

缺血性脑卒中侧支循环的影像学定量评估研究进展

肖 寒^{1*}, 李海娜², 刘 军³

¹内蒙古医科大学第五临床医学院, 内蒙古 呼和浩特

²呼和浩特市第一医院影像科, 内蒙古 呼和浩特

³呼和浩特市第二医院影像科, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年1月26日; 录用日期: 2025年2月19日; 发布日期: 2025年2月27日

摘 要

本文综述了影像学定量评估方法在缺血性卒中侧支循环研究中的部分进展。侧支循环在急性缺血性脑卒中(AIS)和大动脉闭塞患者中是决定缺血性半暗区恢复率和脑梗死生长率的关键因素。侧支血流的调节机制通过挽救缺血半暗带区域的脑灌注来改善缺血性卒中的预后。文章详细介绍了脑卒中的病理生理机制、脑侧支循环的解剖和病理生理学、脑卒中相关影像检查方法、目前的治疗方法以及总结与展望。影像学技术如CT灌注成像(CTP)、CT血管成像(CTA)、磁共振灌注加权成像(PWI)、磁共振血管造影(MRA)以及动脉自旋标记成像(ASL)等在评估侧支循环和缺血半暗带方面发挥着重要作用。文章还探讨了静脉溶栓治疗(IVT)、动脉机械取栓(MT)和血管内治疗(EVT)等治疗方法,并展望了未来影像技术在侧支循环评估中的应用前景。

关键词

ASL, CTP, 侧支循环, 急性缺血性脑卒中

Advances in Imaging-Based Quantitative Assessment of Collateral Circulation in Ischemic Stroke

Han Xiao^{1*}, Haina Li², Jun Liu³

¹The Fifth Clinical Medical College of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

²Department of Imaging, Hohhot First Hospital, Hohhot Inner Mongolia

³Department of Imaging, Hohhot Second Hospital, Hohhot Inner Mongolia

*通讯作者。

文章引用: 肖寒, 李海娜, 刘军. 缺血性脑卒中侧支循环的影像学定量评估研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(2): 1315-1323. DOI: 10.12677/acm.2025.152478

Abstract

This article reviews the partial progress of quantitative imaging evaluation methods in the study of collateral circulation in ischemic stroke. The collateral circulation is a key factor determining the recovery rate of ischemic penumbra and the growth rate of cerebral infarction in patients with acute ischemic stroke (AIS) and large artery occlusion. The regulatory mechanism of collateral blood flow improves the prognosis of ischemic stroke by rescuing cerebral perfusion in the ischemic penumbra area. The article provides a detailed introduction to the pathophysiological mechanisms of stroke, the anatomy and pathophysiology of cerebral collateral circulation, stroke related imaging examination methods, current treatment methods, and a summary and outlook. Imaging techniques such as CT perfusion imaging (CTP), CT angiography (CTA), magnetic resonance perfusion weighted imaging (PWI), magnetic resonance angiography (MRA), and arterial spin labeling imaging (ASL) play an important role in evaluating collateral circulation and ischemic penumbra. The article also explores treatment methods such as intravenous thrombolysis (IVT), mechanical thrombectomy (MT), and endovascular treatment (EVT), and looks forward to the future application prospects of imaging technology in collateral circulation assessment.

Keywords

ASL, CTP, Collateral Circulation, Acute Ischemic Stroke

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在急性缺血性脑卒中(Acute ischemic stroke, AIS)和大动脉闭塞的患者中,侧支循环是缺血性半暗区恢复率和脑梗死生长率的关键决定因素[1]。通过对侧支循环状况的评估,可以判断梗死患者的治疗风险和潜在益处。已有众多研究表明,脑侧支循环是 AIS 患者预后的重要决定因素。侧支血流的调节机制可以通过挽救缺血半暗带区域(Ischemic penumbra, IP)的脑灌注来改善缺血性卒中的预后,而缺血半暗带主要取决于血管闭塞后侧支循环的良好与否[2]。

2. 脑卒中病理生理学机制

大动脉粥样硬化是缺血性脑卒中最常见的病因之一,其两年内的脑卒中复发率可高达 20%以上,构成了一个极为严重的公共卫生问题。根据目前的研究表明,ICAS 导致缺血性卒中的不同病理生理机制主要包括动脉-动脉栓塞(artery-to-artery embolism)、低灌注/血流动力学受损(hypoperfusion/hemodynamic compromise)、穿支动脉闭塞(parent artery atherosclerosis occluding penetrating artery)、原位血栓闭塞(insitu thrombotic occlusion) [3]。在以往的研究中,两种梗死机制较为普遍,亦有多种机制共存的情况。前循环与后循环的梗死机制存在差异,前循环梗死多表现为混合机制,而后循环梗死则以穿支动脉闭塞为主[4]-[8]。

低灌注/血流动力学障碍是指血管狭窄导致血流通过受阻,进而引起狭窄远端区域灌注不足,梗死通常发生在不同血管流域的交界区域。穿支动脉闭塞则由于大动脉粥样硬化斑块在扩展过程中导致穿支动

脉闭塞,从而引发其供血区域发生梗死[9]。值得注意的是,这些机制并非孤立运作,而是彼此之间存在相互作用。以动脉-动脉栓塞为例,血管狭窄所导致的低灌注状态会加剧栓子清除的障碍,进而导致栓塞程度的进一步加重;而在低灌注或血流动力学受损的情况下,血管狭窄不仅会诱发低灌注,还会引起血流动力学的改变,其中湍流的增加会改变血管内皮的剪切应力,从而可能引发血管内皮的损伤,最终导致血栓的形成[7]。

3. 脑侧支循环的解剖和病理生理学

3.1. 脑侧支循环的解剖结构

脑侧支循环主要涵盖颅内大动脉间的交通、颅内外吻合支以及颅内小动脉交通支。(1) 颅内大动脉间的交通包括大脑动脉环,亦即 Willis 环,该环状结构连接双侧前循环与后循环,是血管闭塞性疾病侧支代偿的关键通道。它由前交通动脉、右后交通动脉、左后交通动脉以及两侧大脑前动脉、两侧大脑后动脉、两侧颈内动脉构成。在正常生理状态下,大脑动脉环的解剖结构变异可能对功能影响甚微,然而,一旦某根脑血管发生阻塞,侧支循环通路的供血功能便显得至关重要。(2) 颅内外吻合支:颅内外吻合支作为脑侧支循环的关键组成部分,通过眼部、软脑膜以及其他较小的吻合支之间的血流代偿实现功能。在正常生理状态下,这些吻合支可能处于非活动状态,但在主干供血发生梗阻的情况下,它们将被激活,以补充主干血液循环的不足,甚至可能完全替代主干供血,确保组织血流供应的连续性。(3) 颅内小动脉交通支:颅内小动脉交通支在分水岭区域构建动脉网络,尽管其在脑血管系统中的作用相对有限,但若其发展较为完善,则可能对脑供血不足的诊断产生影响。这些动脉网络将脑动脉的皮质终末分支相互连接,在动脉闭塞的情况下,若软脑膜吻合支能够为闭塞动脉的供血区域提供足够的血流灌注,则动脉闭塞可能不会引发临床症状。

3.2. 脑侧支循环的病理生理机制

侧支循环通常在正常大脑中不起作用,当颅内发生局灶性缺血时,侧支血液供应至缺血区域,保护缺血区域,使缺血程度最小化[10]。Sheth 等[11]研究发现对于缺血程度类似的前循环急性卒中患者,侧支循环等级与卒中血管内治疗后最终预后相关,在脑部供应动脉出现严重狭窄或闭塞的情况下,血液可通过侧支循环或新形成的血管吻合到达缺血区域,实现对缺血组织的灌注代偿,从而对急性缺血性卒中后的最终梗死体积及缺血半暗带的形成发挥保护作用。脑侧支循环的形成起始于胚胎期,依据代偿层次,脑侧支循环可分为三个等级:初级侧支循环,即脑底的 Willis 环,作为一级侧支,是最快捷且主要的侧支循环代偿路径;次级侧支循环,亦称为二级侧支,包括眼动脉、软脑膜侧支吻合血管以及其他颅内外动脉的细小动脉分支吻合血管网,二级侧支循环在缺血发生后需经历一定时间以实现代偿;三级侧支循环则是在脑缺血后诱导新生血管的形成,根据 Wang 等[12]研究发现这一代偿过程需耗时 3~4 天,目的是增加侧支血管的数量,进而提升缺血区域的灌注水平。

4. 脑卒中相关影像检查方法

鉴于脑卒中在发病初期往往缺乏显著的临床表现,早期诊断对于影像学检查的依赖性显得尤为关键。在急性脑卒中的诊断过程中,对可逆性缺血脑组织,以及潜在的救助区域(penumbra)的评估,必须借助于影像学技术,包括 CT 灌注成像(CTP)、CT 血管成像(CTA)、磁共振灌注加权成像(PWI)、磁共振血管造影(MRA)以及动脉自旋标记成像(ASL)等。

4.1. 动脉自旋标记成像(Arterial Spin Labeling, ASL)

ASL 是灌注加权成像(perfusion-weighted imaging, PWI)技术的一种,检查时运用血液作为标记示踪物

质, 无需外源性对比剂的介入。该技术能够实现对脑血流(cerebral blood flow, CBF)的无创性、定量测量, 从而降低了患者因对比剂注射可能遭受的不适或副作用, 具有较高的安全性。ASL 技术能够无创性地测定感兴趣脑区的 CBF 值, 相较于扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI), 在脑组织的灌注中有较高敏感性。特别是在急性脑卒中患者中, ASL 能够识别出 DWI 上显示正常的低灌注区域病灶[13]。然而, ASL 仅能提供 CBF 这一单一参数, 在急性期评估急性缺血性脑卒中梗死核心的准确性不及 DWI [14]。目前临床把 ASL 与 DWI 组合使用, 利用软件分析两组之间的“不匹配”, 判断缺血半暗带(ischemic penumbra, IP)的存在。

4.2. CT 灌注成像(CTP)

CTP 是一种经过注射对比剂后进行 CT 动态扫描方法, 通过对扫描后一系列图像及数据进行后处理并计算感兴趣区的灌注情况。CTP 扫描时将对比剂注入后, 人体各个器官组织密度升高然后逐渐降低, 使用工作站脑灌注软件计算并经过处理灌注扫描获得图像, 输入动静脉, 选择大脑前动脉及上矢状窦, 得到脑血容量 CBV、脑血流量 CBF、平均通过时间 MTT、达峰时间 TTP 伪彩图, 利用这些参数对器官组织的灌注状态评估。Murphy 等[15]的研究揭示了脑梗死患者在有症状侧与无症状侧大脑半球之间, 脑血容量(CBV)、脑血流量(CBF)以及平均通过时间(MTT)存在显著差异。其中, MTT 显示出较高的敏感性, 而 CBF 和 CBV 在确定梗死的特异性方面具有更高的价值。基于 Tmax 值计算得出的低灌注强度比值(Hypoperfusion intensity ratio, HIR)在治疗效果的定量预测方面展现出较高的灵敏度。HIR 能够反映卒中患者的病情严重程度、预测功能预后, 并评估患者是否适合进行动脉取栓治疗[16] [17]。 $HIR = T_{max} > 10$ s 体积/ $T_{max} > 6$ s 体积。 $HIR < 0.4$ 为侧支循环丰富, $HIR \geq 0.4$ 为侧支循环不丰富[18]。周振寿等[19]研究发现 HIR 及低灌注区 rCBF、rCBV、rTmax 对患者预后预测的 AUG、最佳截断值、灵敏度、特异度等数据良好。充分表明 CT 灌注成像低灌注参数, 尤其是 HIR 值对急性脑梗死患者预后有较大预测价值, 究其原因在于 HIR 及低灌注区相关参数能准确区分脑梗死区域不同程度的缺血情况, 为判断患者预后提供量化指标, 从而为后续诊疗方案的制定提供重要参考依据。AIS 急诊患者检查依从性低, CTP 扫描常出现运动伪影, 图像质量不佳则影响数据测量, 而 CTP 原始图能规避运动伪影, 更真实反映出灌注情况。对于超时间窗或大血管闭塞的患者在急诊检查中进行 CTP 检查, 则可能在临床治疗中受益。有研究表明[20] [21] AIS 治疗时间窗可延长至发病后 24 h 内, 这一重大变化使得影像科医生能更多从影像学方面评估缺血半暗带区, 为寻找可逆性措施恢复缺血半暗带区脑功能提供可能。

4.3. PWI

PWI 主要运用顺磁性对比剂动态增强, PWI 脑灌注成像主要用首过灌注成像方法, 通过静脉快速团注顺磁性对比剂 GD-DTPA 后立即进行快速 MR 扫描。GD-DTPA 带有较多不成对电子, 在首过灌注时会使得局部磁场不均匀, 进而使周围组织的 T2(横向弛豫时间)缩短, 因磁化率效应使组织信号下降, 从而使 T2*加权图像上达到负性增强, 增强后在相应的 T2WI 或 T2*WI 上的信号会一过性降低[22], 信号降低程度与局部对比剂浓度成正比。根据对比剂首次流经组织时引起磁共振信号强度的变化计算出组织 T2*弛豫率变化, 即可得到组织对比剂浓度曲线, 根据非弥散标记物动力学理论[23], 可以计算出脑血容量(cerebral blood volume, CBV)。通过血流动力学模型, 还可得到组织血流灌注信息, 如血流量(cerebral blood flow, CBF)、平均通过时间(mean transit time, MTT)等。通过测量局部脑区域的信号改变就可以得到血流动力学参数来描述局部微循环信息。

4.4. MRA

时间飞跃(Time of Flight, TOF)法、相位对比(Phase Contrast, PC)法以及流入成像(Inflow)法血管成像技

术原始图像及三维重建技术可以有效显示动脉血管的形态、走行以及血管变异等，特别是对于颅内大血管及其主要血管分支的正常形态、血管闭塞、血管狭窄以及脑血管畸形等显示效果较好。磁共振血管成像(MRA)技术最初包括时间飞跃法和相位对比法两种，它们均依赖于血液的固有特性和流动特性[24]-[27]。血液流动的模式直接决定了 MRA 图像的质量。TOF MRA 成像技术基于流入感兴趣区域的自旋纵向磁化标记，主要通过弛豫、反转或减影技术来实现血管对比度的增强[28]-[33]。MRA 技术图像可以提供可重复的质量较高的血管图像，可用于血流动力学测定及多种脑血管畸形成像，从而获得关键的诊断信息。TOF MRA 技术目前最大的优点为简便、快捷，而 PC MRA 技术的优点在定量分析血流速度、血流方向及血流量方面。两种血管扫描技术的互补和联合应用。可以最大程度为诊断提供信息，为诊断和治疗方案提供更为充分依据。

4.5. CT 血管成像(CTA)

CT 血管成像(CTA)作为非对比增强计算机断层扫描(NCCT)的后续检查手段，具备广泛的扫描范围和较短的扫描时间等显著优势，尤其在评估血管狭窄程度方面表现出色。CTA 在评估责任血管病变程度方面能够为临床治疗策略提供有力的证据支持[34]。该技术能够全面展示血管的形态结构，并且其空间分辨率相较于其他扫描技术有所提升。研究报道指出，在显示责任血管闭塞方面，CTA 的灵敏度接近 100%，准确度超过 90% [35]。除了对血管闭塞程度的评估，CTA 在判断动脉粥样硬化斑块的安全性方面也具有较高的价值，并且能够准确地诊断血管夹层、畸形等血管相关疾病[36]。在急性缺血性卒中(AIS)后，侧支循环代偿情况对于治疗策略的选择至关重要。研究表明[37]，通过 CTA 及时评估侧支循环的建立情况，有助于临床及时采取有效措施挽救可逆损伤的组织。与数字减影血管造影(DSA)相比，CTA 在对血管进行刺激时引发的检查相关不良反应较少，因此更为安全可靠。然而，越来越多的研究发现，CTA 与计算机断层扫描灌注成像(CTP)联合扫描能够提供更为精确的评估价值，有效弥补了血流灌注随时间变化的不足[38]。

5. 目前的治疗方法

当前治疗方法在脑卒中的急性期是实现神经功能恢复的关键环节，从而减少长期残疾和死亡风险。针对急性缺血性脑卒中，临床治疗基本框架主要依据脑缺血区域血流的恢复情况和对非活性脑区的评估。在这一框架下，动脉机械取栓(Mechanical Thrombectomy, MT)和血管内治疗(Endovascular Treatment, EVT)成为重要的治疗手段。MT 通过使用导管和机械装置直接移除血栓，而 EVT 则可能包括使用药物溶栓剂或机械装置来恢复血流。这些方法的有效性在很大程度上依赖于影像学评估，特别是 CTA 和 CTP 的联合应用，它们能够提供关于血管闭塞和侧支循环状态的详细信息，从而指导治疗决策。随着技术的进步，这些治疗方法的适应症和成功率正在不断提高，为患者提供了更多的治疗选择和更好的预后。

5.1. 静脉溶栓治疗(Intravenous Thrombolysis, IVT)

目前 IVT 是国际公认的用于急性期缺血性脑卒中最有效的治疗方式之一，使用组织型纤溶酶原激活剂(tissue-type plasminogen activator, tPA)进行治疗可有效改善患者的临床预后。但 IVT 的时间窗窄限于发病后 4.5 小时内，超出时间窗的患者不能从中受益，并且存在出血转化的风险[39]。为了扩大治疗窗口并降低出血风险，研究者们正在探索新的溶栓药物和治疗策略。例如，使用更特异性的溶栓剂，如单链尿激酶型纤溶酶原激活剂(scu-PA)或重组组织型纤溶酶原激活剂(rt-PA)的变体，这些药物可能具有更长的有效时间窗和更低的出血风险。此外，联合使用抗血小板药物或抗凝药物，以及在影像学指导下进行个体化治疗，也被认为是提高 IVT 疗效和安全性的潜在途径。

5.2. 动脉机械取栓(Mechanical Thrombectomy, MT)

MT 是通过微创手术方式,直接从脑血管中取出或破碎阻塞的血栓,迅速恢复血管通畅,近年来已成为缺血性脑卒中急性期治疗的新兴方法,尤其是对大血管闭塞患者。MT 的治疗时间窗相对更宽,可达到发病后 6 小时乃至更长。此外,影像学技术如 CTA 和 MRA 在术前评估和术中导航中发挥着重要作用,它们能够精确地定位血栓位置,指导取栓装置的放置,从而提高手术成功率。

5.3. 血管内治疗(Endovascular Treatment, EVT)

血管内治疗技术(EVT)展现出较高的血管再通率,相较于接受最佳药物治疗的患者群体,EVT 在显著改善临床预后及提高存活率方面具有明显优势[40]。有研究指出[41],尽管血管内治疗能够降低大面积脑梗死(MBE)的发生率,MBE 依然是影响患者预后的一个关键因素。因此,对于 MBE 的早期预测和及时干预策略一直是临床研究的焦点。在治疗的综合管理方面,血压的精准控制、血糖的严格管理以及脂质代谢的优化调节是提升脑卒中患者长期预后的关键因素。此外,康复治疗在脑卒中后期治疗中扮演着越来越重要的角色,涉及物理治疗、职业治疗、言语治疗等多学科合作,这些治疗手段有助于患者生活质量的提升和社交功能的恢复。

6. 总结与展望

最新研究聚焦于将 3D-ASL 与 CTP 的参数结合,通过细致描绘侧支循环的血流和微血管状态,形成更复杂的侧支评分系统,低灌注指数比(HIR)旨在提高对侧支循环功能的量化和评估精准度。有研究把 HIR 用于预测卒中治疗后预后良好性,在预后预测方面具有很高的灵敏度和特异性,能为脑卒中患者提供个性化的治疗选择和干预时机,这对于实现脑卒中后的最优化恢复具有重要的临床意义[42]。值得指出的是,尽管侧支循环的评估对预后具有指导意义,但治疗策略的最终决策仍需综合患者的整体状况、脑梗死体积、发病时间窗等多个因素。随着计算机对于图像的分析以及模型构建的迅速发展,人工智能(artificial intelligence, AI)在影像领域得到了广泛的应用。Alberta 卒中项目早期 CT 评分(ASPECTS)是一种可以根据 CT 平扫来评估 AIS 患者早期征象,辅助临床医生制定治疗方案的评分标准。近年来,由于 ASPECTS 易受多种因素(如病人个体因素、评估者经验以及 CT 扫描质量)影响,国内外研发了多个 ASPECTS 自动分析软件,如法国的 Olea 公司与英国 Brainomix 公司共同开发的 e-ASPECTS 以及国内公司(数坤科技)开发的数字-脑 ASPECTS 智能分析系统,均可通过 AI 自动计算 CT 值,从而得到 ASPECTS 结果。Herweh 等[43]研究对比了 e-ASPECTS 和影像医生二者对于脑卒中 ASPECTS 的评分效果,发现 AI 软件与专家评估的准确度无显著差异。传统的根据脑血流量(CBF)、脑血容量(CBV)定性评估梗死核心的方法虽然简便快捷,但主观性强,无法定量评估。RAPID 自动化影像处理平台通过对 CT 及 MR 灌注数据自动上传、计算、分析,最后得出结果,较传统定性评估方法快捷、精准。已有研究[20][21]应用 RAPID 自动化分析软件,结合各种评价指标筛选出可进行血管内治疗的 AIS 病人。随着影像技术与人工智能(AI)相结合以及新评分标准的应用,未来有望逐步实现对急性缺血性脑卒中患者更为细致和动态的监测,进一步深化我们对侧支循环在脑卒中预后中的作用认识,指导临床实现更高效的治疗方案。

基金项目

内蒙古自治区卫生健康科技计划项目(编号: 202201479)省级。

参考文献

- [1] Campbell, B.C., Christensen, S., Tress, B.M., Churilov, L., Desmond, P.M., Parsons, M.W., *et al.* (2013) Failure of

- Collateral Blood Flow Is Associated with Infarct Growth in Ischemic Stroke. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, **33**, 1168-1172. <https://doi.org/10.1038/jcbfm.2013.77>
- [2] Ravindran, A.V., Killingsworth, M.C. and Bhaskar, S. (2020) Cerebral Collaterals in Acute Ischaemia: Implications for Acute Ischaemic Stroke Patients Receiving Reperfusion Therapy. *European Journal of Neuroscience*, **53**, 1238-1261. <https://doi.org/10.1111/ejn.14955>
 - [3] Chen, L.H., Spagnolo-Allende, A., Yang, D., Qiao, Y. and Gutierrez, J. (2024) Epidemiology, Pathophysiology, and Imaging of Atherosclerotic Intracranial Disease. *Stroke*, **55**, 311-323. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.123.043630>
 - [4] López-Cancio, E., Matheus, M.G., Romano, J.G., Liebeskind, D.S., Prabhakaran, S., Turan, T.N., *et al.* (2014) Infarct Patterns, Collaterals and Likely Causative Mechanisms of Stroke in Symptomatic Intracranial Atherosclerosis. *Cerebrovascular Diseases*, **37**, 417-422. <https://doi.org/10.1159/000362922>
 - [5] Wang, Y., Lu, Z., Sun, S., Yang, Y., Zhang, B., Kang, Z., *et al.* (2016) Risk Factors, Topographic Patterns and Mechanism Analysis of Intracranial Atherosclerotic Stenosis Ischemic Stroke. *International Journal of Neuroscience*, **127**, 267-275. <https://doi.org/10.1080/00207454.2016.1188298>
 - [6] Ha, S.H., Chang, J.Y., Lee, S.H., Lee, K.M., Heo, S.H., Chang, D., *et al.* (2021) Mechanism of Stroke According to the Severity and Location of Atherosclerotic Middle Cerebral Artery Disease. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **30**, Article ID: 105503. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105503>
 - [7] Wong, K.S., Caplan, L.R. and Kim, J.S. (2016) Stroke Mechanisms. In: Kim, J.S. and Caplan, L.R., Eds., *Frontiers of Neurology and Neuroscience*, S. Karger AG, 58-71. <https://doi.org/10.1159/000448302>
 - [8] Gao, S., Wang, Y.J., Xu, A.D., Li, Y.S. and Wang, D.Z. (2011) Chinese Ischemic Stroke Subclassification. *Frontiers in Neurology*, **2**, Article 6. <https://doi.org/10.3389/fneur.2011.00006>
 - [9] Mokli, Y., Pfaff, J., dos Santos, D.P., Herweh, C. and Nagel, S. (2019) Computer-aided Imaging Analysis in Acute Ischemic Stroke—Background and Clinical Applications. *Neurological Research and Practice*, **1**, Article No. 23. <https://doi.org/10.1186/s42466-019-0028-y>
 - [10] Buschmann, I. and Schaper, W. (2000) The Pathophysiology of the Collateral Circulation (Arteriogenesis). *The Journal of Pathology*, **190**, 338-342. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9896\(200002\)190:3<338::aid-path594>3.0.co;2-7](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9896(200002)190:3<338::aid-path594>3.0.co;2-7)
 - [11] Sheth, S.A., Sanossian, N., Hao, Q., Starkman, S., Ali, L.K., Kim, D., *et al.* (2014) Collateral Flow as Causative of Good Outcomes in Endovascular Stroke Therapy. *Journal of NeuroInterventional Surgery*, **8**, 2-7. <https://doi.org/10.1136/neurintsurg-2014-011438>
 - [12] Wang, W., Jiang, B., Sun, H., Ru, X., Sun, D., Wang, L., *et al.* (2017) Prevalence, Incidence, and Mortality of Stroke in China: Results from a Nationwide Population-Based Survey of 480 687 Adults. *Circulation*, **135**, 759-771. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.116.025250>
 - [13] Zaharchuk, G. (2011) Arterial Spin Label Imaging of Acute Ischemic Stroke and Transient Ischemic Attack. *Neuroimaging Clinics of North America*, **21**, 285-301. <https://doi.org/10.1016/j.nic.2011.01.003>
 - [14] Bivard, A., Krishnamurthy, V., Stanwell, P., Levi, C., Spratt, N.J., Davis, S., *et al.* (2014) Arterial Spin Labeling versus Bolus-Tracking Perfusion in Hyperacute Stroke. *Stroke*, **45**, 127-133. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.113.003218>
 - [15] Murphy, B.D., Fox, A.J., Lee, D.H., Sahlas, D.J., Black, S.E., Hogan, M.J., *et al.* (2008) White Matter Thresholds for Ischemic Penumbra and Infarct Core in Patients with Acute Stroke: CT Perfusion Study. *Radiology*, **247**, 818-825. <https://doi.org/10.1148/radiol.2473070551>
 - [16] Guenego, A., Mlynash, M., Christensen, S., Kemp, S., Heit, J.J., Lansberg, M.G., *et al.* (2018) Hypoperfusion Ratio Predicts Infarct Growth during Transfer for Thrombectomy. *Annals of Neurology*, **84**, 616-620. <https://doi.org/10.1002/ana.25320>
 - [17] Rao, V.L., Mlynash, M., Christensen, S., Yennu, A., Kemp, S., Zaharchuk, G., *et al.* (2020) Collateral Status Contributes to Differences between Observed and Predicted 24-H Infarct Volumes in DEFUSE 3. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, **40**, 1966-1974. <https://doi.org/10.1177/0271678x20918816>
 - [18] Guenego, A., Fahed, R., Albers, G.W., Kuraitis, G., Sussman, E.S., Martin, B.W., *et al.* (2020) Hypoperfusion Intensity Ratio Correlates with Angiographic Collaterals in Acute Ischaemic Stroke with M1 Occlusion. *European Journal of Neurology*, **27**, 864-870. <https://doi.org/10.1111/ene.14181>
 - [19] 周振寿, 叶成斌, 何岩燕, 等. CT灌注成像低灌注强度比值对急性脑梗死预后预测价值[J]. 中华灾害救援医学, 2024, 11(9): 1034-1037.
 - [20] Albers, G.W., Marks, M.P., Kemp, S., Christensen, S., Tsai, J.P., Ortega-Gutierrez, S., *et al.* (2018) Thrombectomy for Stroke at 6 to 16 Hours with Selection by Perfusion Imaging. *New England Journal of Medicine*, **378**, 708-718. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1713973>
 - [21] Nogueira, R.G., Jadhav, A.P., Haussen, D.C., *et al.* (2018) Thrombectomy 6 to 24 Hours after Stroke with a Mismatch between Deficit and Infarct. *The New England Journal of Medicine*, **378**, 11-21.

- [22] Rosen, B.R., Belliveau, J.W., Buchbinder, B.R., McKinstry, R.C., Porkka, L.M., Kennedy, D.N., *et al.* (1991) Contrast Agents and Cerebral Hemodynamics. *Magnetic Resonance in Medicine*, **19**, 285-292. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910190216>
- [23] Østergaard, L., Weisskoff, R.M., Chesler, D.A., Gyldensted, C. and Rosen, B.R. (1996) High Resolution Measurement of Cerebral Blood Flow Using Intravascular Tracer Bolus Passages. Part I: Mathematical Approach and Statistical Analysis. *Magnetic Resonance in Medicine*, **36**, 715-725. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910360510>
- [24] Graves, M.J. (1997) Magnetic Resonance Angiography. *The British Journal of Radiology*, **70**, 6-28. <https://doi.org/10.1259/bjr.70.829.9059290>
- [25] Dumoulin, C.L., Souza, S.P. and Hart, H.R. (1987) Rapid Scan Magnetic Resonance Angiography. *Magnetic Resonance in Medicine*, **5**, 238-245. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910050304>
- [26] Wehrli, F.W., Shimakawa, A., Gullberg, G.T. and MacFall, J.R. (1986) Time-of-Flight MR Flow Imaging: Selective Saturation Recovery with Gradient Refocusing. *Radiology*, **160**, 781-785. <https://doi.org/10.1148/radiology.160.3.3526407>
- [27] Gullberg, G.T., Wehrli, F.W., Shimakawa, A. and Simons, M.A. (1987) MR Vascular Imaging with a Fast Gradient Refocusing Pulse Sequence and Reformatted Images from Transaxial Sections. *Radiology*, **165**, 241-246. <https://doi.org/10.1148/radiology.165.1.3628776>
- [28] Dixon, W.T., Du, L.N., Faul, D.D., Gado, M. and Rossnick, S. (1986) Projection Angiograms of Blood Labeled by Adiabatic Fast Passage. *Magnetic Resonance in Medicine*, **3**, 454-462. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910030311>
- [29] Sardashti, M., Schwartzberg, D.G., Stomp, G.P. and Dixon, W.T. (1990) Spin-Labeling Angiography of the Carotids by Presaturation and Simplified Adiabatic Inversion. *Magnetic Resonance in Medicine*, **15**, 192-200. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910150203>
- [30] Qin, Q., Shin, T., Schär, M., Guo, H., Chen, H. and Qiao, Y. (2015) Velocity-Selective Magnetization-Prepared Non-contrast-Enhanced Cerebral MR Angiography at 3 Tesla: Improved Immunity to B0/B1 Inhomogeneity. *Magnetic Resonance in Medicine*, **75**, 1232-1241. <https://doi.org/10.1002/mrm.25764>
- [31] Nishimura, D.G., Macovski, A., Pauly, J.M. and Conolly, S.M. (1987) MR Angiography by Selective Inversion Recovery. *Magnetic Resonance in Medicine*, **4**, 193-202. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910040214>
- [32] Wallner, B., Weidenmaier, W., Vogel, J. and Bargon, G. (1991) Darstellung zerebraler Flußdynamik mit MR-Angiographie Und Selektiver Vorsättigung: Erste Erfahrungen. *RöFo—Fortschritte Auf Dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der Bildgebenden Verfahren*, **155**, 460-464. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1033296>
- [33] Heiss, S.G., Shifrin, R.Y. and Sommer, F.G. (2000) Contrast-enhanced Three-Dimensional Fast Spoiled Gradient-Echo Renal MR Imaging: Evaluation of Vascular and Nonvascular Disease. *RadioGraphics*, **20**, 1341-1352. <https://doi.org/10.1148/radiographics.20.5.g00se251341>
- [34] Cao, R., Qi, P., Jiang, Y., Hu, S., Ye, G., Zhu, Y., *et al.* (2021) Preliminary Application of a Quantitative Collateral Assessment Method in Acute Ischemic Stroke Patients with Endovascular Treatments: A Single-Center Study. *Frontiers in Neurology*, **12**, Article 714313. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.714313>
- [35] Wang, Z., Xie, J., Tang, T., Zeng, C., Zhang, Y., Zhao, Z., *et al.* (2020) Collateral Status at Single-Phase and Multiphase CT Angiography versus CT Perfusion for Outcome Prediction in Anterior Circulation Acute Ischemic Stroke. *Radiology*, **296**, 393-400. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020192029>
- [36] Vilela, P. and Rowley, H.A. (2017) Brain Ischemia: CT and MRI Techniques in Acute Ischemic Stroke. *European Journal of Radiology*, **96**, 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.08.014>
- [37] Roach, B.A., Donahue, M.J., Davis, L.T., Faraco, C.C., Arteaga, D., Chen, S., *et al.* (2016) Interrogating the Functional Correlates of Collateralization in Patients with Intracranial Stenosis Using Multimodal Hemodynamic Imaging. *American Journal of Neuroradiology*, **37**, 1132-1138. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a4758>
- [38] Prasetya, H., Tolhuisen, M.L., Koopman, M.S., Kappelhof, M., Meijer, F.J.A., Yo, L.S.F., *et al.* (2022) Value of CT Perfusion for Collateral Status Assessment in Patients with Acute Ischemic Stroke. *Diagnostics*, **12**, Article 3014. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12123014>
- [39] Berge, E., Whiteley, W., Audebert, H., De Marchis, G., Fonseca, A.C., Padiglioni, C., *et al.* (2021) European Stroke Organisation (ESO) Guidelines on Intravenous Thrombolysis for Acute Ischaemic Stroke. *European Stroke Journal*, **6**, I-LXII. <https://doi.org/10.1177/2396987321989865>
- [40] Qureshi, A.I., Ishfaq, M.F., Rahman, H.A. and Thomas, A.P. (2016) Endovascular Treatment versus Best Medical Treatment in Patients with Acute Ischemic Stroke: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *American Journal of Neuroradiology*, **37**, 1068-1073. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a4775>
- [41] Fuhrer, H., Schönenberger, S., Niesen, W., Seide, S., Meyne, J., Gerner, S.T., *et al.* (2020) Correction To: Endovascular Stroke Treatment's Impact on Malignant Type of Edema (Estimate). *Journal of Neurology*, **267**, 2481-2481. <https://doi.org/10.1007/s00415-020-09828-x>

-
- [42] Tsui, B., Chen, I.E., Nour, M., Kihira, S., Tavakkol, E., Polson, J., *et al.* (2023) Perfusion Collateral Index versus Hypoperfusion Intensity Ratio in Assessment of Collaterals in Patients with Acute Ischemic Stroke. *American Journal of Neuroradiology*, **44**, 1249-1255. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a8002>
- [43] Herweh, C., Ringleb, P.A., Rauch, G., Gerry, S., Behrens, L., Möhlenbruch, M., *et al.* (2016) Performance of E-Aspects Software in Comparison to That of Stroke Physicians on Assessing CT Scans of Acute Ischemic Stroke Patients. *International Journal of Stroke*, **11**, 438-445. <https://doi.org/10.1177/1747493016632244>