

论 著

ASL成像预测亚急性缺血性脑卒中后早期神经功能改善的临床价值*

孙美荣^{1,2} 张爱娟³ 苏春秋¹
张 堉¹ 王 悦¹ 鲁珊珊^{1,*}

1.南京医科大学第一附属医院放射科

(江苏 南京 210029)

2.江苏省省级机关医院放射科

(江苏 南京 210024)

3.南京医科大学附属江宁医院医学影像科

(江苏 南京 211100)

【摘要】目的 采用ASL探讨亚急性缺血性脑卒中患者ENI相关的临床及影像学标志物。**方法** 回顾性纳入48例入院NHSS \geq 6分的亚急性缺血性脑卒中患者,对比分析ENI与非ENI两组各项指标,采用多因素Logistic回归探讨ENI相关的临床及影像学指标,并进行ROC曲线分析。**结果** 对比非ENI组,ENI组ASL灌注良好者比例更高(75% vs 15%, $P=0.007$),高血压比例更低(64.3% vs 95%, $P=0.013$)。多因素分析结果显示,良好灌注为ENI独立影像学预测指标($OR=3.526$; 95% CI: 1.377~9.025, $P=0.009$),而高血压为ENI独立危险因素($OR=0.283$; 95% CI: 0.102~0.782, $P=0.015$),两者联合预测ENI的ROC曲线下面积为0.854(95% CI: 0.749~0.968),敏感度75%,特异度85%。**结论** 梗死区良好灌注状态与亚急性缺血性脑卒中患者获得ENI密切相关。ASL良好灌注与高血压联合可有效预测此类患者治疗后早期神经功能改善。

【关键词】 动脉自旋标记; 灌注; 缺血性脑卒中; 早期神经功能改善; 高血压; 临床预后

【中图分类号】R322.81

【文献标识码】A

【基金项目】国家自然科学基金(82171907)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.02.001

Clinical Value of ASL in Predicting Early Neurological Improvement after Subacute Ischemia Stroke*

SUN Mei-rong^{1,2}, ZHANG Ai-juan³, SU Chun-qiu¹, ZHANG Chi¹, WANG Yue¹, LU Shan-shan^{1,*}.

1.Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, Jiangsu Province, China

2.Department of Radiology, Jiangsu Province Official Hospital, Nanjing 210024, Jiangsu Province, China

3.Department of Radiology, the Affiliated Jiangning Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 211100, Jiangsu Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the clinical and imaging markers related to early neurological improvement (ENI) in patients with subacute ischemic stroke by arterial spin labeling (ASL) imaging. **Methods** We retrospectively enrolled 48 patients with subacute ischemic stroke and admission National Institute of Health Stroke Scale (NHSS) \geq 6. Compared and analyzed various indicators of the ENI and the non-ENI groups. Predictors of ENI were assessed by the multivariable logistic regression analysis and receiver operating characteristic (ROC) curves. **Results** Compared with patients without ENI, ENI patients showed a higher proportion of good perfusion on ASL (75% vs 15%, $P=0.007$) and a lower proportion of hypertension (64.3% vs 95%, $P=0.013$). Good perfusion on ASL ($OR=3.526$; 95% CI: 1.377~9.025, $P=0.009$) and hypertension ($OR=0.283$; 95% CI: 0.102~0.782, $P=0.015$) were independent predictors of ENI. The area under the ROC curve to predict ENI was 0.854 (95% CI: 0.749 to 0.968), with a sensitivity of 75% and a specificity of 85% by the combination of these two variables. **Conclusion** Good perfusion of infarction was closely associated with ENI in patients with subacute ischemic stroke. The combination of good perfusion on ASL and hypertension can effectively predicted ENI after treatment.

Keywords: Arterial Spin Labeling; Perfusion; Ischemic Stroke; Early Neurological Improvement; Hypertension; Prognosis

缺血性脑卒中是一种严重的脑血管疾病,是全球范围内致死及致残的主要原因之一^[1]。溶栓和取栓治疗目前是急性缺血性脑卒中(acute ischemic stroke, AIS)的一线治疗方案,但存在有限的治疗时间窗,如溶栓时间窗一般要求4.5h以内,取栓时间窗为小于24h^[2],超窗的大部分AIS患者则需要接受内科支持治疗。AIS患者治疗后临床预后不尽相同,部分患者治疗后缺血组织可获得良好的微循环再灌注,进而得到早期神经功能改善,然而少部分患者神经功能改善不明显,甚至出现神经功能恶化^[3]。

ASL(arterial spin labeling)灌注成像是一种利用血液中水分子作为内源性、可扩散示踪剂进行颅脑灌注成像的MRI技术,无需额外使用对比剂、无辐射,能够对脑组织血流灌注进行定量化评估,为缺血性脑卒中患者提供有效血流灌注信息^[4]。与CT灌注成像及动态磁敏感对比增强灌注成像等比较,它具有无创、无需对比剂、可重复性高并且能够实现脑血流量的半定量评估^[5-7],既往研究中发现缺血脑组织治疗后微循环再灌注状态与AIS患者神经功能预后相关^[8-10]。

本研究拟选取溶栓及取栓时间窗之外、接受内科标准化治疗的亚急性早期缺血性脑卒中患者,旨在通过ASL成像探讨与早期神经功能改善相关的临床及影像学标志物。

1 资料与方法

1.1 临床资料 本研究获得江苏省人民医院伦理委员会批准,豁免患者知情同意。回顾性从电子病例中收集2021年12月至2023年6月期间,于江苏省人民医院住院治疗的亚急性缺血性脑卒中患者。

纳入标准: (1)经神经内科医师确诊具有缺血性脑卒中症状及体征的患者,年龄 \geq 18岁; (2)梗死发病时间24小时-3天; (3)入院美国国立卫生研究院卒中量表(National Institutes of Health Stroke Scale, NIHSS)评分 \geq 6; (4)接受内科标准化支持治疗,包括阿司匹林、氯吡格雷的单独或联合用药、他汀类药物。(5)临床资料完整; (6)入院完成多模态MR成像,包括扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)、动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL)成像、三维时间飞跃磁共振脑血管造影(three-dimensional time-of-flight magnetic resonance angiography, 3D-TOF-MRA)、磁敏感加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)。排除标准: (1)合并脑部其他疾病者,如脑肿瘤、脑外伤、大面积软化灶等; (2)烟雾病、血管炎等其他原因或不明原因缺血性脑卒中; (3)随访资料缺失; (4)MR图像质量差,影像不能评估; (5)既往卒中伴有明显后遗症患者(modified rankin scale, mRS $>$ 2分)。

1.2 临床资料收集 收集患者临床资料,包括人口统计学特征(性别、年龄); 患者危险因素(高血压、高血脂、糖尿病、房颤史、吸烟史); 临床相关指标,包括卒中病因分

【第一作者】孙美荣,女,副主任技师,主要研究方向:神经系统影像磁共振技术。E-mail: cheersmr@163.com

【通讯作者】鲁珊珊,女,副主任医师,主要研究方向:中枢神经系统影像诊断。E-mail: lushan1118@163.com

型(Trial of Org 10172 in Acute Stroke Treatment, TOAST)、临床用药方式(单抗/双抗)、入院美国国立卫生研究院卒中量表(National Institutes of Health stroke scale, NIHSS)评分(NIHSS入院)、出院NIHSS评分(NIHSS出院),并计算NIHSS评分变化(Δ NIHSS=NIHSS出院-NIHSS入院)。早期神经功能改善(earlyneurological improvement, ENI)定义为出院时NIHSS评分较入院时减少 ≥ 4 分或完全性神经功能恢复(NIHSS 0分)^[11]。

1.3 图像采集 采用西门子(Skyra, Siemens Healthcare, Germany)及飞利浦(Ingenia CX, Philips Healthcare, Best, The Netherlands)3.0T MRI扫描仪,32通道头颅相控阵线圈。MRI具体扫描参数如下:(1)ASL成像:西门子MR,采用脉冲式ASL(pulsed ASL, PASL)序列,扫描参数:TR 4600 ms, TE 16.2 ms, TI 2500 ms, FOV 192 mm \times 192 mm, 矩阵 64 \times 64, 层数 40, 层厚 3 mm, 层间距:1mm, NSA: 1, 标记后延迟时间:2500ms, 扫描时间:3min45s; 飞利浦MR,采用EPIC-ASL采集,扫描参数为:TR 4550 ms, TE 16 ms, 翻转角90°, FOV 240 mm \times 240 mm, 矩阵128 \times 128, 层数16, 层厚5 mm, 层间距1 mm, 层间分辨率1.9 mm \times 1.9 mm, NSA 1, CS加速因子2.3, 标记后延迟时间 2500 ms, 扫描时间4 min 42 s。(2)DWI: TR 6400ms, TE 98 ms, b 值为 0/1000 mm²/s, FOV 230 mm \times 230 mm, 层厚 5 mm, 层间距 1mm。(3)3D-TOF-MRA: TR 22ms, TE 3.6 ms, FOV 210 mm \times 190 mm, 分辨率 0.55mm \times 0.55mm \times 0.55mm, 翻转角(FA) 18°。(4)SWI: TR 28 ms, TE 20 ms, 翻转角 15°, 层厚 2 mm, 层数48层, FOV 220 mm \times 220 mm, 矩阵 384 \times 307。

1.4 图像分析 (1)梗死体积测量:计算ADC图,基于ADC值 $< 620 \times 10^{-6}$ s/mm²采用自动化软件(NeubrainCARE, 东软医疗, 沈阳, 中国)进行DWI高信号梗死的分割及体积计算。

(2)梗死区出血转化评估:依据SWI评估DWI高信号梗死区内有无出血转化,进一步根据European Cooperative Acute Stroke Study (ECASS)分型,将出血分为出血性梗死(Hemorrhagic infarction, HI)和脑实质出血(Parachymal hematoma, PH),进一步分为HI-1:沿梗死边缘的见小点状出血灶;HI-2:梗死区内见片状出血,无占位效应;PH-1型:有血肿形成,占位效应轻,血肿 $<$ 梗死面积30%;PH-2型:血肿 $>$ 梗死面积30%,有明显占位效应,有远离梗死区的出血。

(3)脑组织灌注状态评估:将MRI图像导入Siemens工作站Syngo.via生成灌注加权图像。对ASL图像梗死区与对侧镜像区脑组织灌注状态进行定性评估,分为良好灌注组及低灌注组,良好灌注组为梗死区及周边灌注相较于对侧镜像区脑组织相等或增高;低灌注组为梗死区及周边灌注状态较对侧正常组织明显减低。

定性评估分别由两名工作5年及7年的神经影像医师进行独立评估,当两者存在不一致时,则由第三位高年资神经影像医师(工作14年)协助确认。

1.5 统计学分析 采用Shapiro-Wilk检验分析计量资料是否符合正态分布,符合正态分布者采用均数 \pm 标准差表示,不符合则采用中位数(四分位数间距)[M(25,75)]表示。计数资料采用频数及百分比表示。采用Cohen's kappa对梗死区灌注状态及出血转化情况的定性评估进行一致性检查。将ENI与非ENI两组的临床及影像学指标进行对比分析,计数资料采用卡方检验,计量资料采用独立样本T检验。进一步对ENI相关临床指标及灌注状态进行单因素Logistic回归分析,有统计学意义的数据则纳入多因素Logistic回归分析,进一步探讨与ENI相关的独立预测指标,计算OR(odds ratio)值及95%可信区间(confidence interval, CI),且采用受试者工作特征(receiver operating characteristic curve, ROC)曲线分析,计算曲线下面积(area under curve, AUC)以及Youden指数最高时对应的敏感度及特异度。采用SPSS 22.0软件(IBM, SPSS Statistics 22)进行统计学分析。检验水准 α 取0.05, P值均为双侧检验, P $<$ 0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般临床资料 本研究共纳入了48例亚急性缺血性脑卒中患者,其中男性31例(64.5%),平均年龄 67 ± 10.9 岁,住院时间为7-15天,中位数为12天。所有患者入院NIHSS评分中位数为8(7, 10),出院NIHSS评分中位数为4(2, 7)。出院时获得ENI者28例,占比(58.3%)。TOAST分型中大动脉型30例(62.5%),小动脉型14例(29.2%),心源性4例(8.3%)。梗死体积为 30.7 ± 33.9 mm³。

两名医师评估良好灌注及出血转化的kappa值分别为0.861及0.812。ASL梗死区呈良好灌注者24例(50.0%),出血转化23例(47.9%),其中HI-1型出血占比最高(13例, 27.1%)。所有入组患者的临床及影像学指标参见表1。

2.2 临床及影像学指标与ENI相关性 出院时28例患者获得ENI(58.3%)。同未获得ENI患者比较,两组间高血压、出院NIHSS、 Δ NIHSS、ASL良好灌注比例均具有统计学意义(P值均 $<$ 0.05)。ENI组高血压比例低于非ENI组(64.3% vs 95.0%),ASL良好灌注比例更高(75.0% vs 15.0%)。两组间性别、年龄、危险因素、入院NIHSS评分、TOAST分型、临床用药方式、出血转化及DWI梗死体积均无统计学意义(P值均 $>$ 0.05)。具体结果见表1。

表1 ENI组及非ENI组临床及影像学指标对比分析

临床指标	所有病人 (n=48)	ENI (n=28)	非ENI (n=20)	P值
性别(男性, n%)	31(64.5%)	18(64.2%)	13(65.0%)	0.602
年龄(岁)	67 \pm 10.9	65 \pm 11.5	67 \pm 10.1	0.790
危险因素(n%)				
高血压	37(77.0%)	18(64.3%)	19(95.0%)	0.013
高血脂	17(35.4%)	11(39.3%)	6(30.0%)	0.363
糖尿病	17(35.4%)	8(28.6%)	9(45.0%)	0.193
房颤	8(16.6%)	6(21.4%)	2(10.0%)	0.261
吸烟	20(41.6%)	12(42.9%)	8(40.0%)	0.540
NIHSS入院	8(7, 10)	8(8, 12)	8(6, 10)	0.321
NIHSS出院	4(2, 7)	2(1, 3)	7(5, 9)	$<$ 0.001
Δ NIHSS	-4(-7, -2)	-6(-9, -5)	-2(-3, 0)	$<$ 0.001
TOAST分型				0.205
大动脉粥样硬化型	30(62.5%)	16(57.1%)	14(70.0%)	
小动脉闭塞型	14(29.2%)	8(28.6%)	6(30.0%)	
心源性栓塞	4(8.3%)	4(14.3%)	0(0%)	
临床用药				0.241
单抗	31(64.5%)	20(71.5%)	11(55.0%)	
双抗	17(35.5%)	8(28.5%)	9(45.0%)	
ASL良好灌注(n%)	24(50.0%)	21(75.0%)	3(15.0%)	0.007
出血转化(n%)	23(47.9%)	14(50.0%)	9(45.0%)	0.481
ECASS分型				0.741
HI-1	13(27.1%)	8(28.6%)	5(25.0%)	
HI-2	4(8.3%)	3(10.7%)	1(5.0%)	
PH-1	5(10.4%)	3(10.7%)	2(10.0%)	
PH-2	1(2.1%)	0(0)	1(5.0%)	
DWI梗死体积(cm ³)	15.3(6.1, 46.5)	14.7(5.8, 45.3)	25.0(6.1, 47.5)	0.544

注: ENI: early neurological improvement;

NIHSS: National Institutes of Health Stroke Scale;

TOAST: Trial of Org 10172 in Acute Stroke Treatment; ASL: arterial spin labeling

ECASS: European Cooperative Acute Stroke Study; DWI: Diffusion Weighted Imaging

2.3 ENI独立预测指标 将与ENI相关的临床及影像学指标进行单因素Logistic分析,进一步将有统计学意义的变量高血压、良好灌注纳入多因素Logistic回归分析,并校正性别、年龄、DWI梗死体积,结果显示:ASL良好灌注是预测ENI的有效影像学预测指标(OR=3.526; 95% CI: 1.377~9.025, P=0.009),而高血压为ENI的危险因素(OR=0.283; 95% CI: 0.102~0.782, P=0.015)(表2)。

ASL良好灌注预测ENI的AUC为0.800(95% CI: 0.668~0.932),敏感性和特异性分别为75.0%及85.0%。高血压预测ENI的AUC为0.654(95% CI: 0.500~0.808),敏感度为35.7%,特异度为95.0%。两者联合后AUC提高至0.854(95% CI: 0.749~0.968),敏感度为75%,特异度为85%。良好灌注组与低灌注组病例如图1、2所示。

表2 临床及影像学指标预测ENI的价值

	单因素分析		多因素分析	
	OR 95% CI	P值	OR 95% CI	P值
性别	(0.531,2.854)	0.628	(0.191,1.391)	0.191
年龄	(0.956,1.028)	0.644	(0.949,1.032)	0.633
高血压	(0.103,0.680)	0.006	(0.102,0.782)	0.015
良好灌注	(1.349,7.548)	0.008	(1.377,9.025)	0.009
DWI梗死体积	(0.992,1.022)	0.351	(0.994,1.026)	0.236

注: DWI: Diffusion Weighted Imaging

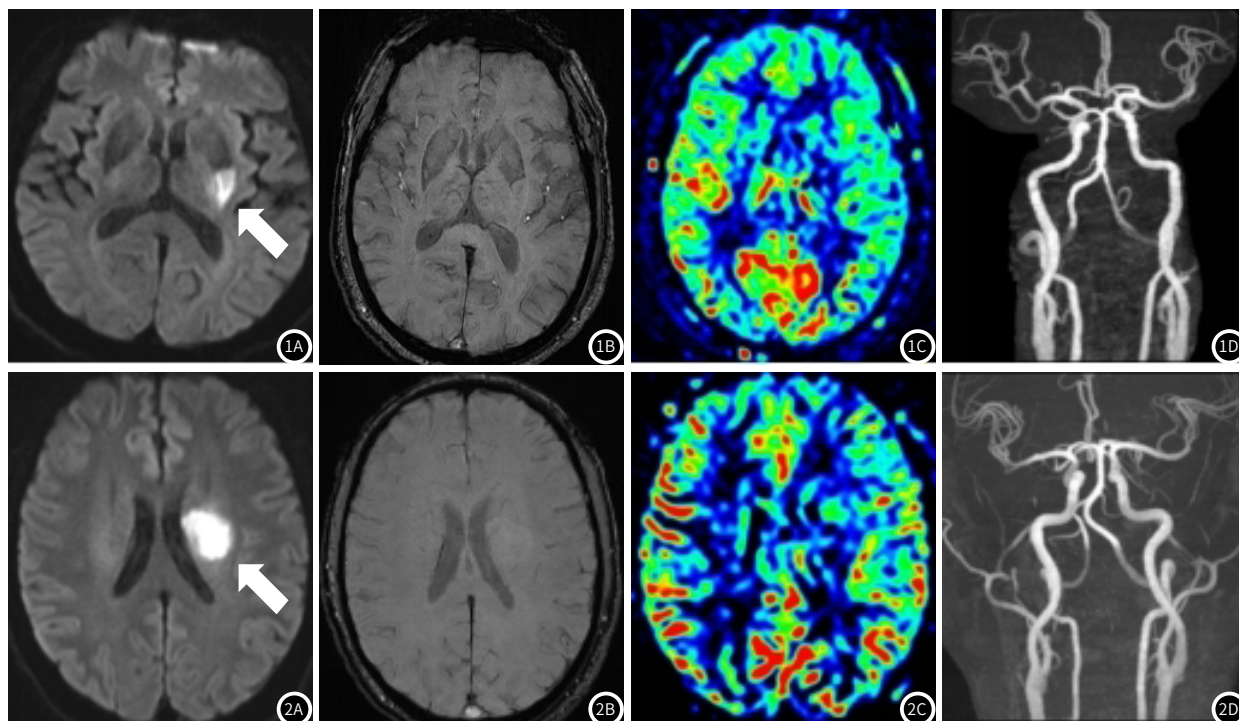


图1 图1A~1D 80岁男性,入院NIHSS 8分,出院NIHSS 7分,未获得早期神经功能改善。图1A(DWI)示左侧基底节区亚急性期脑梗死;图1B(SWI)示梗死区脑组织未见出血灶;图1C(ASL)示梗死区呈低灌注状态;图1D(TOF MRA)示颅内外大血管未见明显局灶性狭窄或闭塞。

图2 图2A~2D 60岁男性,入院NIHSS 10分,出院NIHSS 2分,获得早期神经功能改善。图2A(DWI)示左侧基底节区亚急性期脑梗死;图2B(SWI)示梗死区脑组织见斑点状出血灶;图2C(ASL)示梗死区呈高灌注状态;图2D(TOF MRA)示颅内外大血管未见明显局灶性狭窄或闭塞。

3 讨论

缺血性脑卒中致死和致残率高发,溶栓与取栓是AIS患者的一线治疗手段,但亚急性期脑梗死患者由于受到时间窗的限制,往往仅能接受内科治疗,治疗效果存在一定异质性。早期神经功能改善是AIS患者获得长期良好预后的重要预测因子。本研究结果表明:亚急性期脑梗死患者ASL良好灌注是患者获得ENI的独立预测指标,而高血压为ENI的危险因素。

3.1 ASL成像技术对ENI预测评估 临床中评估脑卒中患者脑组织灌注状态的传统检查方式包括CT灌注成像(CT perfusion, CTP)及磁共振动态磁敏感对比增强灌注成像(dynamic susceptibility contrast-perfusion weighted imaging, DSC-PWI),但其检查方式需使用碘或钆造影剂,可能会造成病人肾功能损害或发生过敏反应等,限制了临床的适用性及重复性。ASL灌注成像是一种利用血液中水分子作为内源性、可扩散示踪剂进行颅脑灌注成像的无创性MRI技术,在无需额外引入对比剂且无辐射,实现对脑组

织血流灌注的定量评估^[4]。相关研究指出,在脑卒中患者的脑灌注评估中,ASL与DSC-PWI结果具有较好的一致性^[12]。

梗死区域微循环灌注情况与患者的预后密切相关^[13-15]。Tobias^[12]文章中通过CT血管成像及CTP方式证实了良好的软脑膜动脉侧支及有效的组织再灌注与ENI相关,同时也验证了90天良好功能结局与较好的再灌注水平相关。Michael^[16]等人对大血管闭塞型脑卒中且接受了血管内治疗的AIS人群采用DSC-PWI成像,结果发现侧支评分良好的患者梗死区脑组织再灌注率更高,且相较于灌注差的患者,再灌注状态良好的患者功能结局良好。我们的研究结果显示:在获得ENI的患者中,良好灌注者占比75.0%,且梗死区良好灌注状态与患者获得ENI独立相关,这同既往研究结果一致。然而与他们研究不同的是,我们仅纳入了发病时间24小时~3天的亚急性期脑卒中患者,仅接受了标准化内科治疗,进一步扩展了ASL成像在缺血性脑卒中预后评估中的临

床价值。ASL梗死区高灌注的出现可能反映了局部微循环灌注的恢复,并与脑组织的自我调节能力相关^[17]。梗死治疗后,由于局部酸中毒的微环境不能马上恢复,毛细血管床开放并最大程度扩张,局部血流量代偿性增加,这种状态可以持续数天,而ASL对于显示高灌注,较DSC-PWI及PET成像更为敏感^[18]。既往有研究认为,这种高灌注容易伴随出血转化。但我们本组病例中,获取ENI的患者中ASL高灌注病例共21例(75.0%),其中出血转化者14例(66.7%),都是HI级出血,并未出现PH2级的出血转化,从而未对预后造成不良影响。

需要注意的是,ASL成像时需要根据患者的情况选择不同的标记后延迟时间(post-labeling delay, PLD)或翻转时间(TI)。ASL成像白皮书^[7]中指出成人的ASL成像PLD/TI常规选用2000ms,但针对不同病人需适当调整。由于本研究中大多数是老年人,多数存在动脉粥样硬化、血流变缓以及其他基础疾病,对于慢血流,采用短的TI可能无法采集到还未到达目标区域的灌注信号^[12,19]。为了更准确的评估梗死区微循环情况,本研究中我们采用TI值2500ms进行扫描。

3.2 ASL良好灌注联合高血压对ENI预测评估 另外,我们的研究发现,高血压是缺血性卒中患者不易获得ENI的危险因素。诸多研究表明^[20-23]在众多卒中相关危险因素中,高血压是最为常见的危险因素。Deepak等人^[24]的研究中发现对于缺血性脑卒中患者,高血压会导致梗死进展、出血转化或脑水肿加重等现象,细致的血压管理对防止发生神经系统恶化至关重要,这与我们的研究结果是一致的。另外在我们的研究中发现高血压和ASL良好灌注联合预测ENI的ROC曲线下面积为0.854,大于单因素独立预测能力。因此,积极促进亚急性缺血性脑卒中患者缺血区灌注恢复,同时密切关注并控制患者血压状况,可改善患者的早期神经功能结局,从而有利于远期神经功能良好预后。

3.3 本研究的局限性 本研究的不足:(1)本研究仅纳入入院NIHSS评分 ≥ 6 分的亚急性期梗死患者,样本量较少,今后需要多中心、更大的样本研究进一步评估ASL灌注在亚急性期梗死预后中的价值;(2)本研究未进行脑血流量CBF的绝对定量。采用pCASL(pseudo-continuous ASL)序列,并进行CBF的定量评估,可能更有利于给出定量阈值;(3)本研究中目前缺少对患者远期神经功能预后的随访(3个月 mRS评分量表),下一步研究中需要对所有患者进行随访,并评估ASL评估患者远期神经功能预后的价值。

4 结论

综上所述,采用延迟时间2.5s的ASL成像,可较好的评估脑组织微循环再灌注情况。梗死区良好灌注状态与亚急性期缺血性脑卒中患者ENI密切相关,ASL良好灌注与高血压可成为亚急性期缺血性脑卒中患者内科治疗后获得ENI的重要预测指标。

参考文献

[1] Krishnamurthi R V, Feigin V L, Forouzanfar M H, et al. Global and regional burden of first-ever ischaemic and haemorrhagic stroke during 1990-2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010[J]. *Lancet Glob Health*, 2013, 1(5): e259-281.

[2] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性缺血性卒中诊治指南2023[J]. *中华神经科杂志*, 2024, (6): 523-559.

[3] 王宁, 秦利, 孟剑, 等. 急性脑梗死静脉溶栓疗效的影响因素分析[J]. *罕少疾病杂志*, 2023, 30(9): 29-30.

[4] Telischak N A, Detre J A, Zaharchuk G. Arterial spin labeling MRI: clinical applications in the brain[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 41(5): 1165-1180.

[5] Göttinger J, Kaczmarz S, Kallmayer M, et al. Flow-metabolism uncoupling in patients with asymptomatic unilateral carotid artery stenosis assessed by multi-modal magnetic resonance imaging[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2019, 39(11): 2132-2143.

[6] Bambach S, Smith M, Morris P P, et al. Arterial spin labeling applications in pediatric and adult neurologic disorders[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 55(3): 698-719.

[7] Alsop D C, Detre J A, Golay X, et al. Recommended implementation of arterial spin-labeled perfusion MRI for clinical applications: a consensus of the ISMRM perfusion study group and the European consortium for ASL in dementia[J]. *Magn Reson Med*, 2015, 73(1): 102-116.

[8] Uniken Venema S M, Dankbaar J W, van der Lugt A, et al. Cerebral collateral circulation in the era of reperfusion therapies for acute ischemic stroke[J]. *Stroke*, 2022, 53(10): 3222-3234.

[9] Ginsberg M D. The cerebral collateral circulation: relevance to pathophysiology and treatment of stroke[J]. *Neuropharmacology*, 2018, 134(Pt B): 280-292.

[10] Alves H C, Pacheco F T, Rocha A J. Collateral blood vessels in acute ischemic stroke: a physiological window to predict future outcomes[J]. *Arq Neuropsiquiatr*, 2016, 74(8): 662-670.

[11] Lyden P D. Measuring outcome after stroke: more lessons learned again[J]. *Stroke*, 2020, 51(4): 1053-1054.

[12] 吴江, 朱丽娜, 牛衡, 等. 正常人3D-pCASL不同标记后延迟时间下脑血流量与年龄的相关性研究[J]. *临床放射学杂志*, 2018, 37(05): 738-742.

[13] Faizy T D, Mlynash M, Kabiri R, et al. Favourable arterial, tissue-level and venous collaterals correlate with early neurological improvement after successful thrombectomy treatment of acute ischaemic stroke[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2022.

[14] Dolotova D D, Blagosklonova E R, Muslimov R S, et al. Inter-rater reliability of collateral status assessment based on ct angiography: a retrospective study of middle cerebral artery ischaemic stroke[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(17).

[15] Binder N F, El Amki M, Glück C, et al. Leptomeningeal collaterals regulate reperfusion in ischemic stroke and rescue the brain from futile recanalization[J]. *Neuron*, 2024, 112(9): 1456-1472. e6.

[16] Marks M P, Lansberg M G, Mlynash M, et al. Effect of collateral blood flow on patients undergoing endovascular therapy for acute ischemic stroke[J]. *Stroke*, 2014, 45(4): 1035-1039.

[17] Leng X, Fang H, Leung T W, et al. Impact of collateral status on successful revascularization in endovascular treatment: a systematic review and meta-analysis[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2016, 41(1-2): 27-34.

[18] Marchal G, Young A R, Baron J C. Early postischemic hyperperfusion: pathophysiological insights from positron emission tomography[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 1999, 19(5): 467-482.

[19] Dai W, Fong T, Jones R N, et al. Effects of arterial transit delay on cerebral blood flow quantification using arterial spin labeling in an elderly cohort[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45(2): 472-481.

[20] Xia X, Yue W, Chao B, et al. Prevalence and risk factors of stroke in the elderly in Northern China: data from the National Stroke Screening Survey[J]. *J Neurol*, 2019, 266(6): 1449-1458.

[21] Xie X, Gu H Q, Wang X, et al. Assessing the applicability of 2017 ACC/AHA hypertension guidelines for secondary stroke prevention in the BOSS study[J]. *J Clin Hypertens (Greenwich)*, 2019, 21(10): 1534-1541.

[22] Dai L, Cheng A, Hao X, et al. Different contribution of SBP and DBP variability to vascular events in patients with stroke[J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2020, 5(2): 110-115.

[23] 罗春艳, 覃帮能. 青年急性脑梗死病因及危险因素分析[J]. *罕少疾病杂志*, 2023, 30(1): 26-28.

[24] Sharma D, Smith M. The intensive care management of acute ischaemic stroke[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2022, 28(2): 157-165.