI: 10.3639/j.issn.2095-3097.2025.06.014.

[11] 姚燕. 头颅CT血管成像评估缺血性卒中患者侧支循环情况及脑灌注状态的价值分析[J]. 影像研究与医学应用, 2023, 7(11): 17-19. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3807.2023.11.006.
YAO Y. The value of head CT angiography in evaluating collateral circulation and cerebral perfusion status in patients with ischemic stroke[J]. J Imag Res Med Appl, 2023, 7(11): 17-19. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3807.2023.11.006.

[12] GRIMES D A, SCHULZ K F. An overview of clinical research: the lay of the land[J]. Lancet, 2002, 359(9300): 57-61. DOI:10.1016/S0140-6736(02)07283-5.

[13] 刘明, 杨明贵, 李定柯. CTP全脑灌注成像参数预测急性缺血性脑卒中患者脑缺血复发的临床价值[J]. 海南医学, 2025, 36(3): 396-402. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6350.2025.03.018.
LIU M, YANG M G, LI D K. Clinical value of whole-brain perfusion parameters of CTP in predicting the recurrence of cerebral ischemia in patients with acute ischemic stroke[J]. Hainan Med J, 2025, 36(3): 396-402. DOI:10.3969/j.issn.1003-6350.2025.03.018.

[14] LIU S P, WANG Y Y, WU X F, *et al*. Simultaneous determination of three iodinated contrast media in human plasma by LC/MS-MS and its clinical application[J]. J Pharm Biomed Anal, 2025, 262: 116867. DOI: 10.1016/j.jpba.2025.116867.

[15] 赵翔, 李锋坦, 周婉惠. 应用logistic拟合算法提升低采样颅脑CT灌注结果准确性的可行性研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2025, 45(1): 63-68. DOI:10.3760/cma.j.cn112271-20240312-00088.
ZHAO X, LI F T, ZHOU W H. Feasibility of improving the accuracy of under-sampled cerebral CT perfusion results using logistic fitting algorithm[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2025, 45(1): 63-68. DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20240312-00088.

[16] DE LERA ALFONSO M, SIERRA-GOMEZ A, CALLEJA A I, *et al*. The ghost penumbra pattern in acute ischemic stroke: characterization and prognostic significance[J]. J Neuroimaging, 2025, 35: e70100 DOI:10.1111/jon.70100.

[17] ZHENG Y P, JIANG P R, XU X Z, *et al*. A quantitative CT perfusion-derived online dynamic nomogram for predicting hemorrhagic transformation after intravenous thrombolysis in acute ischemic stroke[J]. Eur J Radiol Open, 2025, 15: 100685. DOI:10.1016/j.ejro.2025.100685.

[18] 许勇, 马宇, 徐峰. 全脑CTP在急性缺血性脑卒中侧支循环状态评估中的应用价值[J]. CT理论与应用研究, 2025, 34(6): 1188-1194. DOI:10.15953/j.ctta.2025.007.
XU Y, MA Y, XU F. Application value of whole-brain CTP in the assessment of collateral circulation status in acute ischemic stroke[J]. Comput Tomogr Theory Appl, 2025, 34(6): 1188-1194. DOI:10.15953/j.ctta.2025.007.

[19] WIESMANN M, BERG S, BOHNER G, *et al*. Dose reduction in dynamic perfusion CT of the brain: effects of the scan frequency on measurements of cerebral blood flow, cerebral blood volume, and mean transit time[J]. Eur Radiol, 2008, 18(12): 2967-2974. DOI:10.1007/s00330-008-1083-x.

[20] 王敏可, 王甜甜, 黄金标, 等. 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[J]. 中国医学影像技术, 2025, 41(4): 515-519. DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2025.04.002.
WANG M K, WANG T T, HUANG J B, *et al*. Whole brain CT perfusion combined with artificial intelligence iterative reconstruction for evaluating acute ischemic stroke[J]. Chin J Med Imag Technol, 2025, 41(4): 515-519. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2025.04.002.

[21] HONDA K, ODA S, KONDO D, *et al*. Efficacy of dual-layer spectral detector computed tomography for detecting early ischemic changes in patients with acute ischemic stroke: a pilot study[J]. J Clin Imag Sci, 2025, 15: 11. DOI:10.25259/jcis_171_2024.

[22] KUDO K, SASAKI M, ØSTERGAARD L, *et al*. Susceptibility of T_{max} to tracer delay on perfusion analysis: quantitative evaluation of various deconvolution algorithms using digital phantoms[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2011, 31(3): 908-912. DOI:10.1038/jcbfm.2010.169.

[23] CHUNG K J, DE SARNO D, LEE T Y. CT perfusion stroke lesion threshold calibration between deconvolution algorithms[J]. Sci Rep, 2023, 13: 21458. DOI: 10.1038/s41598-023-48700-6.

[24] RAU A, REISERT M, STEIN T, *et al*. Impact of temporal resolution on perfusion metrics, therapy decision, and radiation dose reduction in brain CT perfusion in patients with suspected stroke[J]. Neuroradiology, 2024, 66(5): 749-759. DOI:10.1007/s00234-024-03335-w.

[25] NAEL K. Eloquence-based mismatch: identifying endovascular therapy responders in acute stroke[J]. Radiology, 2023, 306(2): e222257. DOI: 10.1148/radiol.222257.

(**收稿**:2025-11-21;**修回**:2026-01-15)

(编辑 严 涵)