

## • 中枢神经影像学 •

## 基于低辐射剂量全模型迭代 CTP 的颅脑侧支循环研究

吴晓玲, 胡杉, 莫梓华, 杨云竣, 黄颺

**【摘要】 目的:**探讨基于全模型迭代重建技术(IMR)低辐射剂量 CT 灌注(CTP)容积数据重组的多期相 CT 血管成像(CTPA)在单侧大脑中动脉(MCA)狭窄患者侧支循环的评估价值。**方法:**收集 68 例单侧 MCA 狭窄行 CTP、CTA 检查的患者,利用 CTP 原始数据重组出多期相 CTPA 图像,评估 CTP 伪彩图主观图像质量,比较 CTPA 与 CTA 血管强化 CT 值、图像噪声、信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)、主观图像质量及侧支循环评分。**结果:**CTP 伪彩图图像质量主观评分为  $7.28 \pm 1.09$  分,56 例(83%)患者伪彩图图像质量良好。CTPA 主观图像质量良好,血管强化 CT 值( $390.94 \pm 78.02$  vs.  $116.13 \pm 52.66$ )、SNR( $17.07 \pm 10.11$  vs.  $13.00 \pm 6.80$ )及 CNR( $14.95 \pm 8.74$  vs.  $5.42 \pm 2.87$ )高于 CTA 组(均  $P < 0.05$ ),图像噪声高于 CTA 组( $30.25 \pm 16.24$  vs.  $12.34 \pm 10.88$ ,  $P < 0.001$ )。CTPA 组的侧支评分高于 CTA 组( $1.79 \pm 0.64$  vs.  $1.22 \pm 0.77$ ,  $P < 0.001$ )。**结论:**源于低辐射剂量 CTP 的多期相 CTA,图像质量能满足临床需求,能全面评估单侧 MCA 狭窄患者侧支循环状态。

**【关键词】** 脑缺血;灌注成像;CT 血管成像;侧支循环;全模型迭代重建

**【中图分类号】** R743;R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2020)03-0334-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2020.03.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**The study of cerebral collateral circulation based on low-dose iterative model reconstruction CTP** WU Xiao-ling, HU Shan, MO Zi-hua, et al. School of Medicine, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China

**【Abstract】 Objective:** To explore the value of multiphase CTA (CTPA) derived from low-dose CT perfusion (CTP) volume datasets reconstructed with iterative model reconstruction (IMR) on evaluating collateral circulation in patients with unilateral middle cerebral artery (MCA) steno-occlusion. **Methods:** Sixty-eight patients with unilateral MCA steno-occlusion underwent CTP and CTA. Multiphase CTPA images were reconstructed from CTP source data. We evaluated the subjective image quality of CTP parameter maps, compared the vascular attenuation, image noise, signal-to-noise ratio (SNR), contrast-to-noise ratio (CNR), subjective image quality and collateral score of CTPA with routine CTA. **Results:** The subjective image quality score of CTP parameters maps was  $7.28 \pm 1.09$ , CTP parameters maps of 56 (83%) patients were considered to be of good quality. The subjective image quality of CTPA images was good, the vascular attenuation ( $390.94 \pm 78.02$  vs.  $116.13 \pm 52.66$ ), SNR ( $17.07 \pm 10.11$  vs.  $13.00 \pm 6.80$ ) and CNR ( $14.95 \pm 8.74$  vs.  $5.42 \pm 2.87$ ) of CTPA were higher than that of CTA (all,  $P < 0.05$ ). The image noise of CTPA was higher than that of CTA ( $P < 0.001$ ). Collaterals were rated higher on CTPA compared with CTA ( $1.79 \pm 0.64$  vs.  $1.22 \pm 0.77$ ,  $P < 0.001$ ). **Conclusion:** Multiphase CTA derived from low-dose CTP source data can satisfy the clinical diagnosis and accurately evaluate collateral circulation in patients with unilateral MCA steno-occlusion.

**【Key words】** Brain ischemia; Perfusion imaging; Computed tomography angiography; Collateral circulation; Iterative model reconstruction

**作者单位:** 510006 广州, 华南理工大学医学院(吴晓玲、莫梓华); 510080 广州, 广东省医学科学院, 华南理工大学附属广东省人民医院放射科(吴晓玲、胡杉、莫梓华、杨云竣、黄颺)

**作者简介:** 吴晓玲(1995—), 女, 山西怀仁人, 硕士研究生, 主要从事神经系统影像诊断工作。

**通讯作者:** 黄颺, E-mail: huangbiao@gdph.org.cn

**基金项目:** 广东省重点领域研发计划项目(2018B030339001)

缺血性脑血管病具有发病率高、死亡率高、致残率高、复发率高的特点,是严重威胁我国居民健康的重大疾病。急性缺血性脑血管病患者如果存在侧支循环,可维持脑血流灌注使缺血半暗带维持较长时间,能降低出血转化的风险<sup>[1]</sup>,降低脑中风复发风险<sup>[2]</sup>。2018

年美国心脏协会/美国卒中协会推荐评估侧支循环状态来指导临床决策,筛选适合机械取栓的患者<sup>[3]</sup>。全面评估侧支循环状态对指导临床工作有重要的意义。DSA 是评估侧支循环的金标准,但属于有创性检查。CT 血管成像(computed tomography angiography, CTA)是一种快速无创的成像方法,可以显示 Willis 环的完整性,颅内血管狭窄的部位、程度等,但常规的单期 CTA 可能会低估侧支循环<sup>[4]</sup>。多期 CTA、4D-CTA 虽然可以较好的显示侧支血管,但辐射剂量也明显增加<sup>[5]</sup>。CT 灌注(computed tomography perfusion, CTP)成像覆盖了对比剂从动脉流入到静脉流出的整个过程,因此可以进行动态脑血管成像。全模型迭代重建技术(iterative model reconstruction, IMR)是一种新型的迭代重建技术,辐射剂量极低,从基于 IMR 技术的 CTP 原始数据可重组出多期相 CTA,在不增加患者辐射剂量及对比剂使用量前提下,既能获得脑组织血流灌注信息,又能动态、全面评估患者侧支循环情况。本研究的主要目的是分析从基于 IMR 技术 CTP 原始数据中重组的多期相 CTA 的图像质量,探讨其在缺血性脑血管病患者侧支循环评估中的价值。

## 材料与方法

### 1. 一般资料

搜集 2016 年 4 月—2019 年 9 月在本院行血管内治疗的 MCA 狭窄患者。纳入标准:①短暂性脑缺血发作或缺血性卒中症状发作 14 天内;②既往行 MRA 或 DSA 检查发现单侧 MCA 重度狭窄或闭塞;③年龄 >18 岁;④美国国立卫生研究院卒中量表(NIHSS)评分  $\geq 5$ ;⑤CT 检查前未接受任何血管内治疗。排除标准:①常规头颅 CT 平扫提示颅内出血;②严重的心、肺、肝、肾功能不全,无法耐受 CT 检查;③CT 扫描过程中运动伪影严重,影响图像观察;④临床或影像资料不完善。本研究经医院伦理委员会批准,所有患者在检查前均签署知情同意书。

### 2. 检查方法及参数

采用 256 层螺旋 CT(Philips Brilliance iCT)进行 CT 扫描,患者采用仰卧位,头先进,用固定带固定头部,嘱患者保持头部不动,平静呼吸。所有患者先行头颅 CT 平扫排除颅内出血后再行头颅 CTP 及 CTA 检查。头颅 CT 平扫,管电压 120 kVp,管电流 350 mAs,层厚 5 mm,探测器  $64 \times 0.625$  mm,矩阵  $512 \times 512$ 。以眦耳线为基线,扫描层面与基线平行,扫描范围从颅底部至颅顶部。CTP 扫描范围以眦耳线为基线,从颅底部向上 80 mm。管电压 80 kVp,管电流 50 mAs,层厚 5 mm,探测器  $128 \times 0.625$  mm,矩阵  $512 \times 512$ ,视

野  $220$  mm  $\times$   $220$  mm。采用双筒高压注射器经肘前静脉团注非离子型对比剂碘普罗胺( $370$  mg I/mL,拜耳医药)约  $40$  mL,注射流率为  $4.0$  mL/s,然后以相同流率注射生理盐水  $20$  mL。注射对比剂后延迟  $8$  s 开始扫描,采用不移动扫描床模式连续采集  $40$  个不同期相动态容积数据,每期循环扫描时间  $0.8$  s,总扫描时间  $32$  s。头颅 CTA 扫描范围从颅底部至颅顶部,管电压  $120$  kVp,管电流  $350$  mAs,层厚  $1$  mm,探测器  $64 \times 0.625$  mm,矩阵  $512 \times 512$ 。

### 3. 图像后处理

CTP 原始数据经 IMR 重建算法重建后,将层厚为  $5$  mm 的原始图像重组为  $1$  mm 薄层图像用于 CTA 成像。将所有图像传至 CT 图像后处理工作站(Philips Intelli Space Portal, v6.0.6.20039),运行工作站 Brain Perfusion 软件,自动选择大脑前动脉为输入动脉,上矢状窦为输出静脉,经工作站后处理得到时间-密度曲线(time-density curve, TDC)及脑血容量(cerebral blood volume, CBV)、脑血流量(cerebral blood flow, CBF)、平均通过时间(mean transit time, MTT)及达峰时间(time to peak, TTP)灌注伪彩图。根据 TDC 曲线选取动脉期(以动脉强化峰值为中心的  $5$  个时相)、动脉晚期(动脉期后的  $5$  个时相)及静脉期(以静脉强化峰值为中心的  $5$  个时相),为提高图像信噪比,将不同期的  $5$  个时相图像进行融合重组,分别重组为层厚为  $1$  mm 的动脉期、动脉晚期及静脉期 CT 灌注血管成像(CT perfusion angiography, CTPA)图像。将不同期相 CTPA 图像采用最大密度投影(maximum intensity projection, MIP)及多平面重组(multiplanar reconstruction, MPR)方法显示血管。为更好地观察侧支血管,将层厚为  $1$  mm 的动脉期、动脉晚期的 CTPA 图像重组为层厚为  $25$  mm 的 MIP 图像,采用相同的窗宽、窗位显示,然后用动脉晚期的 MIP 图像减去动脉期 MIP 图像,得到减影后 MIP 图像。

### 4. 图像分析

由 5 年以上神经影像诊断经验的放射科医师对 CTP 及 CTPA 图像质量进行主观评价,并评价侧支循环情况。患者的临床信息、扫描参数、检查号等被隐藏。CTPA 图像随机分配给医师,采用统一显示屏及相同的窗宽、窗位显示,结合横轴面、MPR、MIP 图像对颅内血管进行分析评估。

①CTP 主观质量评价:对四种灌注伪彩图进行脑灰白质分界、缺血灶与正常组织伪彩色阶差异、图像均匀性、图像伪影严重程度评分,每项指标均作  $0 \sim 2$  分评分: $0$  分,差; $1$  分,中等; $2$  分,好。将各项指标评分相加作为图像质量主观评分,总分最高为  $8$  分。 $\leq 3$  分认为图像质量差,不能诊断; $>3$  分且  $\leq 6$  分认为图

像质量中等,可以诊断; $>6$  分认为图像质量好,诊断明确<sup>[6]</sup>。

②CTPA 客观质量评价:在 CTA、动脉期 CTPA 图像上正常一侧 MCA 近端放置兴趣区(ROI),大小为  $1\sim 3\text{ mm}^2$ ,尽量避开血管壁和钙化斑块。保持两组图像中 ROI 位置、大小一致。记录每个 ROI 的 CT 值及 CT 值的标准差(standard deviation,SD)。SD 作为图像噪声。在同层面肌肉放置 ROI,大小为  $15\sim 30\text{ mm}^2$ 。测量同层面肌肉的 CT 值。所有 ROI 均测量 3 次,取平均值。利用公式计算信噪比(signal to noise ratio,SNR)及对比噪声比(contrast to noise ratio,CNR), $\text{SNR} = \text{CT}_{\text{血管}}/\text{SD}_{\text{血管}}$ , $\text{CNR} = (\text{CT}_{\text{血管}} - \text{CT}_{\text{肌肉}})/\text{SD}_{\text{血管}}$ 。

③CTPA 主观质量评价:对 CTA、CTPA 图像进行动脉强化、小动脉细节显示、图像噪声、静脉污染四个方面评分,每项均作 0~2 分评分:0 分,差;1 分,中等;2 分,好。

④CTPA 侧支循环评价:根据患侧 MCA 供血区与对侧正常大脑半球相比,侧支血管显示程度进行 4 分评价法<sup>[7]</sup>。0 分:无侧支血管;1 分:侧支血管  $< 50\%$ ;2 分: $50\% \leq$  侧支血管  $< 100\%$ ;3 分:侧支血管  $100\%$ 。 $\geq 2$  分认为侧支循环良好, $< 2$  分认为侧支循环差。

## 5. 辐射剂量

记录 CT 扫描完成后自动生成的剂量参数,包括 CT 容积剂量指数(volume CT dose index,CTDIvol)和剂量长度乘积(dose length product,DLP),并计算有效剂量  $E = \text{DLP} \times k$ ,其中  $k$  为转换因子,成人头部  $k$  为  $0.0021/\text{mSv} \cdot \text{mGy}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

## 6. 统计学分析

采用 SPSS 22.0 统计软件进行统计学分析。CTPA 血管强化 CT 值、图像噪声、SNR、CNR 比较采用配对  $t$  检验,不符合正态分布时采用 Wilcoxon 符号秩和检验。CTPA 图像质量主观评分、侧支循环评分采用 Wilcoxon 符号秩和检验。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 结 果

### 1. 一般临床资料

共纳入 68 例患者,其中男 54 例,女 14 例,年龄  $39\sim 81$  岁,平均  $(61.2 \pm 9.7)$  岁,从症状发作到进行检查时间为  $7\text{ h} \sim 14$  天。主要临床症状包括:头痛、头晕、一侧肢体乏力、意识障碍、言语不清等。

### 2. 辐射剂量

根据计算公式得出 CT 平扫的有效辐射剂量为  $1.83\text{ mSv}$ ,CTP 的有效辐射剂量为  $1.28\text{ mSv}$ ,CTA 的

有效辐射剂量为  $1.83\text{ mSv}$ 。

### 3. CTP 主观质量评价

灌注伪彩图图像质量主观评分为  $7.28 \pm 1.09$  分。其中 3 例 4 分(4%),3 例 5 分(4%),6 例 6 分(9%),16 例 7 分(24%),40 例 8 分(59%)。56 例(83%)患者灌注伪彩图图像整体质量良好,可以满足诊断需求。图像脑灰白质分界清晰,梗死灶与正常脑组织伪彩色阶差异明显,图像均匀性良好,没有明显的伪影(图 1)。

### 4. CTPA 客观质量评价

CTPA 组的血管强化 CT 值、SNR、CNR 明显高于 CTA 组(均  $P < 0.05$ ,表 1)。CTPA 组血管强化 CT 值为  $(390.94 \pm 78.02)\text{ HU}$ ,CTA 组为  $(116.13 \pm 52.66)\text{ HU}$ 。CTPA 组的 SNR、CNR 比 CTA 组分别增加了 31%、176%。CTPA 组噪声高于 CTA 组( $T = 2189, P < 0.001$ )。

### 5. CTPA 主观质量评价

CTPA 组图像质量良好,图像血管边缘光滑,锐利,动脉远端分支显示清晰,图像质量能满足临床诊断需求(图 2)。在动脉强化、小动脉细节显示及静脉污染方面 CTPA 组图像质量优于 CTA 组(均  $P < 0.05$ ,表 2)。CTPA 组图像噪声高于 CTA 组( $P < 0.001$ ,表 2)。

### 6. CTPA 侧支循环评价

CTPA 组的侧支评分高于 CTA 组( $1.79 \pm 0.64$  vs.  $1.22 \pm 0.77, P < 0.001$ )。CTA 组只能显示动脉期的脑内主要动脉,而 CTPA 组可显示延迟显影的侧支血管。54%(37/68)患者 CTPA 侧支评分高于 CTA,46%(31/68)患者二者侧支评分结果相同。CTPA 组中有 71%(48/68)侧支循环良好,CTA 组中有 31%(21/68)侧支循环良好。有些患者的侧支血管在单期 CTA 中显示不佳,在多期相 CTPA 中侧支血管显示良好(图 3),减影 MIP 图像能更加直观、清晰地显示侧支血管(图 3d)。

表 1 CTA 与 CTPA 组图像质量客观评价结果

| 指标   | CTA 组              | CTPA 组             | $t/T$ 值 | $P$ 值     |
|------|--------------------|--------------------|---------|-----------|
| CT 值 | $116.13 \pm 52.66$ | $390.94 \pm 78.02$ | -25.92  | $< 0.001$ |
| 噪声   | $12.34 \pm 10.88$  | $30.25 \pm 16.24$  | 2189    | $< 0.001$ |
| SNR  | $13.00 \pm 6.80$   | $17.07 \pm 10.11$  | 1642    | 0.004     |
| CNR  | $5.42 \pm 2.87$    | $14.95 \pm 8.74$   | 2328    | $< 0.001$ |

表 2 CTA 与 CTPA 组图像质量主观评价结果

| 指标      | CTA 组           | CTPA 组          | $T$ 值 | $P$ 值     |
|---------|-----------------|-----------------|-------|-----------|
| 动脉强化    | $1.79 \pm 0.41$ | $1.94 \pm 0.24$ | 110.5 | 0.012     |
| 小动脉细节显示 | $1.62 \pm 0.49$ | $1.93 \pm 0.26$ | 264   | $< 0.001$ |
| 图像噪声    | $1.99 \pm 0.12$ | $1.79 \pm 0.41$ | 0     | $< 0.001$ |
| 静脉污染    | $1.72 \pm 0.45$ | $1.91 \pm 0.29$ | 112   | 0.001     |

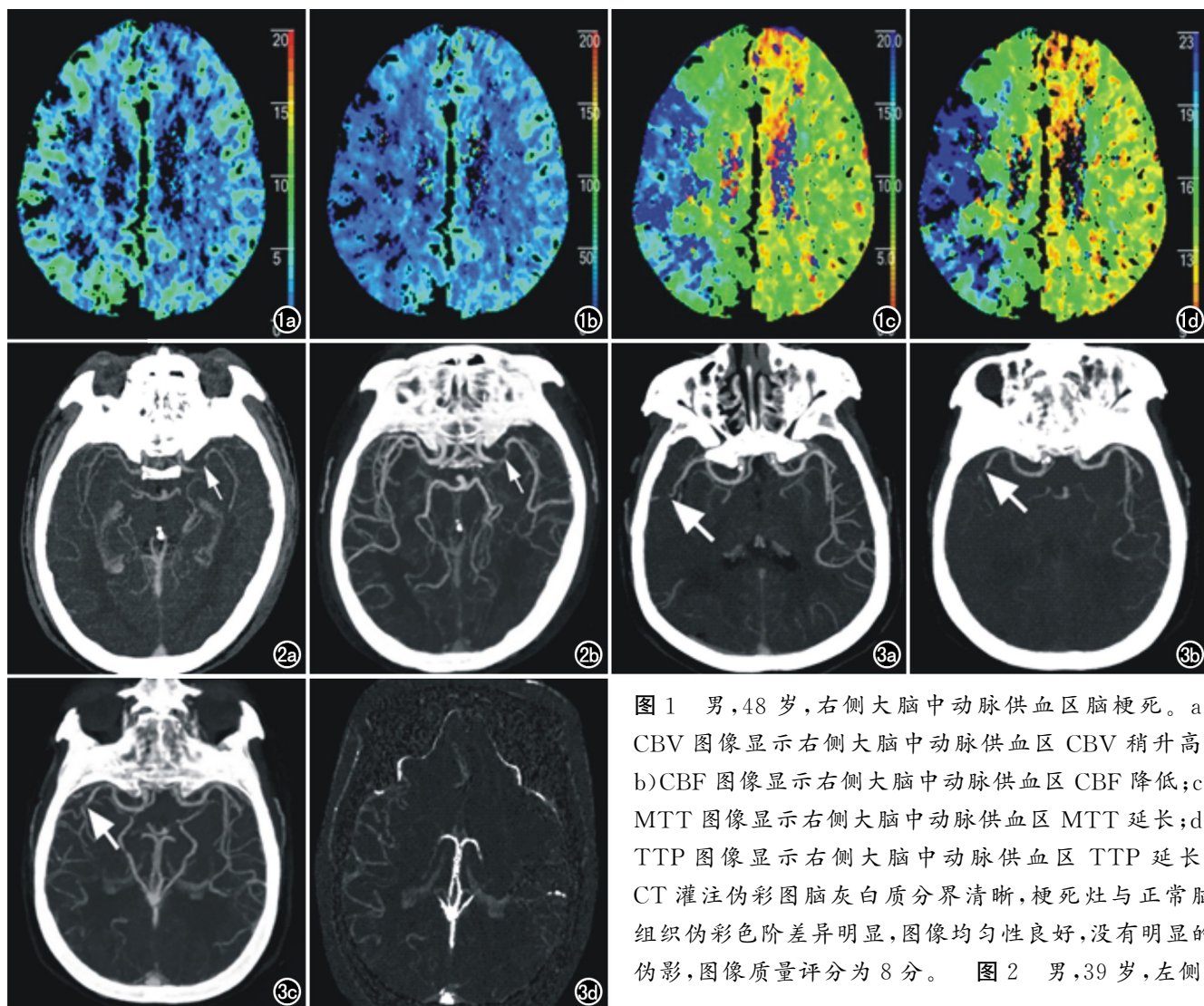


图 1 男, 48 岁, 右侧大脑中动脉供血区脑梗死。a) CBV 图像显示右侧大脑中动脉供血区 CBV 稍升高; b) CBF 图像显示右侧大脑中动脉供血区 CBF 降低; c) MTT 图像显示右侧大脑中动脉供血区 MTT 延长; d) TTP 图像显示右侧大脑中动脉供血区 TTP 延长。CT 灌注伪彩图脑灰白质分界清晰, 梗死灶与正常脑组织伪彩色阶差异明显, 图像均匀性良好, 没有明显的伪影, 图像质量评分为 8 分。图 2 男, 39 岁, 左侧

大脑中动脉重度狭窄。a) 常规 CTA 图像显示左侧大脑中动脉 M1 段重度狭窄; b) 动脉晚期 CTPA 图像同样清晰显示左侧大脑中动脉 M1 段重度狭窄, 小动脉细节显示更好。CTA 图像动脉强化、小动脉细节显示、图像噪声、静脉污染评分均为 1 分, 而 CTPA 图像均为 2 分。图 3 女, 74 岁, 右侧大脑中动脉狭窄。a) 常规 CTA 重组 MIP 图像显示右侧大脑中动脉 M2 段重度狭窄, 狭窄血管远端侧支血管显示不清; b) CTPA 动脉期重组 MIP 图像显示右侧大脑中动脉 M2 段重度狭窄; c) 动脉晚期重组 MIP 图像显示狭窄血管远端可见丰富的侧支血管; d) 减影 MIP 图像显示右侧大脑中动脉供血区存在丰富的侧支血管。

## 讨论

脑梗死后侧支循环的建立存在个体差异, 良好的侧支循环能改善脑组织的缺血状况、减缓缺血半暗带组织坏死, 减少梗塞灶的数量和体积<sup>[8]</sup>, 改善预后。本研究发现基于 IMR 算法的 CTP 检查可以大幅度降低患者接受的辐射剂量, 不影响 CTP 灌注参数图的质量和诊断价值。重组的 CTPA 在没有增加辐射剂量的前提下, 图像质量与常规 CTA 相当, 又可以动态评估侧支循环的状态, 重组的 CTPA 图像经减影后能直观地显示侧支血管。

CT 灌注成像已经广泛应用于缺血性脑血管病的

评估<sup>[9-11]</sup>。2018 年美国心脏协会/美国卒中协会推荐卒中发作 6~24 h 内的前循环大血管闭塞患者行 CT 灌注检查, 筛选适合机械取栓的患者<sup>[3]</sup>。CTP 检查需要对感兴趣区进行反复多次扫描, 因此患者接受的辐射剂量比常规 CT 检查明显增加。目前有多种方法可以降低 CTP 的辐射剂量, 包括降低管电压、降低管电流及改善重建技术等。

全模型迭代重建技术 (iterative model reconstruction, IMR) 是一种新型的完全迭代重建技术, 与部分迭代重建技术不同, IMR 技术充分考虑了系统模型、图像统计模型和数据统计模型, 通过复杂的迭代运算, 反复对扫描模型与采集数据进行对比、校正, 最终得到

低噪声的高质量图像<sup>[12-13]</sup>。一些体模试验和临床研究证实,IMR 技术与滤波反投影法(filtered back projection,FBP)相比可以降低辐射剂量 75%~90%<sup>[14-16]</sup>,降低图像噪声 59.1%~81.1%<sup>[17]</sup>,提高图像 CNR 约 330%<sup>[18]</sup>,而不影响图像质量。降低管电流是简单有效的降低辐射剂量的方法<sup>[9]</sup>,因为管电流与辐射剂量呈线性相关。有研究表明将管电流从 190 mAs 降低到 127 mAs,不影响 CTP 的定量参数值和主观图像质量<sup>[19]</sup>。进一步研究表明,将管电流降低至 72mAs 不会影响 CT 灌注图像的诊断准确性<sup>[20]</sup>。Murphy 等<sup>[21]</sup>研究发现即使将管电流降低至 50 mAs 也能获得足够的图像质量。但管电流低于 50 mAs 时会严重影响灌注图像的质量<sup>[19,21]</sup>。当管电压为 80 kVp 时,降低了 X 射线的能量,更接近于对比剂中碘原子的 K 缘,此时碘原子对 X 射线的吸收率最大,图像的 CT 值更高<sup>[22]</sup>。本研究采用 50 mAs 管电流、80 kVp 管电压联合 IMR 技术,CTP 的辐射剂量仅为 1.28 mSv,CTP 伪彩图图像质量良好,脑灰白质分界清晰,缺血灶与正常脑组织伪彩色阶差异明显,图像均匀性良好,没有明显的伪影,可以满足临床诊断需求。

CTP 图像可以获得脑血流灌注信息,这些图像覆盖了对比剂从动脉流入到静脉流出的整个过程,因此可以根据需要分别对狭窄的动脉以及侧支血管进行多期相显像。有研究表明,利用 CTP 原始数据重组出的 CTA 图像质量与常规 CTA 相当。重组的 CTA 图像结合 CT 灌注参数图检测颅内动脉狭窄的敏感度为 94%,阳性预测值为 100%<sup>[23]</sup>。除此之外,重组的 CTA 图像还可以发现单期 CTA 不能显示的侧支血管,全面、准确评估侧支循环的程度、速度<sup>[24-27]</sup>。本研究团队之前的研究从基于迭代算法(iDose4 技术)CTP 原始数据中重组出 CTA 图像,虽然重组图像也能够满足临床诊断需求,但图像质量比常规的 CTA 要差<sup>[28]</sup>。本研究采用 IMR 迭代重建技术,重组的 CTPA 图像血管强化 CT 值、SNR、CNR 明显高于 CTA 组,图像血管边缘光滑、锐利,动脉细节显示清晰,图像质量良好,可以满足临床诊断需求。CTPA 组的侧支评分高于常规 CTA 组,这一结果与 Smit 等<sup>[7]</sup>及 Menon 等<sup>[29]</sup>的研究结果类似。多期相的 CTPA 图像可以避免单期 CTA 单一时间点采集图像,无法动态显示血管的问题,可以更加全面评估颅内血管狭窄程度以及侧支循环的状态。

侧支循环的影像学评估方法包括结构学和功能学评估。全面评估侧支循环的结构和功能有助于确立患者个体化治疗方案及判断预后。侧支循环结构学评估方法包括:CTA、MRA、DSA 等。DSA 被认为是评估侧支循环的金标准,但是 DSA 是有创性检查,在无条

件或不适用 DSA 检查时,无创性影像检查仍是主要的检查手段。单期 CTA 可以无创评估侧支循环,但缺点是单期 CTA 是单一时间点成像,会造成侧支评估的低估,因为在病理状态下,侧支血管的显示往往是延迟的。多期 CTA、动态 CTA 及 4D-CTA 可以准确评估侧支循环,但是会明显增加患者接受的辐射剂量<sup>[5]</sup>,因此不适用于临床常规检查。功能学评估方法包括 CTP 和磁共振灌注成像等。这些技术通过评估脑血流状态间接评估侧支循环。结构学和功能学评估相结合才能全面、准确评估侧支循环的状态。本研究中,CTP 联合 CTPA 不仅可以获得反映脑组织血流灌注状态的功能成像,还可以动态评估侧支血管。利用减影的方法,可以去颅骨、脑实质对脑血管观察的影响,更加清晰、直观的显示侧支血管情况。

本研究存在以下局限性。首先,研究中 CTP 的覆盖范围为 8 cm,未能实现全脑 CTP 扫描,但 8 cm 的扫描范围基本覆盖了颅底至半卵圆中心大部分脑组织及主要的颅内血管,可满足临床诊断需要。此外,本研究仅纳入大脑中动脉狭窄的患者,研究结果是否适用于后循环缺血的患者仍需要进一步研究。

综上所述,基于 IMR 算法的 CTP 检查可以大幅度降低患者接受的辐射剂量,不仅可以获得脑组织血流灌注信息,还可以重组出多期相 CTPA 图像。CTPA 不仅图像质量可以与常规 CTA 相媲美,还可以全面评估大脑中动脉狭窄患者的侧支循环状态,经减影后能直观、清晰地显示侧支血管。总之,对于大脑中动脉狭窄患者,CTP 联合 CTPA 图像可以快速提供脑血流灌注信息,全面评估脑侧支循环的结构和功能,为缺血性脑血管病患者的病情评估、个体化治疗方案的选择提供重要依据。

#### 参考文献:

- [1] Bang OY, Saver JL, Kim SJ, et al. Collateral flow averts hemorrhagic transformation after endovascular therapy for acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2011, 42(8): 2235-2239.
- [2] Liebeskind DS, Cotsonis GA, Saver JL, et al. Collaterals dramatically alter stroke risk in intracranial atherosclerosis[J]. Ann Neurol, 2011, 69(6): 963-974.
- [3] Powers WJ, Rabinstein AA, Ackerson T, et al. 2018 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association [J]. Stroke, 2018, 49(3): e46-e110.
- [4] Bang OY, Goyal M, Liebeskind DS. Collateral circulation in ischemic stroke: assessment tools and therapeutic strategies [J]. Stroke, 2015, 46(11): 3302-3309.
- [5] Alnemari A, Mansour TR, Bazerbashi M, et al. Dynamic four-dimensional computed tomography angiography for neurovascular pathologies[J]. World Neurosurg, 2017, 105: 1034.

- [6] Fang XK, Ni QQ, Schoepf UJ, et al. Image quality, radiation dose and diagnostic accuracy of 70kVp whole brain volumetric CT perfusion imaging: a preliminary study[J]. Eur Radiol, 2016, 26(11): 4184-4193.
- [7] Smit EJ, Vonken EJ, van Seeters T, et al. Timing-invariant imaging of collateral vessels in acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2013, 44(8): 2194-2199.
- [8] Fanou EM, Knight J, Aviv RI, et al. Effect of collaterals on clinical presentation, baseline imaging, complications, and outcome in acute stroke[J]. AJNR, 2015, 36(12): 2285-2291.
- [9] Othman AE, Afat S, Brockmann MA, et al. Radiation dose reduction in perfusion CT imaging of the brain: a review of the literature[J]. J Neuroradiol, 2016, 43(1): 1-5.
- [10] Lansberg MG, Christensen S, Kemp S, et al. Computed tomographic perfusion to predict response to recanalization in ischemic stroke[J]. Ann Neurol, 2017, 81(6): 849-856.
- [11] Vilela P, Rowley HA. Brain ischemia: CT and MRI techniques in acute ischemic stroke[J]. Eur J Radiol, 2017, 96: 162-172.
- [12] 吴晓玲, 黄飏. 全模型迭代重建在头颈部 CT 血管成像中的应用[J]. 国际医学放射学杂志, 2019, 42(4): 418-421.
- [13] 唐琴, 夏振元, 莫欣鑫, 等. 全模型迭代重建对肝硬化门静脉图像质量的影响[J]. 放射学实践, 2019, 34(6): 651-654.
- [14] Mehta D, Thompson R, Morton T, et al. Iterative model reconstruction: Simultaneously lowered computed tomography radiation dose and improved image quality[J]. Med Phys Int J, 2013, 2: 147-155.
- [15] Kim H, Park CM, Song YS, et al. Influence of radiation dose and iterative reconstruction algorithms for measurement accuracy and reproducibility of pulmonary nodule volumetry: A phantom study[J]. Eur J Radiol, 2014, 83(5): 848-857.
- [16] Khawaja RDA, Singh S, Blake M, et al. Ultra-low dose abdominal MDCT: using a knowledge-based Iterative Model Reconstruction technique for substantial dose reduction in a prospective clinical study[J]. Eur J Radiol, 2015, 84(1): 2-10.
- [17] Patino M, Fuentes JM, Hayano K, et al. A quantitative comparison of noise reduction across five commercial (hybrid and model-based) iterative reconstruction techniques: an anthropomorphic phantom study[J]. AJR, 2015, 204(2): W176-W183.
- [18] Yuki H, Utsunomiya D, Funama Y, et al. Value of knowledge-based iterative model reconstruction in low-kV 256-slice coronary CT angiography[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2014, 8(2): 115-123.
- [19] Juluru K, Shih JC, Raj A, et al. Effects of increased image noise on image quality and quantitative interpretation in brain CT perfusion[J]. AJNR, 2013, 34(8): 1506-1512.
- [20] Othman AE, Brockmann C, Yang Z, et al. Effects of radiation dose reduction in volume perfusion CT imaging of acute ischemic stroke[J]. Eur Radiol, 2015, 25(12): 3415-3422.
- [21] Murphy A, So A, Lee TY, et al. Low dose CT perfusion in acute ischemic stroke[J]. Neuroradiology, 2014, 56(12): 1055-1062.
- [22] Diego L, Atul P, Kalra MK, et al. Tube potential and CT radiation dose optimization[J]. AJR, 2015, 204(1): 4-10.
- [23] Frolich AM, Psychogios MN, 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.
- [24] Smit EJ, Vonken EJ, Meijer FJ, et al. Timing-invariant CT angiography derived from CT perfusion Imaging in acute stroke: a diagnostic performance study[J]. AJNR, 2015, 36(10): 1834-1838.
- [25] Ir VDW, Holswilder G, Wermer MJ, et al. Assessment of collateral status by dynamic CT angiography in acute MCA stroke: timing of acquisition and relationship with final infarct volume[J]. AJNR, 2016, 37(7): 1231-123.
- [26] Wu X, Yang Y, Wen M, et al. Ultra-low-dose multiphase CT angiography derived from CT perfusion data in patients with middle cerebral artery stenosis[J]. Neuroradiology, 2019, DOI: 10.1007/s00234-019-02313-x.
- [27] 周运锋, 董立军, 杨晨, 等. 动态 CTA 对非时间窗内前循环脑缺血患者侧枝及血流状态的评估[J]. 放射学实践, 2018, 33(3): 259-264.
- [28] 黎佩君, 黄飏, 梁长虹, 等. 低剂量脑 CT 灌注的迭代重建研究[J]. 放射学实践, 2015, 30(9): 932-935.
- [29] Menon BK, d'Esterre CD, Qazi EM, et al. Multiphase CT angiography: a new tool for the imaging triage of patients with acute ischemic stroke[J]. Radiology, 2015, 275(2): 510-520.

(收稿日期: 2019-11-05 修回日期: 2019-12-27)