

论 著

3D-pCASL评估单侧大脑中动脉慢性重度狭窄患者脑血流动力学可行性研究

代 斌 刘远成 田 冲*

贵州省人民医院医学影像科(贵州省智能医学影像分析与精准诊断重点实验室)
(贵州 贵阳 550002)

【摘要】目的 探讨3D-pCASL评估单侧大脑中动脉重度狭窄患者脑血流动力学改变的可行性。方法 收集CTA或MRA检查提示一侧大脑中动脉重度狭窄(血管腔狭窄70%-99%)患者32例, 分别行3D-pCASL(PLD选择1.5s、2.5s)及DSC-PWI检查; 在患侧DSC-达峰时间(TTP)异常最显著层面及镜面对照区分别测量两个PLD脑血流量(CBF)及DSC-PWI的CBF、脑血容量(CBV)、平均通过时间(MTT)和TTP, 采用配对t检验比较两侧脑区各参数的差异。计算血管狭窄侧与镜面对照脑区相对值, 采用Pearson相关检验分析各参数间相关性。同时测量ASL-PLD 1.5s CBF和DSC-TTP灌注异常区域的面积并行配对t检验。结果 与对照脑区比较, 32例患者异常灌注脑区ASL-PLD 1.5s 及2.5s CBF、DSC-CBF、DSC-MTT、DSC-TTP参数值间差异具有统计学意义(t值分别为-29.94、-20.07、-11.83、14.33、13.48, P值均<0.01); DSC-CBV间无统计学意义(t=-1.51, P=0.143); 异常灌注脑区ASL-PLD 1.5s CBF与ASL-PLD 2.5s CBF间差异具有统计学意义(t=5.84, P<0.01)。标准化后ASL-PLD 1.5s rCBF与DSC-rMTT、DSC-rTTP呈负相关(r值分别为-0.71、-0.79, P值均<0.01), ASL-PLD 2.5s rCBF与DSC-rCBF差异无统计学意义(t=-1.85, P>0.05)。DSC-TTP与ASL-PLD 1.5s CBF灌注减低区域面积差异无统计学意义(t=1.834, P>0.05)。结论 3D-pCASL(PLD 1.5s及2.5s)灌注成像可以评价单侧大脑中动脉重度狭窄患者脑血流动力学的变化情况, 并且具有定量及无需注射钆对比剂的优点。

【关键词】动脉自旋标记(ASL);
标记后延迟时间(PLD);
动态磁敏感对比-灌注加权成像(DSC-PWI);
大脑中动脉狭窄; 卒中

【中图分类号】R543.5

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.03.007

The Feasibility Study of 3D-pCASL Evaluating the Cerebral Hemodynamics of Unilateral Chronic Middle Cerebral Artery Severe Stenosis

DAI Bin, LIU Yuan-cheng, TIAN Chong*

Radiology Department of Guizhou Provincial People's Hospital(Key Laboratory of Intelligent Medical Image Analysis and Precision Diagnosis in Guizhou Province), Guiyang 550002, Guizhou, China

ABSTRACT

Objective To explore the feasibility of 3D-pCASL in evaluating cerebral hemodynamic changes in patients with severe unilateral middle cerebral artery stenosis. **Methods** Thirty-two patients of unilateral chronic middle cerebral artery severe stenosis (70%-99% of vascular lumen stenosis) were collected by verified by CTA or MRA; 3D-pCASL (include PLD 1.5s and 2.5s) and DSC-PWI were performed respectively in 3.0 T MR scanner. The region of interest (ROI) were positioned in the abnormal perfusion areas and the control area according to the arterial dominant territory to obtain quantitative parameters of perfusion. Perfusion parameters including cerebral blood flow (CBF) of two PLDs, and CBF, cerebral blood volume (CBV), mean transit time (MTT), and time to peak (TTP) of DSC-PWI, the paired t test was used to compare the parameters of the affected side and the control side. The area of ASL-PLD 1.5s CBF and DSC-PWI perfusion anomaly areas were measured simultaneously and the parallel paired t-test was performed. **Results** Compared with the control side, 32 patients with abnormally perfused brain area of ASL-PLD 1.5s and 2.5s CBF, DSC-CBF, DSC-MTT, DSC-TTP parameter values were statistically significant (t values were -29.94, -20.07, -11.83, 14.33, 13.48, P values are all <0.01). The difference between ASL-PLD 1.5s CBF and ASL-PLD 2.5s CBF in the abnormally perfused brain area was statistically significant (t=5.84, P value<0.01). The normalized ASL-PLD 1.5s rCBF was negatively correlated with DSC-rMTT and DSC-rTTP (r values were -0.71, -0.79, and P values <0.01). There was no significant difference between the normalized ASL-PLD 2.5s rCBF and DSC-rCBF (t=-1.85, P>0.05). There was no significant difference in the area of the reduced area of 1.5C CBF perfusion between DSC-TTP and ASL-PLD (t=1.834, P>0.05). **Conclusion** 3D-pCASL (PLD 1.5s and 2.5s) perfusion imaging can evaluate the changes of cerebral hemodynamics in patients with severe unilateral middle cerebral artery stenosis. Moreover, the ASL technique possesses advantages of non-invasion use of the gadolinium contrast.

Keywords: Arterial Spin Labeling (ASL); Post-label Delay (PLD); Dynamic Sensitivity Contrast Perfusion Weighted Imaging (DSC-PWI); Middle Cerebral Artery Stenosis; Stroke

颅内动脉粥样硬化性狭窄(intracranial atherosclerotic stenosis, ICAS)是世界范围内缺血性卒中最常见的原因之一, 其复发风险亦较其他卒中亚型高^[1]。一项前瞻性多中心研究报道, 中国脑动脉粥样硬化发生率为46.6%, 随访12个月, 脑动脉狭窄70%-99%或动脉闭塞的患者, 其卒中发生率高达5.16%-7.27%^[2]。脑血流动力学的改变是缺血性脑血管疾病的病理生理基础表现之一, 准确和定量地测量血流动力学参数(如脑血流量、脑血容量等)对于理解缺血状态时脑功能的改变具有重要临床意义^[3-4]。磁共振灌注成像技术可以反映脑血液供应情况, 可作为解剖学和血管评估的有效补充, 并为临床提供重要的预后信息^[5]。目前, 动态磁敏感对比-灌注加权成像(dynamic sensitivity contrast perfusion weighted imaging, DSC-PWI)是临床中用来评估脑血流动力学最常用的方法之一^[6]。但DSC-PWI需要注射钆造影剂, 不适合长期动态随访及肾功能障碍的患者。动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL)是一种不需要注射钆造影剂的灌注成像技术, 近年来在急性缺血性卒中、烟雾病等脑血管疾病中对颅内灌注减低的检测方面得到广泛临床应用^[7-9]。因此, 本研究旨在通过与DSC-PWI进行对比, 分析ASL技术在评价慢性单侧大脑中动脉重度狭窄患者脑血流动力学的可行性。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集贵州省人民医院2020年6月至2022年6月经CTA或MRA检查提示一侧大脑中动脉重度狭窄(血管腔狭窄70-99%)的住院患者32例, 男19例, 女13例, 年龄44岁~78岁, 平均(61.3±7.6)岁。

纳入标准如下: CTA或MRA提示大脑中动脉重度狭窄(狭窄度>70%); DWI颅内无高信号灶; 年龄>30岁。排除标准: 急性期或亚急性期脑梗死患者, 患者烦躁、不能配合检查; 伴风湿性心脏病、房颤、下肢静脉血栓等血栓性卒中风险因素的基础疾病; MRI检查禁忌。

1.2 仪器与方法 采用GE 3.0T MR扫描仪(Discovery MR 750w, GE Healthcare, 美国), 24通道头颈联合线圈。依次完成DWI、3D-T₂WI(用于CBF伪彩图图像融合)、ASL及DSC-

【第一作者】代 斌, 男, 主管技师, 主要研究方向: 神经影像。E-mail: 150441405@qq.com

【通讯作者】田 冲, 男, 主治医师, 主要研究方向: 神经影像。E-mail: 2495585185@qq.com

PWI检查。ASL数据采集：采用3D-伪连续式动脉自旋标记(3D pseudo-continuous arterial spin labeling, 3D-pCASL)方式、快速自旋回波序列信号读取，扫描参数为：8个螺旋、512个采样点，TR=4640 ms(PLD 1.5s)/5335ms(PLD 2.5s)，TE=10.7ms，带宽=62.50kHz，FOV=24×24cm，NEX=3，层厚为4mm，层数为36幅，时间为4min29s(PLD 1.5s)/5min10s(PLD 2.5s)。DSC-PWI数据采集：全脑扫描40期，TR/TE=1800/30ms，矩阵为128×128，FOV=24×24cm，NEX=1，层厚和层间距分别为6mm、2mm，时间为1min12s。对比剂为Gd-DTPA，注射方案为0.2mL/kg，注射流率为3.5mL/s。

1.3 数据处理 ASL数据使用GE工作站(AW 4.5 Workstation, GE Healthcare)FunctionTool软件中自带3D pCASL后处理软件，选择阈值后分别生成PLD 1.5s及PLD 2.5s CBF map图及伪彩图。DSC PWI图像通过Function Tool软件中自动选择动脉输入函数(arterial input function, AIF)处理，生成CBF、CBV、TTP及MTT参数图。将3D pCASL的CBF伪彩图像、DSC PWI的4组参数图像分别提供给两名放射神经组医师进行判读。首先，在患侧DSC-TTP图像最显著的异常灌注层面选取ROI，分别测量灌注异常区及镜面对照脑区两个PLD的CBF，DSC-PWI的CBF、CBV、MTT、TTP参数；然后，为消除DSC及ASL灌注参数值存在个体差异的影响，对上述6个参数进行标准化(灌注异常区参数值/镜面对照脑区参数值)；最后，测量该层面灌注异常区域的面积。

1.4 统计学分析 采用SPSS 19.0统计分析软件。对计量资料行正态性检验，符合正态分布资料以($\bar{x} \pm s$)表示。采用配对t检验比较血管狭窄侧灌注异常区域和对照区域的ASL-CBF及DSC-PWI各

灌注参数的差异。采用Pearson相关检验分析PLD 1.5s rCBF、PLD 2.5s rCBF与DSC-rCBF、DSC-rCBV、DSC-rMTT、DSC-rTTP之间相关性。此外基于同一层面，对ASL-PLD 1.5s CBF和DSC-TTP测得灌注减低区域的面积进行配对t检验。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 血管狭窄侧与对照侧脑区ASL及DSC各定量参数比较 32例患者异常灌注脑区及对照脑区ASL-PLD 1.5s 及2.5s CBF、DSC-CBF、DSC-MTT、DSC-TTP参数值(见表1)及定量图(见图1)，两个部位间差异具有统计学意义(t值分别为-29.94、-20.07、-11.83、14.33、13.48，P值均<0.01)；DSC-CBV间差异无统计学意义(t值为-1.51，P值为0.143)；异常灌注脑区ASL-PLD 1.5s CBF与ASL-PLD 2.5s CBF间差异具有统计学意义(t值为5.84，P值<0.01)。

2.2 灌注异常脑区ASL及DSC各定量参数间相关性比较 标准化后的ASL-PLD 1.5s rCBF(0.50 ± 0.08)与DSC-rMTT(1.37 ± 0.16)、DSC-rTTP(1.09 ± 0.04)呈负相关(r值分别为-0.71、-0.79，P值均<0.01)。标准化后的ASL-PLD 2.5s rCBF(0.87 ± 0.04)与DSC-rCBF(0.88 ± 0.06)差异无统计学意义(t=-1.85，P>0.05)。

2.3 灌注异常脑区面积在DSC-TTP与ASL-PLD1.5s CBF的比较 鉴于DSC-TTP与ASL-PLD1.5s CBF相关性最显著，在最显著灌注异常层面，DSC-TTP灌注异常脑区面积为(2943.87 ± 674.88) mm²，ASL-PLD1.5s CBF异常区域面积为(2978.13 ± 666.82) mm²，两者间灌注异常脑区面积差异无统计学意义(t=1.834，P>0.05)。

表1 32例患者ASL与DSC血管狭窄侧脑区与对照侧脑区的比较结果

部位	ASL-PLD1.5s CBF(mL·100g ⁻¹ ·min ⁻¹)	ASL-PLD2.5s CBF(mL·100g ⁻¹ ·min ⁻¹)	DSC-CBF(mL·100g ⁻¹ ·min ⁻¹)	DSC-CBV(mL/mg)	DSC-MTT(s)	DSC-TTP(s)
血管狭窄						
侧灌注减低脑区	20.57±3.34	41.45±2.29	70.62±8.15	8.04±1.39	9.32±0.86	37.72±1.22
对照脑区	41.65±2.09	47.89±2.00	79.71±7.00	8.28±1.28	6.87±0.60	34.59±1.10
t值	-29.94	-20.07	-11.83	-1.51	14.33	13.48
P值	<0.01	<0.01	<0.01	0.143	<0.01	<0.01

注：ASL：动脉自旋标记；PLD：标记后延迟时间；DSC：动态磁敏感对比；CBF：脑血流量；CBV：脑血容量；MTT：平均通过时间；TTP：达峰时间。

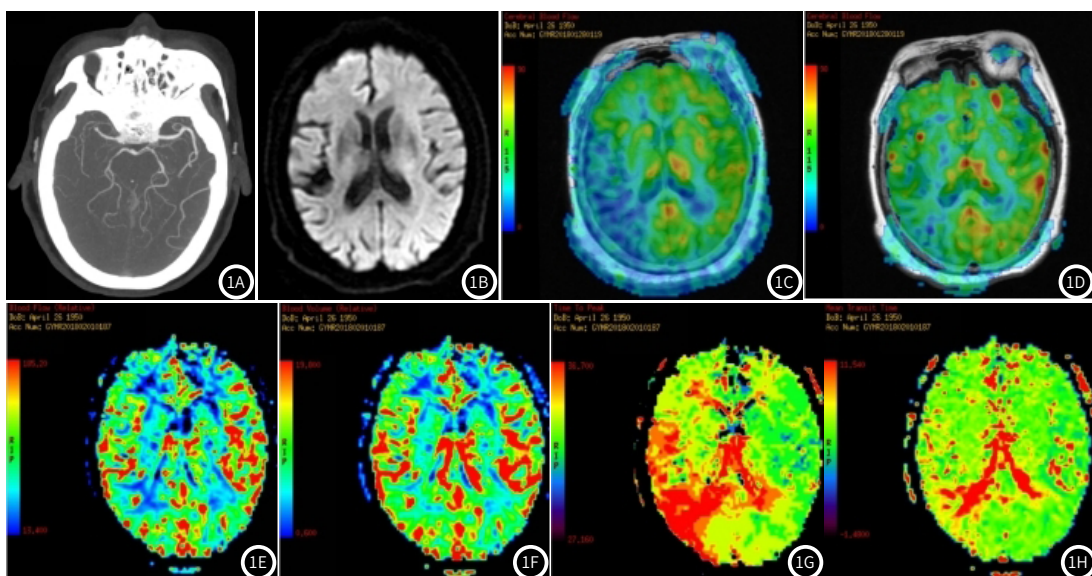


图1A-图1H 血管狭窄侧与对照侧脑区ASL及DSC各定量参数比较；例1，女，67岁，头昏10月。CTA示右侧大脑M1段远端重度狭窄或闭塞；DWI未见明显梗死灶；PLD 1.5s时，右侧大脑中动脉供血区域灌注明显降低，CBF测值为17.65mL·100g⁻¹·min⁻¹(对侧为44.37mL·100g⁻¹·min⁻¹)；PLD 2.5s时，对应区域CBF为43.79mL·100g⁻¹·min⁻¹(对侧为48.68mL·100g⁻¹·min⁻¹)；DSC-CBF、DSC-CBV未见异常，DSC-TTP、DSC-MTT延长。PLD1.5s与DSC-TTP对低灌注脑区敏感性高；DSC-TTP增高脑区面积与PLD 1.5sCBF减低脑区面积基本一致。

3 讨论

慢性脑血管性疾病(如ICAS、烟雾病)脑血流动力学的特点是由于受累脑实质动脉血可经侧支循环或后循环等途径代偿,使得该脑区动脉血液流量即脑血流量(CBF)接近正常,但动脉血到达该脑区时间(如DSC参数MTT、TTP)显著异常。这是脑血流动力学紊乱的结果^[6]。本组32例患者大脑中动脉重度狭窄侧灌注异常定性分析显示,3DASL PLD 1.5sCBF与DSC-MTT、DSC-TTP均表现为血流灌注减低,3DASL PLD 2.5sCBF及DSC-CBF两侧基本对称,符合慢性ICAS导致脑血流动力学改变的特征。

本组研究发现,3DASL PLD 1.5sCBF与DSC-TTP在发现和检出ICAS患者脑灌注减低区具有高度敏感性 & 较高一致性。血流灌注减低是ICAS脑血流动力学特点所决定的,也是缺血性卒中的常见原因^[10]。ICAS将导致脑灌注压力(cerebral perfusion pressure, CPP)改变,此时,机体将通过对脑血流动力学的补偿机制(如小动脉扩张和侧支循环开放或形成)进行调节以确保脑组织的血液供应需求。在脑血流灌注代偿期,通过脑血流动力学的调节, CPP可维持在正常水平,此时CBF、CBV值都在正常水平,而MTT、TTP可表现为延长,本组研究病例即处在该期(如图1中病例)。当脑血流动力学的补偿机制下降,小动脉扩张和侧支循环尚可维持CBF在正常水平或轻度下降,但CBV及MTT、TTP值将明显升高,此时予以临床干预,可降低脑血流动力学紊乱进一步恶化。

近年来,影像学者应用3DASL技术对急性缺血性卒中做了大量研究。Zaharchuk^[11]及Bivard^[12]等运用单个PLD ASL技术结合扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI),发现在对急性缺血性卒中患者缺血半暗带的判定上,有较好的敏感性(0.81)和特异性(0.71)。与既往研究一致,本组研究也显示3DASL PLD 1.5sCBF与DSC-TTP对ICAS灌注减低具有较好的检出能力,进一步证明3DASL PLD 1.5sCBF可以作为评估动脉粥样硬化狭窄患者脑血流灌注的敏感指标。

在脑血管重度狭窄侧脑灌注异常区域进行ASL及DSC的参数定量分析结果显示,ASL-PLD 1.5s CBF、DSC-CBF、DSC-MTT、DSC-TTP参数与对照区域差异具有统计学意义,异常灌注脑区ASL-PLD 1.5s CBF与ASL-PLD 2.5s CBF差异具有统计学意义;DSC-CBV两侧差异无统计学意义。造成该结果的可能原因如下:(1)年龄:年龄增长是脑血管疾病发生及脑血流动力学改变的主要危险因素^[13]。本组患者均为中老年人,且伴有脑动脉粥样硬化及一侧大脑中动脉重度狭窄,血流速度缓慢,以致短的PLD内(PLD=1.5s)呈低灌注表现,DSC-MTT、DSC-TTP延长。(2)本组患者均处于CPP代偿期,DSC-CBV多能维持在正常水平,故总体对血流灌注的改变不敏感;而ASL-PLD 1.5s CBF、DSC-MTT、DSC-TTP对灌注血流的流速变化及血流到达时间敏感,故可以反映灌注异常区域的定量差异。

消除各灌注参数个体间的差异后行Pearson相关分析,发现ASL-PLD 1.5s rCBF与DSC-rMTT、DSC-rTTP呈负相关,以ASL-PLD 1.5s rCBF与DSC-rTTP相关更为显著;并且对DSC-TTP与ASL-PLD 1.5s CBF的灌注减低区域面积进行比较,发现两者差异无统计学意义。之所以ASL-PLD 1.5s CBF与DSC灌注参数具有相关性,这与ASL的成像原理密切相关。ASL是一种无创性磁共振灌注成像方法,不需要外源性造影剂、仅以血管内水分子作为天然示踪剂即可在组织水平上对全脑灌注进行可视化和定量分析,目前已被广泛应用于中枢神经系统疾病的临床诊疗中^[14-15]。标记后延迟(post-label delay, PLD)时间是ASL成像的重要参数,指的是从标记脉冲结束到ASL灌注图像采集开始所等待的时间^[16]。PLD时间长短的选择对于ASL的灌注结果有重要的影响和临床意义,不同PLD的选择反应了不同的血流灌注信息^[17]。短的PLD(PLD 1.5s)反应的是灌注行为,即灌注责任血管的粗细、行走路径的长短等信息。脑动脉粥样硬化性狭窄的患者,在短PLD(1.5s)的ASL成像中,表现为低灌注,且可以定量分析,真实反映了脑组织生理水平的灌注信息。

对标准化后的ASL-PLD 2.5s rCBF与DSC-rCBF进行t检验,提示差异无统计学意义,表明ASL-PLD 2.5s CBF能反映脑灌注的结果。这也表明了ASL-PLD 2.5s CBF对于动脉粥样硬化性狭窄致慢性脑缺血评价的可行性。临床实践中,虽然慢性动脉粥样硬化性

狭窄患者存在侧枝循环,但定量分析脑血流量仍可发现血管狭窄侧血流灌注仍不能达到正常侧水平,这是由于更长的PLD时间需要更长的成像时间,同时由于标记的水分子在血液中随着时间延长在不断衰减,使得图像信噪比大大降低,因此限制了更多、更长PLD的临床应用^[18-19]。

DSC是目前应用于缺血性卒中常用的方法之一,虽然DSC参数是半定量参数,但这些半定量参数仍是分析不同卒中类型、判定缺血半暗带及评估再灌注的重要指标,可间接揭示脑卒中的病理生理学机制,反映脑卒中的血流动力学变化,有助于临床诊疗决策^[6,9,20]。本研究与半定量的DSC-CBF比较发现,两者在评估脑动脉粥样硬化性狭窄致脑缺血灌注改变方面具有较好一致性,虽然目前暂无明确证据表明ASL-PLD 2.5s可完全等同或取代DSC-CBF,但随着ASL标记技术及信号采集方案的不断发展、改进及进步,我们的研究结果对未来ASL技术向临床应用的转化具有一定的参考价值。

本研究的不足之处包括样本量相对较小,同时,动脉狭窄度固然是血管最终事件的危险因素,但动脉粥样硬化导致的血流动力学微观改变同样不应被忽略^[20],故在进行标准化分析时存在一定客观的偏倚;此外,进行定量测量各参数时ROI为手动选取,也具有一定的主观偏倚。将来对大样本数据的收集、多因素的总结及更精细的计算和分析有望能弥补上述不足之处。

尽管ASL技术暂不足以完全取代DSC-PWI,但双PLD ASL技术无创、不需注射钆造影剂,能在生理状态下真实反映脑动脉粥样硬化性狭窄患者脑血流动力学的变化及血流灌注水平,这对于脑动脉粥样硬化性脑缺血患者进行长期动态随访和治疗疗效监测具有重要意义,同时能为此类患者临床治疗决策选择及预防管理提供可靠临床依据。

参考文献

- [1] Holmstedt CA, Turan TN, Chimowitz MI. Atherosclerotic intracranial arterial stenosis: risk factors, diagnosis, and treatment [J]. *Lancet Neurol*, 2013, 12(11): 1106-1114.
- [2] Wang YJ, Zhao XQ, Liu LP, et al. Prevalence and outcomes of symptomatic intracranial large artery stenoses and occlusions in China: the Chinese intracranial atherosclerosis (CICAS) study [J]. *Stroke*, 2014, 45(3): 663-669.
- [3] Mohindra N, Neyaz Z. Cerebral blood flow measurement with arterial spin labeling MRI: an underutilized technique [J]. *Neurol India*, 2019, 67(3): 834-836.
- [4] Juttukonda MR, Donahue MJ. Neuroimaging of vascular reserve in patients with cerebrovascular diseases [J]. *Neuroimage*, 2019, 187: 192-208.
- [5] Lindner T, Bolar DS, 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.
- [6] Quarles CC, Bell LC, Stokes AM. Imaging vascular and hemodynamic features of the brain using dynamic susceptibility contrast and dynamic contrast enhanced MRI [J]. *Neuroimage*, 2019, 187: 32-55.
- [7] Iutaka T, De Freitas MB, Omar SS, et al. Arterial spin labeling: techniques, clinical applications, and interpretation [J]. *Radiographics*, 2023, 43(1): e220088.
- [8] 王宪雯, 吴芳, 刘玥宏, 等. 伪连续动脉自旋标记成像评估出血型烟雾病患者脑血流动力学研究 [J]. *磁共振成像*, 2022, 13(1): 6-10.
- [9] Gopinath G, Aslam M, Anusha P. Role of magnetic resonance perfusion imaging in acute stroke: arterial spin labeling versus dynamic susceptibility contrast-enhanced perfusion [J]. *Cureus*, 2022, 14(3): e23625.
- [10] Caplan LR, Wong KS, Gao S, et al. Is hypoperfusion an important cause of strokes? If so, how [J]. *Cerebrovasc Dis*, 2006, 21(3): 145-153.
- [11] Zaharchuk G, El Mogy IS, Fischbein NJ, et al. Comparison of arterial spin labeling and bolus perfusion-weighted imaging for detecting mismatch in acute stroke [J]. *Stroke*, 2012, 43(7): 1843-1848.
- [12] Bivard A, Krishnamurthy V, Stanwell P, et al. Arterial spin labeling versus bolus-tracking perfusion in hyperacute stroke [J]. *Stroke*, 2014, 45(1): 127-133.
- [13] Nagata K, Yamazaki T, Takano D, et al. Cerebral circulation in aging [J]. *Ageing Res Rev*, 2016, 30: 49-60.
- [14] 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(1): 130-133.
- [15] Haller S, Zaharchuk G, Thomas DL, et al. Arterial spin labeling perfusion of the brain: emerging clinical applications [J]. *Radiology*, 2016, 281(2): 337-356.
- [16] Alsop DC, Detre JA. Reduced transit-time sensitivity in noninvasive magnetic resonance imaging of human cerebral blood flow [J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 1996, 16(6): 1236-1249.
- [17] 刘松国, 韩广, 于秀英, 等. 不同后标记延迟三维动脉自旋标记技术对大脑中动脉狭窄的评估 [J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2019, 17(3): 231-233, 237.
- [18] Bokkers Rph, Bremner Jp, van Berckel BNM, et al. Arterial spin labeling perfusion MRI at multiple delay times: a correlative study with H(2)(15) O positron emission tomography in patients with symptomatic carotid artery occlusion [J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2010, 30(1): 222-229.
- [19] Teeuwisse WM, Schmid S, Ghariq E, et al. Time-encoded pseudocontinuous arterial spin labeling: basic properties and timing strategies for human applications [J]. *Magn Reson Med*, 2014, 72(6): 1712-1722.
- [20] Leng XY, Wong KS, Liebeskind DS. Evaluating intracranial atherosclerosis rather than intracranial stenosis [J]. *Stroke*, 2014, 45(2): 645-651.

(收稿日期: 2023-06-21)

(校对编辑:)