

论著·头颈部

双PLD 3D-ASL技术评估前循环大血管重度狭窄/闭塞TIA脑血流动力学的研究*

曾利川¹ 张耀丹² 任逢春^{1,*}

1.成都中医药大学附属医院放射科

2.成都中医药大学附属医院神经内科

(四川 成都 610072)

【摘要】目的 采用双标记延迟时间(post labeling delays, PLD)三维动脉自旋标记成像(three-dimensional arterial spin labeling, 3D ASL)分析前循环大血管重度狭窄/闭塞短暂性脑缺血发作(transient ischemic attack, TIA)患者脑实质的血流灌注水平及储备情况, 探究其评价血流动力学的临床价值。方法 连续收集我院2016年1月至2023年6月诊断的颈内动脉或大脑中动脉重度狭窄/闭塞的TIA患者临床及影像学资料。磁共振血管成像或CT血管成像确定动脉狭窄情况。所有患者采用GE Discovery 750 3.0 T进行磁共振检查, ASL均行长、短两个标记延迟时间(PLD=1525/2525 ms)扫描, 分别由两名有经验的放射科医师测量脑血流量值(cerebral blood flow, CBF)。测量患侧与镜像健侧供血区域的CBF, 获得相应血流量(CBF1和CBF2), 再根据公式 $\Delta CBF=CBF2-CBF1$, 计算出相应血流储备能力估计值 ΔCBF 。依据PLD=2525 ms时患侧与镜像健侧CBF比值大小将患者分为侧支代偿储备组(A组)和代偿不良组(B组), 比值 ≥ 0.8 记为代偿储备组, < 0.8 记为代偿不良组, 分别比较两组间患侧在不同PLD条件下CBF值以及脑血流储备 ΔCBF , 分析 ΔCBF 与临床ABCD2评分的相关性。结果 共纳入37例TIA患者, 年龄 61.5 ± 7.2 岁, ABCD2评分: 3.3 ± 1.8 。A、B两组纳入例数分别为12例和25例, PLD=2525 ms时两组患侧与健侧CBF比值分别为: 0.90 ± 0.06 、 0.71 ± 0.05 , 差异有统计学意义($P < 0.05$)。A、B两组PLD=1525 ms时患侧CBF分别为: 0.88 ± 0.07 、 0.65 ± 0.11 , 差异有统计学意义($P < 0.05$)。A、B两组PLD=1525 ms时患侧CBF分别为: 24.11 ± 3.72 mL/(100g.min)、 17.90 ± 3.60 mL/(100g.min), 差异有统计学意义($P < 0.001$)。A、B两组PLD=2525 ms时患侧CBF分别为: 45.78 ± 3.78 mL/(100g.min)、 33.42 ± 5.36 mL/(100g.min), 差异有统计学意义($P < 0.001$)。A、B两组脑血流储备 ΔCBF 分别为: 21.67 ± 5.25 mL/(100g.min)、 15.53 ± 5.12 mL/(100g.min), 差异有统计学意义($P < 0.001$)。分析显示 ΔCBF 值与ABCD2评分存在较强的负相关关系(Kendall's tau-b = -0.449, $P < 0.001$)。结论 双PLD动脉自旋标记技术可以定量的、直观的反应前循环大血管重度狭窄/闭塞TIA患者脑组织灌注及血流储备情况, 从而了解患者血流动力学变化, 为指导该类患者进一步诊治提供依据。

【关键词】动脉自旋标记; 标记延迟时间;
短暂性脑缺血发作; 大血管狭窄

【中图分类号】R543

【文献标识码】A

【基金项目】成都中医药大学“杏林学者”计划
(CCBY2022004; CCCX2023008)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.06.004

Evaluation the Cerebral Hemodynamics of TIA Patients with Severe Stenosis/occlusion of Anterior Circulation Large Vessels Using Dual PLD 3D-ASL*

ZENG Li-chuan¹, ZHANG Yao-dan², REN Feng-chun^{1,*}.

1.Department of Radiology, Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610072, Sichuan Province, China

2.Department of Neurology, Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610072, Sichuan Province, China

ABSTRACT

Objective To explore the value of dual post labeling delays (PLD) three-dimensional arterial spin labeling (3D ASL) in evaluating hemodynamics in transient ischemic attack (TIA) patients with severe stenosis/occlusion of large anterior circulation vessels. **Methods** Clinical and imaging data of TIA patients with severe stenosis/occlusion of the internal carotid artery or middle cerebral artery from January 2016 to June 2023 were enrolled. ASL were performed with dual post label delay (PLD=1525 ms & 2525 ms), and cerebral blood flow (CBF) was measured by two experienced radiologists. CBF of the affected and mirror healthy areas was obtained for the corresponding blood flow (CBF1 and CBF2), and then use the formula $\Delta CBF=CBF2-CBF1$, calculate the estimated value of corresponding blood flow reserve capacity. Patients were divided into good collateral circulation group (Group A) and poor collateral circulation group (Group B) based on the ratio of the affected side to the mirror healthy side CBF at PLD=2525 ms, with a ratio ≥ 0.8 indicating good collateral circulation group and < 0.8 indicating poor collateral circulation group. CBF values and ΔCBF of the affected side were compared between the two groups under different PLD conditions. The correlation between CBF and clinical ABCD2 score was analyzed. **Results** A total of 37 patients with TIA were included, with an average age of 61.5 ± 7.2 years and an ABCD2 score of 3.3 ± 1.8 . The number of patients included in groups A and B was 12 and 25, respectively. When PLD = 2525 ms, the ratios of CBF on the affected side to the unaffected side in groups A and B were 0.88 ± 0.07 and 0.65 ± 0.11 , respectively, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). When PLD = 1525 ms, the CBF on the affected side in groups A and B was 24.11 ± 3.72 mL/(100g.min) and 17.90 ± 3.60 mL/(100g.min), respectively, and the difference was statistically significant ($P < 0.001$). When PLD = 2525 ms, the CBF on the affected side in groups A and B was 45.78 ± 3.78 mL/(100g.min) and 33.42 ± 5.36 mL/(100g.min), respectively, and the difference was statistically significant ($P < 0.001$). The ΔCBF values in groups A and B were 21.67 ± 5.25 mL/(100g.min) and 15.53 ± 5.12 mL/(100g.min), respectively, and the difference was statistically significant ($P < 0.001$). The analysis showed that there was a strong negative correlation between the ΔCBF value and the ABCD2 score (Kendall's tau-b = -0.449, $P < 0.001$). **Conclusion** Dual PLD arterial spin labeling technology can quantitatively and intuitively reflect the cerebral tissue perfusion and blood flow reserve of TIA patients with severe stenosis/occlusion of the large blood vessels in the anterior circulation, thereby understanding the hemodynamic changes of patients and providing a basis for guiding further diagnosis and treatment of such patients.

Keywords: Arterial Spin Labeling; Post Labeling Delays; Transient Ischemic Attack; Large Vascular Stenosis

急性缺血性脑卒中最常见的脑卒中类型, 具有发病率高、致残率高、病死率高和复发率高等特点, 短暂性脑缺血发作(transient ischemic attack, TIA)是缺血性脑卒中最重要危险因素。动脉粥样硬化是多种致病因素作用下主要累及大、中动脉的慢性病理过程, 导致血管狭窄或闭塞进而造成脑组织血流灌注减低, 而引起缺血性脑血管疾病^[1-2]。伴有前循环大血管重度狭窄/闭塞的TIA患者发生脑卒中风险明显增加, 但临床上并非所有重度狭窄/闭塞患者都会发生脑卒中, 其临床症状与预后不仅受血管狭窄程度的影响, 而且受颅内侧支循环对脑血流灌注代偿水平的影响, 了解脑组织血流灌注水平对于治疗方式的选择十分重要^[3-5]。动脉自旋标记成像(three-dimensional arterial spin labeling, 3D ASL)是利用自由扩散的水分子作为内源性示踪剂, 在标记层对流入的血流进行标记, 将标记前后感兴趣区组织T1信号相减即可获得脑血流量(cerebral blood flow, CBF)的灌注信息^[6-8]。ASL技术可无创的评价脑血流动力学而不需要注射造影剂。由于目前3D-ASL检查与研究多在一个标记延迟时间(post labeling delay, PLD)基础上对脑血流量测定, 没有考虑到该技术在选择延迟时间上带来的误差, 双PLD可以通过分析不同时间患者脑实质的血流灌注情况以及侧支循环情况, 更接近真实情况。本研究拟采用双PLD 3D ASL技术探究颈内动脉重度狭窄/闭塞TIA患者脑实质的血流灌注以及储备情况, 探究其评价血流动力学改变的临床价值, 进而为临床决策提供重要信息。

1 资料与方法

【第一作者】曾利川, 男, 主治医师, 主要研究方向: 中枢神经系统影像研究。E-mail: zenglichuan@cdutcm.edu.cn

【通讯作者】任逢春, 女, 主治医师, 主要研究方向: 中枢神经系统影像研究。E-mail: 303271563@qq.com

1.1 研究对象 连续收集我院2016年1月至2023年6月诊断的颈内动脉重度狭窄/闭塞TIA患者临床及影像学资料。包括体格检查、既往病史、常规实验室检查、物理检查和ABCD2评分等。

纳入标准：临床出现TIA 症状及体征；经磁共振血管成像(MRA)或CT血管成像(CTA)确定的颈内动脉重度狭窄(狭窄程度>75%)或闭塞；DWI检查未发现异常；受试者体内均无金属植入物且没有MRI检查禁忌症。排除标准：双侧颈总、颈内动脉狭窄患者；动脉瘤、脑出血等其他颅脑血管性疾病者；非动脉粥样硬化性血管疾病，如血管炎，烟雾病等。颅内肿瘤、脑外伤等其他颅脑非血管性疾病者；图像伪影严重，影响ASL脑血流量定量测量的患者。临床信息由成都中医药大学附属医院神经内科医师完成对研究对象的采集。本研究经过成都中医药大学附属医院伦理委员会批准。

1.2 检查方法 采用GE Discovery MR 750 3.0T超导型磁共振扫描仪，8通道头颈部联合相控阵线圈，扫描体位采用仰卧位、头先进，扫描序列包括常规序列(轴位T1WI、T2WI、T2 Flair及DWI)、MRA、ASL。参数如下：轴位T1WI 参数：TR/TE 1739/25.2 ms，矩阵256 × 256，FOV 24 cm×24 cm，层厚 5.0 mm，层间距1.5 mm，采集次数2；轴位T2WI 参数：TR/TE 4245/100 ms，FOV 24 cm×24 cm，矩阵 320×256，层厚5.0 mm，层间距1.5 mm，采集次数2；轴位T2-FLAIR参数：TR/TE 8400/140 ms，FOV 24 cm×24 cm，矩阵256 × 256，层厚5 mm，层间距1.5mm。DWI 参数：TR/TE 4880/77.2 ms，FOV 24 cm×24 cm，矩阵130×160，层厚5.0 mm，层间距1.5 mm，采集次数3；3D-T0F MRA参数：TR 22 ms，TE 2.6 ms，反转角15°，FOV 22cm×19.4cm，图像矩阵256×224。3D-ASL-MRI数据采集使用3D全脑伪连续动脉自旋标记成像(3D-pASL)序列背景抑制平面回波成像。扫描参数：TR/TE 4590/10.5 ms，标记后延迟时间分别为1525 ms 及 2525 ms，FOV 24 cm×24 cm，层厚4.0 mm，激励次数2。

1.3 图像分析与处理 ASL图像后处理在采用 GE(AW 4.5工作站，Healthcare)Function Tool软件中自带3D-ASL后处理软件进行图像分析，调节阈值使全部脑组织覆盖在计算范围之内，分别生成PLD=1525 ms及PLD=2525 ms脑血流量伪彩图像。对于伪彩图提示灌注异常区域进行脑血流量的测定，取三次测量的平均值，测量时应避开脑室、脑沟等区域，同时测量相同层面相应镜像区血流量值作为对照，分别得到患侧与镜像健侧供血区域相对脑血流量，获得患侧PLD=1525 ms 及PLD=2525 ms的相对脑血流量(分别记为CBF1、CBF2)，再根据公式 $\Delta CBF = CBF2 - CBF1$ ，计算得出患侧相应血流储备能力估计值 ΔCBF 。依据PLD=2525 ms时CBF患侧低灌注与镜像区比值大小将患者分为侧支代偿储备组(A组)和代偿不良组(B组)，比值 ≥ 0.8 记为代偿储备组，比值 < 0.8 记为代偿不良组。所有影像数据测量均由两名有经验的放射科医师独立完成，如果两者之间结果不一致由两名医生对结果共同分析，得到统一结果。

1.4 资料分析 所有数据均使用SPSS 16.0软件进行统计分析。定量资料采用均数(Mean)±标准差(SD)表示，计量资料符合正态分

布使用独立样本t检验，当不符合正态分布时采用秩和检验，计数资料采用Fisher精确检验。以Kendall相关系数分析检验 ΔCBF 值与ABCD2评分的相关性。采用Kappa检验判定两观察者测量的一致性。以 $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。

2 结 果

2.1 一般情况 共纳入37例TIA患者，其中男性19例，女性18例，年龄 61.5 ± 7.2 岁。ABCD2评分： 3.3 ± 1.8 。其中颈内动脉重度狭窄/闭塞者15例，大脑中动脉重度狭窄/闭塞者22例。两观察者测量一致性检验结果： κ 值为0.83，提示两观测者测量值具有较好一致性。依据PLD=2525 ms时CBF患侧与健侧比值大小将患者分为侧支代偿储备组和代偿不良组，比值 ≥ 0.8 记为代偿储备组(12例)，比值 < 0.8 记为代偿不良组(25例)，两组患侧与健侧CBF比值分别为： 0.88 ± 0.07 、 0.65 ± 0.11 ，差异有统计学意义($P < 0.05$)。患者一般资料等临床基本情况见表1。侧支代偿储备组及代偿不良组病例展示分别见图1、图2。

表1 颈内动脉重度狭窄/闭塞TIA患者代偿储备组与不良组一般情况资料比较

	代偿储备组 (n=12)	代偿不良组 (n=25)	P值
年龄	59.33±7.22	62.56±7.10	0.206
性别(男/女)	5/7	14/11	0.495
高血脂	4	10	1.000
既往卒中史	2	7	0.687
吸烟史	6	15	0.726
饮酒史	8	16	1.000
冠心病	3	5	1.000
ABCD2评分	1.33±0.99	4.2±1.26	0.001*
CBF比值 Δ	0.88±0.07	0.65±0.11	<0.001*

注：ABCD2：A-年龄，B-血压，C-临床症状，D2-糖尿病和症状的持续时间。

$\Delta PLD=2525ms$ 时患侧低灌注与镜像区CBF比值。*两组相比较具有统计学差异。

2.2 血流灌注及储备能力评估 代偿储备组与代偿不良组PLD=1525 ms时患侧CBF分别为： $24.11 \pm 3.72 mL/(100g \cdot min)$ 、 $17.90 \pm 3.60 mL/(100g \cdot min)$ ，差异有统计学意义($P < 0.001$)，代偿储备组与代偿不良组PLD=2525 ms时患侧CBF分别为： $45.78 \pm 3.78 mL/(100g \cdot min)$ 、 $33.42 \pm 5.36 mL/(100g \cdot min)$ ，差异有统计学意义($P < 0.001$)。代偿储备组与代偿不良组脑血流储备 ΔCBF 分别为： $21.67 \pm 5.25 mL/(100g \cdot min)$ 、 $15.53 \pm 5.12 mL/(100g \cdot min)$ ，差异有统计学意义($P < 0.001$)。代偿储备组与代偿不良组脑血流灌注情况比较见表2。统计分析显示 ΔCBF 值与ABCD2评分存在较强的负相关关系(Kendall's tau-b=-0.449， $P < 0.001$)(图3)。

表2 代偿储备组与代偿不良组脑血流灌注情况比较

	代偿储备组		代偿不良组		t值	P值
	患侧	健侧	患侧	健侧		
CBF(PLD=1525ms)	24.11±3.72	50.32±5.25	17.90±3.60	47.58±5.13	4.870	<0.001*
CBF(PLD=2525ms)	45.78±3.78	52.35±3.11	33.42±5.36	51.53±4.31	7.150	<0.001*
脑血流储备 ΔCBF	21.67±5.25		15.53±5.12		3.387	0.002*

*两组患侧间相比较具有统计学差异。

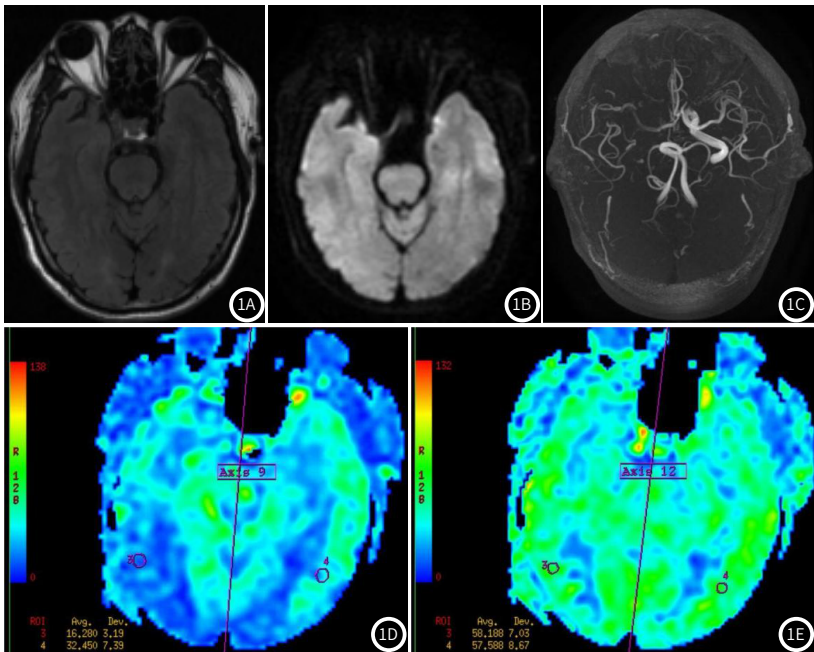


图1A-图1E 54岁，男性，头昏3月加重2天就诊，ABCD2评分1分。FLAIR (1A)与DWI (1B)未见明显异常。MRA (1C)显示右侧颈内动脉闭塞，右侧大脑中动脉较左侧明显变细，远端分支明显减少。PLD=1525 ms ASL (1D)显示右侧颞枕叶CBF值较对侧明显减低，PLD=2525 ms ASL (1E)较对侧未见异常灌注而表现代偿良好。

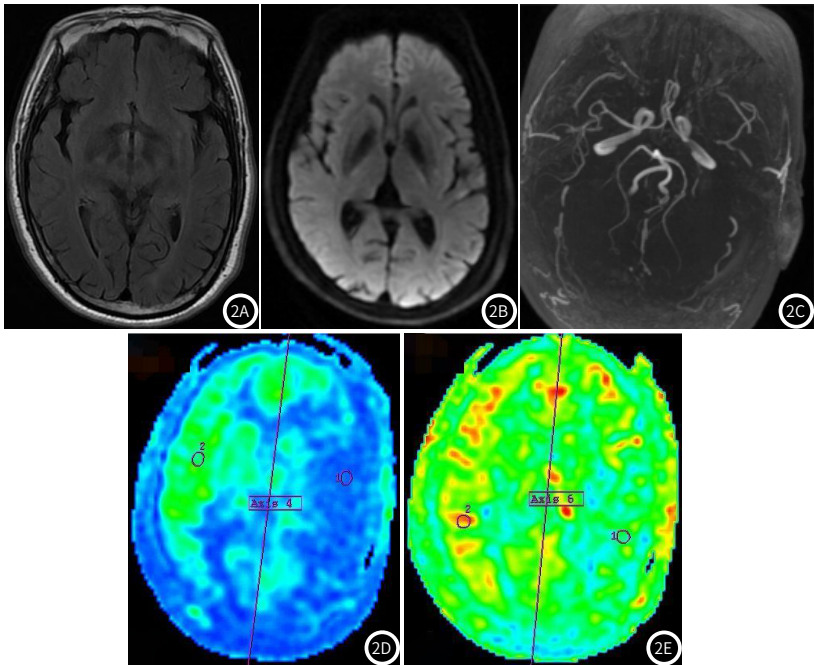


图2A-图2E 65岁，男性，发作性头昏就诊，ABCD2评分4分。FLAIR (2A)与DWI (2B)未见明显异常。MRA (2C)显示左侧脑中动脉M1段闭塞，远侧分支明显减少。ASL PLD=1525ms (2D)显示左侧大脑中动脉供血区CBF值较对侧明显减低，PLD=2525ms (2E)较对侧仍明显灌注减低，表现代偿不良。

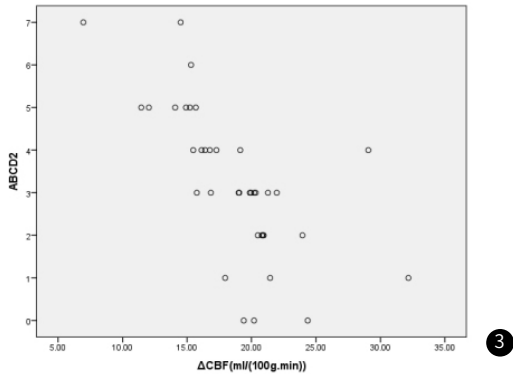


图3 散点图显示ΔCBF值与ABCD2评分存在负相关关系(Kendall's tau-b=-0.449, P<0.001)。

3 讨论

颅内大血管重度狭窄/闭塞会导致患者脑部血流动力学发生改变,从而可能引起一系列表现,从脑部缺血到认知功能障碍,甚至脑缺血性卒中,但患者临床症状差异较大^[9-10],这是因为大血管狭窄后脑组织的血流灌注情况不仅受血管狭窄程度影响,还与侧支循环以及脑组织的血流储备能力等多种因素相关。脑内侧支循环主要分为一级和二级侧支循环途径,一级侧支代偿包括Willis环的各动脉段,二级侧支代偿主要由眼动脉和软脑膜的各侧支血管组成。当顺向血流明显减低时,可以通过侧支循环进行血流代偿。通过影像学方法及时准确的识别高危的、侧支代偿不良的TIA患者,对于预防卒中发生具有十分重要的意义^[11]。

动脉旋转标记是一种可用于评估脑灌注的新兴无创MRI技术,ASL灌注的一个重要优点是不需要外源示踪剂,而是使用来自动脉血液的磁性标记的氢质子作为内源性扩散示踪剂^[3],ASL技术在脑缺血卒中疾病中广泛应用^[12-14]。PLD的长短是ASL的灌注结果重要的影响因素。短的PLD被认为主要体现大血管狭窄所导致的灌注行为异常,而长的PLD则能更准确的显示实际灌注水平的改变^[15-16]。对于慢性脑血管狭窄闭塞性疾病,采用两个或多个不同长短的PLD进行灌注检查,可以评价更准确评估快速侧支循环及缓慢侧支循环代偿情况^[17]。

Yan等^[18]研究显示多PLD ASL技术在评价急性缺血卒中患者缺血半暗带的价值与CT灌注相似,能够非常准确的评估缺血半暗带,但前者不需要引入外源性造影剂,具有很大优势。本研究发现所纳入前循环大血管重度狭窄/闭塞患者,代偿储备组与代偿不良组在PLD=1525 ms时,脑血流量较健侧均出现明显减低,提示脑血流灌注减低的状态。而在PLD=2525 ms时,患者的脑血流量增加,但增加的程度明显不同,ΔCBF值反应了在长、短不同PLD条件下的脑血流差值,体现了脑组织的血流储备能力,这对于判断预后和卒中预防有重要的临床意义。本研究显示侧支代偿储备组患者的ΔCBF值更高,差异具有统计学意义,说明侧支代偿组具备更好的血流储备能力。

ABCD2评分是临床中评估TIA患者卒中风险的一项专业评估工具,内容包括年龄、血压、临床症状、糖尿病和症状的持续时间,在临床中应用十分广泛,其分值的高低与卒中风险成正相关,ABCD2分值越高,发生卒中风险就越高^[19]。本研究显示ΔCBF值与ABCD2评分呈中等负相关,即ΔCBF值越高,ABCD2评分就越低,发生卒中风险相对就越低,显示患者具有更好的血流灌注储备能力,远期卒中发生的风险就较低。利用3D ASL技术设置双PLD的检查方法能更加全面、真实反映前循环大血管狭窄TIA患者脑组织血流灌注的改变,通过测量不同PLD条件下的血流量CBF,计算得出储备能力ΔCBF,能够及时准确判断TIA患者脑血流储备能力,从而综合判断患者短期内发生缺血卒中的风险。

此外本研究发现,与代偿储备组相比较,代偿不良组患者在两个不同PLD条件下患侧的CBF值均较低,说明代偿不良组患者的顺行血流与侧支代偿均较代偿储备组更低,在这种情况下,患者进一步进展而出现缺血卒中的风险更高,可能需要进一步干预。通过双PLD ASL技术可以进行定量的评价脑组织的血流储备情况,为患者进一步治疗提供重要参考。

本研究存在一些不足,首先本研究未能随访纳入研究的患者脑缺血卒中的发生情况,对于ASL相关参数与脑缺血卒中发生的相关研究,尚需要进一步深入。其次本研究的样本量偏少,无法对年龄等因素对CBF影响进行研究,在以后的研究中会继续加强研究。

4 结论

双PLD动脉自旋标记技术可以定量的、直观的反应颈内动脉重度狭窄/闭塞TIA患者脑组织灌注及血流储备情况,从而了解患者血流动力学变化,为指导该类患者进一步诊治提供依据。

参考文献

- [1] Lim E Y, Cho A H. Dynamic changes of carotid atherosclerosis and their relation with stroke recurrence in patients with stroke or transient ischemic attack[J]. *Curr Neurovasc Res*, 2022, 19(3): 303-310.
- [2] Shi Z, Li J, Zhao M, et al. Progression of plaque burden of intracranial atherosclerotic plaque predicts recurrent stroke/transient ischemic attack: a pilot follow-up study using higher-resolution MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2021, 54(2): 560-570.
- [3] Mendelson S J, Prabhakaran S. Diagnosis and management of transient ischemic attack and acute ischemic stroke: a review[J]. *JAMA*, 2021, 325(11): 1088-1098.
- [4] Kapila V, Jetty P, Basile V S, et al. Management of transient ischemic attack or nondisabling stroke related to extracranial internal carotid artery stenosis[J]. *CMAJ*, 2019, 191(15): E418-E422.
- [5] 姚军锋, 张海凤. 老年多发性脑梗塞CT、MRI征象特征及临床应用价值探讨[J]. *罕少疾病杂志*, 2022, 29(12): 23-24.
- [6] Jalilianhasanpour R, Huntley J H, Alvin M D, et al. Value of acute neurovascular imaging in patients with suspected transient ischemic attack[J]. *Eur J Radiol*, 2022, 154: 110427.
- [7] 邹春霞, 冯静. 3D-ASL与多模态磁共振在诊断短暂性脑缺血发作中的应用研究进展[J]. *分子影像学杂志*, 2021, 44(01): 206-208.
- [8] 尉胜男, 王珂, 郑建民, 等. MR 3D-ASL联合MRA诊断TIA的价值分析[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2021, 19(02): 26-28.
- [9] 黄鹤, 李曦, 严波, 等. 颈内动脉狭窄与轻度认知障碍的相关性[J]. *昆明医科大学学报*, 2023, 44(01): 70-75.
- [10] 刘佳丽, 仇建婷. 颈内动脉狭窄与无症状性脑梗死的关系[J]. *中华老年心脑血管病杂志*, 2019, 21(01): 49-52.
- [11] Lindner T, Bolar D S, Achten E, et al. Current state and guidance on arterial spin labeling perfusion MRI in clinical neuroimaging[J]. *Magn Reson Med*, 2023, 89(5): 2024-2047.
- [12] 郝晓勇, 吴江, 杨朝慧, 等. ASL灌注成像评价无症状型单侧颈内动脉重度狭窄或闭塞老年患者脑血流动力学改变及Willis环侧支代偿作用[J]. *放射学实践*, 2020, 35(4): 462-466.
- [13] 周建国, 符大勇, 卢明聪, 等. 三维动脉自旋标记在单侧颈内动脉闭塞后侧支循环评估中的价值[J]. *分子影像学杂志*, 2020, 43(01): 130-133.
- [14] Aracki-Trenkic A, Law-Ye B, Radovanovic Z, et al. ASL perfusion in acute ischemic stroke: the value of CBF in outcome prediction[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2020, 194: 105908.
- [15] Sijtsma N D, Petit S F, Verduijn G M, et al. Multidelay pseudocontinuous arterial spin labeling to measure blood flow in the head and neck[J]. *NMR Biomed*, 2023: e4898.
- [16] Iutaka T, de Freitas M B, Omar S S, et al. Arterial spin labeling: techniques, clinical applications, and interpretation[J]. *Radiographics*, 2023, 43(1): e220088.
- [17] 吕晓波, 董欣欣, 邵迎东, 等. 双时相动脉自旋标记对脑血管重度狭窄患者侧支循环的评估价值[J]. *中国基层医药*, 2020, 27(2): 129-133.
- [18] Yan C, Yu F, Zhang Y, et al. Multidelay arterial spin labeling versus computed tomography perfusion in penumbra volume of acute ischemic stroke[J]. *Stroke*, 2023, 54(4): 1037-1045.
- [19] Jing J, Suo Y, Wang A, et al. Imaging parameters predict recurrence after transient ischemic attack or minor stroke stratified by ABCD(2) score[J]. *Stroke*, 2021, 52(6): 2007-2015.

(收稿日期: 2024-05-07)

(校对编辑: 赵望淇)