

缺血性脑血管病侧支循环的影像学评估方法

鞠新越(综述) 孙祥荣(审校)

【中图分类号】 R743.3 【文献标识码】 A 【文章编号】 1007-0478(2019)06-0767-05
【DOI】 10.3969/j.issn.1007-0478.2019.06.033

缺血性脑卒中多是由于脑血管狭窄或闭塞所致,短时间内核心梗死区的细胞已死亡,但缺血半暗带(IP)尚可挽救,并成为急性期首要治疗目标^[1],而 IP 的转归则与侧支代偿密切相关。侧支循环是指当大脑的供血动脉严重狭窄或闭塞时血流通侧支或新形成的血管吻合到达供血区,从而使缺血组织得到不同程度的灌注代偿^[2]。侧支循环的概念:根据解剖学结构,侧支循环可分为三级:一级侧支循环,即初级侧支循环,主要由 Willis 环组成;二级侧支循环,即次级侧支循环,包括颅外与颅内动脉分支间、颅外动脉分支间、颅内动脉分支间和一系列软脑膜吻合侧支;三级侧支循环,即新生血管形成。一般情况下脑血管狭窄或闭塞后一级侧支循环首先开放,有些大脑动脉闭塞无法启动一级侧支循环或一级侧支循环难以满足缺血区代偿的情况下会启动二级侧支循环;在颅内大动脉慢性进展性闭塞的过程中可有较多的新生血管形成三级侧支循环,虽然细小,但也起一定的补充代偿作用。缺血性脑血管病按照病程可分为急性和慢性:急性缺血性脑卒中患者在急性大动脉近端闭塞中良好的侧支循环可能有助于在没有血管再通的情况下维持缺血脑组织的活力,血管内治疗时间窗可以延长到发病后 5 h,是长期预后良好的预测因素;慢性缺血性脑卒中患者在颅内血管慢性进行性狭窄闭塞过程中造成大脑慢性缺血缺氧,远端血管压力降低以及多种特异性炎症反应、血管生长因子的作用可促发脑底穿支动脉弯曲扩张,并形成丰富的侧支血管等代偿性供血,有助于在脑卒中发病后相对较长的时间内维持缺血灶周围的血液供应,保留可挽救的脑组织,减少脑梗死病灶的数量和体积,并显著降低症状性颅内动脉狭窄患者脑卒中复发风险^[3]。正确有效地评估脑血管狭窄情况、侧支循环建立情况对缺血性脑血管病患者的诊断、治疗和预后评估均有着较高的临床价值^[4]。本研究从结构和功能的两个角度综述了侧支循环的影像学评估方法。

1 侧支循环的影像学评估方法

1.1 数字减影血管造影(DSA)

DSA 被公认为评估脑血管侧支循环的金标准^[5]。Lee 等^[6]针对缺血性脑血管病患者应用 DSA 检查的研究证明 DSA 可以准确发现脑动脉狭窄或闭塞部位,清晰地显示各种侧支循环的解剖结构和代偿供血的范围。通过具体的

DSA 成像可清晰显示脑血管形态结构的同时可利用由 TIMI 演化而来的 eTICI 评分方法从功能的角度细化血流再灌注分级,对血管再通进行标准化分级,从而更好地实现对患者治疗评价以及对患者预后进行预测^[7]。但其也有一些局限性,包括(1)DSA 无法定量评估不同类型代偿模式的血流动力学状态,在检查时需要采用高压注射器和一定剂量的对比剂,可能因压力作用而出现血流逆向充盈,导致假阳性造影结果;(2)DSA 检查其操作是有创性的,此项检查需要熟练的技术和更多的时间,并且存在一定风险,有发生穿刺部位血肿、手术操作中有发生动脉粥样硬化斑块脱落、血管痉挛、血管内皮损伤,导致中枢神经系统并发症可能^[8]。由于目前脑血管介入治疗的广泛开展,此项检查应用率逐渐增加,已日趋成熟,成为了相对常用的评估脑血管状态的检查。

1.2 经颅多普勒超声(TCD)和经颅彩色双功能超声(TC-CD)

TCD 是一种无创性检测颅底大动脉血流动力学的诊断技术,通过检测颅底动脉的血流速度、血流方向、血流频谱、音频特点等血流动力学改变能较准确地评估脑动脉的狭窄、闭塞和侧支循环情况。经崔虹等^[8]、Kim^[9]通过与 DSA 比较的研究显示 TCD 检测一级侧支循环开放的特异性为 90.43%、敏感性为 99.21%,因此得出 TCD 可直接可靠地评估颅内动脉重度狭窄或闭塞患者的一级侧支和眼动脉侧支,其评估前交通动脉侧支的敏感性和特异性高于后交通动脉侧支。但 TCD 评估软脑膜侧支循环(二级侧支循环)的临床应用相对较少。TCD 为非血管形态学检查技术,对颅内深部的穿支动脉侧支、脉络膜前动脉、枕动脉与椎动脉之间侧支以及颈深动脉与椎动脉之间的侧支吻合代偿评估难度均较大,且临床易受到颞窗穿透不良的限制。经宋彬等^[10]应用 TCD 联合颈部血管彩色多普勒超声(CDUS)可以准确诊断颅内动脉起始段病变以及病变部位和程度,既能够看管腔和血流,又能评估斑块和管壁情况,准确判断一、二级侧支循环建立情况,但常用于发挥临床随访方面的优势。随着超声的发展,经颅彩色双功能超声(TCCD)是一种相对较新的无创性技术,其可通过颅骨透声窗穿透成人的完整颅骨,显示脑实质和颅内血管结构实时情况,常能发现严重的颅内血管狭窄、判断局部血管和侧支循环情况、检测易损斑块和栓子的状况,但国内外对健康成人脑动脉内径、颅内血流动力学参数及脑动脉颅外段和颅内动脉的全面检查、分析尚无系统报道。与传统 TCD 相比,TCCD 联合 CDE(超声造影术)可更准确地显示血管解剖结构,增加检查的敏感性。但有研究显示 TCCD 只有结合 DSA 才能从结构和功能上全面评价颅

内侧支循环^[11]。目前关于 TCCD 技术缺乏大量临床验证研究,对颅内血管及各级侧支循环情况敏感性、特异性的评估仍有待考证,可行进一步研究。

1.3 磁共振检查(MRI)

磁共振血管成像(MRA)应用磁共振技术通过血管形态学的改变评估侧支循环功能。优点是检查方便且无需注射血管造影剂,相关软件可自动重建血管影像。MRA 不是对血管解剖结构的简单描述,而更能反映血流方式和速度等功能性信息。临床常用 MRA 检测方法有三维时间飞逝(3D TOF)法与三维相位对比法,前者对快血流血管显示好,后者则常用于慢血流血管显示^[12]。通过 3D-TOF-MRA 可较为准确地观察一级侧支循环(Willis 环)的建立^[13]。赵云辉等^[12]研究显示与 DSA 相比,MRA 评估前交通动脉侧支的敏感性、特异性和准确性无显著差异;MRA 评估 60 例缺血性脑血管病患者后交通动脉侧支的显示率(30.0%)明显低于 DSA 组(94.2%)。因此,可以得出 MRA 对后交通动脉侧支的评估价值不高。基于 MRA 的成像原理,图像采集仅允许在 3 个垂直平面进行血流敏感成像,且由于受到解剖分辨率的限制,只能用于 Willis 环近端血管的评价;对眼动脉、脉络膜前动脉、脑膜表面血管等小动脉显示不良,分辨率有限,不能显示血管充盈的动态过程,并且对慢流速血管不敏感,由于角度、血管走行、血流缓慢等问题,会出现假阴性或假阳性结果。

程艳伟等^[14]的研究可得出 MRA 对于直径在 1 mm 以上的血管可清晰显示,而对于小血管显示欠佳。对于二级侧支循环,MRA 在评估软脑膜侧支时可提供相关信息,但由于对末梢血管的分辨率及敏感性不高,MRA 评估软脑膜侧支的能力有限。MRA 与 DSA 对缺血性脑血管病患者的大脑侧支循环灌注情况评估的结果一致性较差^[13]。随着 MRA 的发展,经 Pérez,LIU 等^[15-16]研究发现,具有液体衰减反转恢复系列(FLAIR)的末梢血管高信号的患者与没有末梢血管高信号的患者相比,存在较小的急性期损伤、较小的 24 h 和亚急性期损伤、较大的弥散灌注错配和较小的 DWI 最终梗死灶,故认为 Flair 像末梢血管高信号可作为软脑膜侧支的标志。临床上常有急性脑卒中患者发病时间不详的情况,而 FLAIR 在一定程度上反映低灌注区及侧支循环情况,DWI 反应核心梗死区情况,因此近几年来有研究证明 DWI 与 FLAIR 的不匹配提示缺血半暗带的存在,它们之间的不匹配可作为症状发作前 4.5 h 的时间预测因子,有效地评估溶栓治疗时间窗^[17-18]。

动态磁敏感灌注加权成像(DSC PWI)是一种采用团注外源性顺磁性对比剂的磁敏感效应来反映组织微循环血流动力学的功能磁共振成像技术,图像处理后可得到脑血容量(CBV)、脑血流量(CBF)、平均通过时间(MTT)和达峰时间(TTP)等脑灌注参数。此项检查从脑组织功能的角度着重评估缺血性脑卒中患者低灌注区是否存在缺血半暗带,以此来进一步证明侧支循环的存在(在缺血性脑血管病中 CBV、CBF 降低,MTT、TTP 延长提示存在侧支循环)。缺血性脑卒中患者行此项检查时一般认为 DWI 上弥散受限区域可代表核心梗死区,而 PWI 上低灌注区减去核心梗死区即为缺

血半暗带(IP),由此可判断 DWI 与 PWI 之间的不匹配证明了侧支循环的存在。有研究表明 DSC PWI 是一项适用于评估早期(<6 h)缺血性脑卒中侧支血流情况的无创性检查^[19]。有研究^[20]证明 DSC MRI 采取软膜 T_{max} 图评估的侧支评分方法(TMACS)与 DSA 进行比较,DSC MRI 延迟灌注可有效评估软脑膜侧支。随着灌注技术的进展,尽管已使用灌注参数来评估侧支情况,但由于灌注时间限制,尚未确定评估侧支的特定灌注标准。有研究提出新的评估侧支的灌注参数即灌注侧支指数(PCI,即 ATD2-6s 动脉组织延迟×rCBV 相对脑容量),此项评估侧支的方法诊断准确率与 DSA 相比可达 94%,但对于具体不同级别侧支循环开放情况尚未进一步证明^[21]。多项对比研究显示 DSC PWI 与 ASL 在发现血流灌注异常方面有着较好的一致性^[22]。但 Wang 等^[22]研究表明 ASL 可较 DSC PWI 更敏感显示再灌注改变。目前由于 DSC PWI 需注射对比剂,无法反复使用,且无法直观显示侧支循环的血管形态,临床尚未广泛使用。

磁共振动脉自旋标记灌注成像技术(MRA-ASL)是一种新的磁共振灌注成像技术,近年来被用于评估颅内动脉侧支循环,尤其是磁共振技术不能检测的小血管。ASL 是通过动脉血做磁标记作为内源性对比剂,以自由弥散的水为内源性示踪剂,通过测定 CBF 值来对脑组织的血流灌注进行定量测量的磁共振成像技术^[23]。经 Greg^[24]、Chng^[25] 研究显示 ASL 可从定量的角度明确脑血管狭窄或闭塞部位以及侧支循环等脑血流灌注情况。ASL 主要是通过低灌注区检测动脉通过伪影(arterial transit artifact, ATA)来评估侧支循环,ATA 通常依赖于标记时间和后标记延迟时间(PLD)两个参数。ASL 技术中 CBF 的测量值极易受到后标记延迟时间(PLD)的影响,由于 PLD 无法明确规定、单时相 PLD 或 PLD 过短存在延迟成像等缺点,对于大血管严重闭塞的患者因血流流速减慢,会导致灌注的低评估;若多时相 PLD 会导致检查时间过长,降低信噪比^[24,26]。有研究^[27]采取双时相 PLD 的方式(即在注射造影剂后 1.5 和 2.5 s)将 ASL-MRI 与 DSA 表现进行了视觉比较,可有效区分发育良好且停滞的侧支血管与局灶性高灌注的区别,但此方法样本量小,其可靠性仍有待进一步研究^[27]。目前 3D PCASL 较广泛应用于脑灌注成像,其可减轻磁敏感及运动伪影,同时采用三维容积式扫描提高信噪比^[28]。但 3D PCASL 未能判定侧支动脉血供来源及区分病理性慢血流,因此也可能存在高估侧支代偿的影响^[28]。近年来对于 ASL 技术的研究日益增加,今年已有研究证明 4DPACK(四维伪连续动脉标记的血管造影)可直观地观察脑动脉及侧支循环血管形态以及评估血流动力学,并可以有效地提高信噪比^[29],但需要大量的临床证据进行检验。ASL 技术正在不断完善与推广,从而为临床提供更为可靠、准确的侧支血流动力学信息。

1.4 计算机断层扫描成像(CT 成像)

CT 血管成像(CTA)是通过静脉注射碘化造影剂后经 CT 扫描进行血管重建成像,其成像质量接近常规血管造影。其优点为可从不同角度高效、无创、准确地显示出责任血管及大脑侧支循环情况,并可排除动静脉畸形、动静脉瘘、血管

瘤等血管性病变,且属于无创检测技术,方便易行、耗时少^[30]。CTA 空间分辨率高,可显示侧支血流的解剖学形态,可高度准确地评估 Willis 环的解剖变异^[31]。一项对比评价 DSA 和 CTA 用于 Willis 环变异评估准确性的研究^[32]显示,CTA 诊断 Willis 环先天缺如敏感性为 97.9%、特异性为 92.5%、阳性预测值为 79.8%、阴性预测值为 99.3%、精确度为 93.8%^[32]。因此,CTA 可从结构角度有效评估一级侧支循环^[32]。但 CTA 无法取代 DSA 进行侧支循环评估^[33]。

近年来出现了一些用于评估侧支循环的 CT 新技术。CT 灌注扫描(CTP)作为新兴的无创影像学技术,可以通过 CT 扫描获得脑侧支循环、梗死核心区以及缺血半暗带等全脑的灌注信息;利用 CTP 重建的动态 CTA 不仅可以模拟 DSA 来动态观察颅内血管,还可以获得全脑各个方位的血管显影情况,提供颅内血管时间和空间分辨率信息;通过 CTP 扫描获得颅内血管从无对比剂充盈到逐渐充盈然后消散的全过程动态图像,显示的血流较单时相 CTA 更完整,因此可以更充分地评估侧支血流状况,可预测缺血性脑血管病的神经功能和临床结局。一项对比 4D CTA 和常规单时相 CTA 评估急性缺血性脑卒中患者侧支循环及预后相关性的研究得出应用 4D-CTA 评估侧支循环不良对临床结局较单时相 CTA 具有更好的预测价值^[34-35]。一项应用 4D-CTA 评估软脑膜侧支解剖学范围、血管轮廓和逆行灌注时间的研究显示,该技术评估软脑膜侧支循环具有较高的敏感性、特异性和可信度^[36]。

目前临床上越来越多地应用 CTP 联合 4D-CTA(全脑动态时间分辨 CTA),此项检查覆盖范围大,扫描时间短,通过一次低对比剂用量,一站式完成扫描获取平扫、全脑 CTP 容积图像、动态 CTA 图像,其不仅可以显示梗死区脑供血动脉的形态变化,还可以观察侧支循环血管情况以及对其相关功能进行评估,并同时排除脑出血、脑肿瘤等相关疾病,通过综合评估灌注参数 TTP、MTT、CBV、CBF 值的变化,以此来决定缺血性脑血管病患者血管内治疗方案,有效评估患者病情及预后^[37-38]。CT 灌注成像中灌注时间参数 MTT、TTP 是脑灌注变化最敏感和重复性最强的指标,TTP 比 MTT 更敏感。MTT 和 TTP 的延长反映灌注路径延长和血流缓慢,提示区域内存在侧支循环,CBV 可升高,CBF 通常保持不变。侧支状态良好者 CBV、MTT、TTP 均升高^[39]。甚至有研究明确提出如 TTP 延迟 >6 s,CBF 轻度降低,CBV 不变甚至稍增高,则可证明存在侧支循环的区域^[40]。目前 4D CTA-CTP 技术已日趋成熟,适用于急性脑卒中患者的诊断及侧支循环的评估^[41]。

随着多模式 CT 和 MRI 的发展,阿尔伯特脑卒中计划早期诊断评分(Alberta stroke program early CT score,ASPECT)不仅用于筛选符合溶栓条件的患者,也逐渐被用于评估软脑膜侧支循环,对比病变血管与对侧正常血管的血流供应。Fatih Seker(10 pubmed)等通过将改良的 ASITN/SIR(此评分方式是美国介入和治疗神经放射学/介入放射学会应用 DSA 进行侧支评分的方法)与 ASPECT 侧支评分比较证明两者评估早期梗死核心及错配体积的程度一致性更高^[42]。张英等^[43]研究显示应用 CTA 侧支循环评分 Tan 评

分、Mass 评分方法均有较好的灵敏度及特异度,且前者优于后者。经 Liu^[44]等研究证实在 ASPECT 评分的基础上增加区域软脑膜评分(rLMC 评分包括大脑前动脉供血区、基底节、外侧裂区以及 ASPECT 的 M1-M6 区),可以提高侧支循环评估的可信度,可以得出侧支循环建立情况与 rLMC 评分呈正相关,此项评分方法优于 Tan、Mass 评分。但此评分方法操作复杂、耗时相对较长,且无法定量评估脑灌注情况,对于急症患者应用率较低。

1.5 单光子发射计算机断层扫描(SPECT)以及正电子发射断层扫描(PET)

SPECT 是由脑血流(氧摄取分数)灌注显像及脑葡萄糖代谢显像联合评估,其可反映缺血后脑组织的代谢情况,更好地评估脑组织功能^[45-46]。在缺血早期由于有效的血流代偿机制尚未建立,使得缺血脑组织的缺血状态持续存在,最终出现低灌注、低葡萄糖代谢;随着发病时间的延长,部分患者出现侧支循环代偿,侧支循环可改善脑血流灌注,减轻脑缺血,由于不同侧支循环的代偿能力不同,血流灌注改善的程度也不同,因此葡萄糖代谢也随之发生不同变化。PET 在功能学角度是半暗带成像的金标准,它可以准确地显示梗死核心区和低灌注组织;当 $CBF < 12 \text{ mL} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 时为核心梗死区,CBF 在 $12 \sim 22 \text{ mL} \cdot 100 \text{ g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 为脑血管狭窄或闭塞后有梗死风险的区域, $CBF > 22 \text{ mL} / 100 \text{ g} / \text{min}$ 为 1 个低葡萄糖代谢区域即低灌注组织区,无梗死风险。SPECT、PET 可通过对比大脑两侧灌注及代谢情况差异进行评估,间接评估患者侧支代偿水平,但费用昂贵,临床应用率较低。

2 结束语

侧支循环是缺血性脑血管病患者发生脑卒中事件预后的重要预测因子^[47],良好的侧支循环可改善缺血后脑组织损伤、减少梗死病灶数量和体积,提高血管再通获益率,显著降低脑卒中复发风险^[48]。因而准确有效的评估侧支循环可以预测血管内治疗的疗效和脑梗死体积以及出血转化的风险^[36]。经过大量文献调查,可得出 DSA 系明确脑血管侧支循环情况的金标准,有良好的时间和空间分辨率,但费用高、创伤性、并发症多、操作复杂。TCD、MRA 仅能显示 Willis 环及局部侧支循环,而 Willis 环解剖变异相对较大,可导致 TCD 低估侧支循环情况,且 TCD 仅能显示脑血流动力学的改变,无法评估脑血管形态及脑血流量。MRA 虽然无创、无放射性、无需注射对比剂,但对眼动脉及脉络膜动脉等二级侧支循环情况评估受限,临床上建议可用于脑血管疾病的初筛、诊断、随访及术后评估。PET、SPECT 系从脑组织功能代谢的角度间接评价侧支循环,图像空间分辨率低、设备昂贵、普及率低、临床应用率低,准确性尚不明确。4D CTA-CTP 可清晰显示脑血管狭窄患者全脑组织中血流动力学的变化,可从定性、定量的角度更加直观把握脑侧支循环开放状态,此项检查快速、无创、普及率高,对脑缺血后的侧支循环状态及脑灌注做出评价,尤其适用于急诊患者,因此临床应用率逐渐增加,且日趋成熟,但存在一定的辐射。有效评估侧支循环是为了更好地评估挽救缺血半暗带的可能性,而

MRI DWI 与 ASPECT 之间的不匹配、MRI FLAIR 与 ASPECT 之间的不匹配均可提示存在侧支循环,不失为一个较为实用的评估侧支循环决定血管内治疗的有效检查方式,且可广泛应用于临床。随着 MR 检查及新技术的发展,选择性 ASL 技术逐渐成为诊断脑血管疾病的一种新方法,可有效避免电离辐射,从定性、定量的角度评估梗死部位及脑血流灌注情况,但目前仍存在后标记延迟、临床应用率低等相关缺陷,积极完善 ASL 有望可作为新兴技术为临床提供更为准确的影像学诊断信息,为临床个体化、精准治疗提供参考。

参 考 文 献

- [1] 周建国,孟云,马先军. ASL 联合 SWI 对急性脑梗死侧支代偿建立状态的评估价值[J]. 中风与神经疾病杂志, 2016, 33(10): 886-889.
- [2] 李义,张保朝,曹伟光,等. DSA 对单侧颈内动脉系统大动脉狭窄或闭塞后侧支循环建立的应用价值[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2017, 20(5): 33-36.
- [3] 李曼婷,韩珂,吴江. 联合应用经颅多普勒超声(TCD)及定量脑电图(qEEG)评估单侧大脑中动脉重度狭窄或闭塞者脑功能改变的临床价值[J]. 中风与神经疾病杂志, 2018, 35(4): 300-305.
- [4] Vilela P, Rowley HA. Brain ischemia: CT and MRI techniques in acute ischemic stroke[J]. Eur J Radiol, 2017, 96: 162-172.
- [5] Awad, I. Intravenous digital subtraction angiography: an index of collateral cerebral blood flow in internal carotid artery occlusion[J]. Stroke, 1982, 13(4): 469-472.
- [6] Lee WJ, Jung KH, Ryu YJ, et al. Utility of digital subtraction angiography-based collateral evaluation in medically treated acute symptomatic basilar artery stenosis[J]. European Journal of Neurology, 2017, 24(9): 1148-1155.
- [7] Marks MP, Lansberg MG, Mlynash MA, et al. Effect of collateral blood flow on patients undergoing endovascular therapy for acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2014, 45(4): 1035-1039.
- [8] 崔虹,王玉梅,张华,等. TCD 对 ICA 闭塞或重度狭窄患者侧支循环开放的诊断价值[J]. 西南国防医药, 2017, 27(5): 459-462.
- [9] Kim Y, Sin DS, Park HY, et al. Relationship between flow diversion on transcranial Doppler sonography and leptomeningeal collateral circulation in patients with middle cerebral artery occlusive disorder[J]. J Neuroimaging, 2009, 19(1): 23-26.
- [10] 宋彬彬. TCD 联合 CDUS 评估单侧颈内动脉起始段病变侧支循环通路或缺血性脑血管病的关系[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2018, 21(8): 813-818.
- [11] 柳标. 彩色多普勒超声对脑动脉血流动力学及侧支循环的研究[J]. 2007.
- [12] 赵云辉,马著彬,许乙凯. 颈内动脉狭窄或闭塞侧支循环途径的 DSA 和 MR 血管成像研究[J]. 中华放射学杂志, 2004, 38(10): 48-53.
- [13] Ito K, Sasaki M, Kobayashi M, et al. Noninvasive evaluation of collateral blood flow through circle of willis in cervical carotid stenosis using selective magnetic resonance angiography[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2013, p(5): 1019-1023.
- [14] 程艳伟,张菲菲,于敏敏,等. MRA、CTA 评估脑侧支循环的临床应用价值[J]. 脑与神经疾病杂志, 2017, 25(9): 529-533.
- [15] Ossa de La Perez, N. Hyperintensity of distal vessels on FLAIR is associated with slow progression of the infarction in acute ischemic stroke[J]. Cerebrovasc Dis, 2012, 34(5/6): 376-384.
- [16] Liu W, Xu G, Yue X, et al. Hyperintense vessels on FLAIR: a useful non-invasive method for assessing intracerebral collaterals[J]. Eur J Radiol, 2011, 80(3): 786-791.
- [17] Kim, J B. Diffusion-weighted image and fluid-attenuated inversion recovery image mismatch: unclear-onset versus clear-onset stroke[J]. in Strokedoi; 10. 1161/STROKEAHA. 113. 002830. Epub 2013 Dec 17, 2014, p(2): 450-455.
- [18] Fahed R, Leclerc A, Sabben C, et al. DWI-ASPECTS (Diffusion-Weighted Imaging-Alberta stroke program early computed tomography scores) and DWI-FLAIR (Diffusion-Weighted Imaging-Fluid attenuated inversion recovery) mismatch in thrombectomy candidates: an intrarater and interrater agreement study[J]. Stroke, 2018, 49(1): 223.
- [19] Deguchi, I. Significance of clinical-diffusion mismatch in hyperacute cerebral infarction[J]. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases, 2011, 20(1): 62-67.
- [20] Potreck A, Seker F, Hoffmann A, et al. A novel method to assess pial collateralization from stroke perfusion MRI: subdividing T-max into anatomical compartments[J]. Eur Radiol, 2017, 27(2): 618-626.
- [21] Nael, K. Mr perfusion to determine the status of collaterals in patients with acute ischemic stroke: a look beyond time Maps[J]. American Journal of Neuroradiology, 2018, 39(2): 219-225.
- [22] Wang, J DJ. The value of arterial Spin-Labeled perfusion imaging in acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2012, 43(4): 1018-1024.
- [23] Grade M, Hernandez Tamames JA, Pizzini FB, et al. A neuro-radiologist's guide to arterial spin labeling MRI in clinical practice[J]. Neuroradiology, 2015, 57(12): 1181-1202.
- [24] Zaharchuk, G. Arterial Spin-Labeling MRI can identify the presence and intensity of collateral perfusion in patients with moyamoya disease[J]. Stroke, 2011, 42(9): 2485-2491.
- [25] Chng SM, Petersen ET, Zimine I, et al. Territorial arterial spin labeling in the assessment of collateral circulation: comparison with digital subtraction angiography[J]. Stroke, 2008, 39(12): 3248-3254.
- [26] Fan AP, Guo J, Khalighi MM, et al. Long-Delay arterial spin labeling provides more accurate cerebral blood flow measurements in moyamoya patients: a simultaneous positron emission tomography/MRI study[J]. Stroke, 2017, 48(9): 2441-2449.
- [27] Akiyama T, Morioka T, Shimogawa T, et al. Arterial Spin-Labeling magnetic resonance perfusion imaging with dual postlabeling delay in internal carotid artery steno-occlusion: validation with digital subtraction angiography[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2016, 25(9): 2099-2108.
- [28] 周建国,孟云,马先军,等. 动脉自旋标记成像对轻中度急性脑梗死侧支代偿显示的临床应用价值[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2016, 14(6): 627-630.
- [29] Togao, O. 4D ASL-based Mr angiography for visualization of distal arteries and leptomeningeal collateral vessels in moyamoya disease: a comparison of techniques[J]. Eur Radiol, 2018, 28(11): 4871-4881.
- [30] 朱志磊,王杰. CT 全脑灌注成像与 MRI 成像在 TIA 诊断中的价值[J]. 内蒙古医学杂志, 2016, 48(3): 306-309.
- [31] 陈涓,刘芳,郭铨,等. 4D CTA 结合 CTP 评价脑缺血后侧枝血流对脑灌注状态的影响[J]. 医学影像学杂志, 2012, 22(8): 1229-1233.
- [32] 刘斌,任伯,毛文静,等. CT 血管成像检查对急性脑梗死患者颈动脉狭窄及脑侧支循环的诊断价值[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2018, 20(2): 137-140.