

论 著

CTP低灌注指数比与ASL在缺血性脑卒中侧支循环中的研究*

李海娜^{1,*} 刘 军¹ 肖 寒²

1.呼和浩特市第一医院医学影像科

2.内蒙古医科大学(内蒙古 呼和浩特 010010)

【摘要】目的 探讨计算机断层扫描灌注成像(CTP)低灌注指数比(HIR)与动脉自旋标记灌注成像(ASL)在缺血性脑卒中(CIS)侧支循环中的关系。**方法** 选取2021年12月—2023年12月呼和浩特市第一医院收治的92例CIS患者为研究对象,常规治疗2周后均行计算机断层血管成像(CTA)、CTP、ASL及数字减影血管造影(DSA)检查,以DSA结果为诊断“金标准”,根据治疗2周后侧支循环评分,将患者分别纳入侧支良好组(55例)、侧支不良组(37例)。比较2组一般资料,比较ASL结果与CTA结果,比较2组CTP参数,受试者工作特征(ROC)曲线分析HIR对侧支不良的诊断价值,获取最佳截断值,ROC分析HIR对CIS患者预后的预测价值。**结果** ASL诊断CIS患者侧支不良灵敏度为90.73%、特异度为81.08%、准确度为88.04%、误诊率为18.92%、漏诊率为7.27%;侧支不良组rCBV、rCBF值低于侧支良好组,rMTT、Tmax、HIR值高于侧支良好组,差异有统计学意义($P<0.05$);ROC曲线显示,治疗2周后HIR值诊断CIS患者侧支不良的曲线下面积(AUC)为0.825(95%CI: 0.732-0.896),且HIR以最佳截断值为界对侧支不良的诊断灵敏度为94.55%、特异度为86.49%、准确度为91.30%、误诊率为13.51%、漏诊率为5.45%,与ASL诊断结果具有良好一致性(Kappa值: 0.930, 95%CI: 0.895-0.972);rCBV、rCBF值[(0.74±0.13) mL/100 g、(18.88±1.92) mL/min·100 g]低于预后良好患者,差异有统计学意义($P<0.05$);Logistic回归分析显示,校正后HIR是CIS患者预后不良的独立相关影响因素,差异有统计学意义($P<0.05$)。**结论** CTP HIR与ASL诊断CIS患者侧支不良结果具有良好一致性,且HIR对侧支不良及预后不良具有一定诊断及预测价值,可作为临床判断侧支状态、预测预后的辅助参数。

【关键词】 计算机断层扫描灌注成像; 动脉自旋标记灌注成像; 计算机断层血管成像; 低灌注指数比; 缺血性脑卒中; 侧支循环

【中图分类号】R743

【文献标识码】A

【基金项目】内蒙古自治区卫生健康科技计划项目(202201479)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.02.003

Study of CTP Low Perfusion Index Ratio and ASL in Collateral Circulation of Ischemic Stroke*

LI Hai-na^{1,*}, LIU Jun¹, XIAO Han².

1.Department of Medical Imaging, Huhhot First Hospital, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China

2.Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China

ABSTRACT

Objective To investigate the relationship between low perfusion index ratio (HIR) of computed tomography perfusion imaging (CTP) and arterial spin-labeled perfusion imaging (ASL) in collateral circulation of ischemic stroke (CIS). **Methods** Ninety-two CIS patients admitted to our hospital from December 2021 to December 2023 were selected as the study objects. Computed tomography angiography (CTA), CTP, ASL and digital subtraction angiography (DSA) were all examined 2 weeks after routine treatment, and DSA results were taken as the "gold standard" for diagnosis. According to the collateral circulation score after 2 weeks of treatment, the patients were included in the good collateral group (55 cases) and the poor collateral group (37 cases). General data of the two groups were compared, ASL results were compared with CTA results, and CTP parameters of the two groups were compared. Receiver operating characteristic (ROC) curve was used to analyze the diagnostic value of HIR for collateral malocclusion. Predictive value of HIR in CIS patients by ROC analysis. **Results** The sensitivity of ASL in the diagnosis of collateral malocclusion in CIS patients was 90.73%, the specificity was 81.08%, the accuracy was 88.04%, the misdiagnosis rate was 18.92%, and the missed diagnosis rate was 7.27%. The rCBV and rCBF values of the poor collateral group were lower than those of the good collateral group. rMTT, Tmax and HIR values were higher than those of good lateral rami group, and the difference was statistically significant ($P<0.05$). The ROC curve showed that the area under the curve (AUC) of HIR value for diagnosing collateral malocclusion in CIS patients after 2 weeks of treatment was 0.825 (95%CI: 0.732-0.896), and HIR with the best cut-off value as the boundary of the diagnosis of lateral malocclusion sensitivity was 94.55%, specificity was 86.49%, accuracy was 91.30%, misdiagnosis rate was 13.51%, missed diagnosis rate was 5.45%. There was good consistency with the diagnosis results of ASL (Kappa value: 0.930, 95%CI: 0.895~0.972). The difference was statistically significant ($P<0.05$). Logistic regression analysis showed that the adjusted HIR was an independent factor associated with poor prognosis in CIS patients, and the difference was statistically significant ($P<0.05$). ROC curve showed that after 2 weeks of treatment, the HIR value predicted the short-term poor prognosis of CIS patients with AUC 0.794 (95%CI: 0.697~0.871), the best diagnostic sensitivity was 82.61%, and the specificity was 62.32%. **Conclusion** There is good consistency between CTP HIR and ASL in the diagnosis of collateral malocclusion in CIS patients, and HIR has certain diagnostic and predictive value in the diagnosis and prognosis of collateral malocclusion and poor prognosis, and can be used as an auxiliary parameter in clinical judgment of collateral status and prognosis.

Keywords: Computed Tomography Perfusion Imaging; Arterial Spin-labeled Perfusion Imaging; Computed Tomography Angiography; Low Perfusion Index Ratio; Ischemic Stroke; Collateral Circulation

随着人们生活方式改变,缺血性脑卒中(CIS)发病人数呈逐年增多趋势,该病发病率、致残率、致死率均较高,严重危害患者生命健康^[1-2]。血管内血栓切除是当前临床治疗CIS的主要手段之一,可快速实现血管复通,但由于疾病异质性,部分患者治疗后可出现预后不良,甚至病死^[3-4]。侧支状态是影响CIS患者预后的关键,因此,早期判断侧支循环情况,并预测预后,以辅助临床及早实施干预,已成为当前临床研究热点之一。数字减影血管造影(DSA)、动脉自旋标记灌注成像(ASL)均是临床评估CIS侧支状态检查方式,尤以DSA为“金标准”,但DSA属侵入性检查,创伤大、风险高,而ASL检查尚未完全普及,临床应用均受一定限制^[5-6]。计算机断层扫描灌注成像(CTP)是脑卒中常用检查方式,但当前关于CTP低灌注指数比(HIR)在CIS侧支循环中临床研究,国内鲜有报道。因此,本研究尝试性探讨HIR对CIS侧支循环的诊断价值,及其预测预后价值。如下报道。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2021年12月至2023年12月呼和浩特市第一医院收治的92例CIS患者为研究对象,常规治疗2周后均行计算机断层血管成像(CTA)、CTP、ASL检查,以DSA结果为诊断“金标准”,根据治疗2周后美国介入和治疗神经放射学学会/介入放射学学会(ASITN/SIR)侧支循环评分,将患者分别纳入侧支良好组(55例)、侧支不良组(37例)。

纳入标准:(1)符合《中国缺血性脑卒中和短暂性脑缺血发作二级预防指南2014》^[7]标准;(2)首次确诊,发病12 h内入院;(3)均接受规范性治疗;(4)颈内动脉或大脑中动脉分支闭塞;(5)患者及家属自愿签署知情同意书。排除标准:(1)合并恶性病变;(2)入院前1个月内发生新冠肺炎等严重感染性疾病;(3)合并免疫系统病变;(4)合并脑血管畸形、脑肿瘤等其他脑部疾病;(5)合并大血管闭塞或大脑前动脉、大脑后动脉、后循环或多部位闭塞;(6)既往存在颅脑手术史、脑梗死病史;(7)无法或拒绝完成CTA、CTP、ASL检

【第一作者】李海娜,女,主任医师,主要研究方向:中枢神经影像MRI诊断。E-mail: lihaina1982@163.com

【通讯作者】李海娜

查及相关治疗者；(8)影像学图像不清晰；(9)合并精神、行为障碍，无法配合完成本研究方案。脱落标准：(1)自行退出本研究，或研究人员认为应退出者；(2)研究期间依从性差、发生严重过敏反应、突发其他重大疾病、随访期间失联或意外死亡者。侧支良好组：男性25例，女性30例；年龄50~68岁，平均(58.94±4.35)岁；发病至入院时间1~6 h，平均(3.57±0.79)h。侧支不良组：男性19例，女性18例；年龄49~70岁，平均(59.41±4.98)岁；发病至入院时间2~6 h，平均(3.82±0.87)h。对比两组基线资料，差异无统计学意义($P>0.05$)，具有可比性。本研究经我院医学伦理委员会批准(伦理审批号: IRB2021066-1.0)。

1.2 方法

1.2.1 资料收集 由2名研究组成员查阅我院电子病历系统采集患者临床常用资料，包含发病至入院时间、年龄、体质指数(BMI)、性别、高脂血症、糖尿病、吸烟史、饮酒史、高血压、遗传病史、肿瘤病史、美国国立卫生研究院卒中量表(NIHSS)评分、梗死面积等。

1.2.2 ASL检查 治疗2周后，采用GE360 1.5T磁共振设备(美国GE公司)进行DWI及3D-ASL序列扫描，3D-ASL以快速自旋回波的3D螺旋式采集为基础，设置扫描参数：脉冲重复时间：3000 s，回波时间：66 ms，矩阵：116×116，层厚：5mm，层间距：6 mm，视野：260 mm×260 mm。标记后延迟时间(PLD)分别为1.5 s及2.5 s，采集数据并在配套AW4.6工作站进行图像后处理，获取ASL灌注伪彩图，以PLD 1.5 s时显示低灌注，PLD 2.5 s时双侧灌注一致，为侧支循环良好，以PLD 1.5 s、2.5 s时均显示低灌注为侧支循环不良。

1.2.3 CTP、CTA检查 使用GE 64层宝石螺旋CT扫描仪(美国GE公司)摇篮技术，与ASL检查间隔6 h内给予CTP+CTA一站式检查。CTP扫描参数：电流370 mA，球管压79 kV，准直128 mm×0.625 mm，扫描周期为1.2 s，扫描速度0.4 转/s，层厚5 mm，层数25层，视野25 cm，矩阵512×512。建立肘静脉通道，注射40 mL碘造影剂，40 mL 0.9%生理盐水冲洗，注射速率5~6 mL/s。延时5 s后，连续采集25期灌注图像；CTP扫描完成5 min后继续进行CTA扫描，获取原始数据。将所有原始数据上传至工作站进行图像后处理，并使用配套软件重建影像，自动测算相对脑血容量(rCBV)、相对脑血流量(rCBF)、相对平均通过时间(rMTT)、脑血流达峰时间(Tmax)等参数值，并获得CTA头颈血管图像，于此基础上评估血管状态，计算 $HIR=(Tmax>10\text{ s体积})/(Tmax>6\text{ s体积})$ 。

1.2.4 DSA检查 应用改良Seldinger技术行股动脉穿刺、插管，置入8F动脉鞘，全脑血管造影，同时采用基于DSA的ASITN/SIR侧支循环评分，量化评估软脑膜侧支循环建立情况，评估标准：缺血区无侧支循环建立，0分；侧支代偿血流可缓慢到达缺血区周围，1分；代偿血流迅速到达部分缺血区，2分；代偿血流缓慢

到达全部缺血区，3分；代偿血流快速、完全到达全部缺血区，4分。以0~2分为侧支不良，以3~4分为侧支良好。92患者共分为侧支良好55例和侧支不良37例。

1.2.5 随访及预后评估标准 随访两组治疗3个月后预后情况，根据改良Rankin(mRS)评分评估预后，以mRS评分≤2分为预后良好，以mRS评分>2分为预后不良。92患者共分为预后良好69例和预后不良23例。

1.3 质量控制 信息调查小组成员均经统一培训并考核，信息采集完成后，随机抽取30%核查，确认无误后以双人形式录入、核对临床信息，以保障数据质量与结果可靠性，再进行统计学处理。影像学检查均使用同一台仪器，所有步骤由2名5年以上经验影像科医师协作完成，对有争议病例，需协商后给出一致结果。

1.4 统计学方法 应用SPSS 26.0软件分析，计量资料经方差齐性(Levene法)、正态分布(Kolmogorov-Smirnov法)检查，近似服从正态分布、方差齐性时以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示，行独立样本t检验，计数资料以n(%)表示，行 χ^2 检验，以DSA检查结果为诊断“金标准”，采用诊断四格表分析ASL、HIR对侧支不良的诊断价值，采用Logistic回归分析独立影响因素，受试者工作特征(ROC)曲线分析诊断及预测价值，曲线下面积(AUC)判断诊断、预测效能，通过Kappa指数分析HIR与ASL诊断侧支不良的一致性， $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 ASL检查对侧支不良的诊断价值 本研究92例CIS患者，常规治疗2周后均接受DSA检查，获取ASITN/SIR评分，共诊断侧支良好患者55例，侧支不良患者37例，以DSA检查结果为诊断“金标准”，以侧支不良为阳性，以侧支良好为阴性，ASL诊断真阳性51例，假阳性7例，假阴性4例，真阴性30例，诊断灵敏度为90.73%(51/55)、特异度为81.08%(30/37)、准确度为88.04%(81/92)、误诊率为18.92%(7/37)、漏诊率为7.27%(4/55)。见表1。

2.2 2组CTP参数比较 与侧支良好组相比，侧支不良组rCBV、rCBF值较低，rMTT、Tmax、HIR值较高，差异有统计学意义($P<0.05$)。见表2。

2.3 HIR对侧支不良的诊断价值 以侧支不良组为阳性样本，以侧支良好组为阴性样本，绘制ROC曲线，结果显示，治疗2周后HIR值诊断CIS患者侧支不良的AUC为0.825(95%CI: 0.732~0.896)，最佳截断值为0.46，最佳诊断敏感度为72.97%，特异度为81.82%。见图1。

表1 ASL结果与DSA检查结果(例)

ASL结果	DSA结果		合计
	阳性	阴性	
阳性	51	7	58
阴性	4	30	34
合计	55	37	92

表2 2组CTP参数比较

组别	n	rCBV(mL/100 g)	rCBF(mL/min·100 g)	rMTT(s)	Tmax(s)	HIR
侧支不良组	37	1.06±0.17	29.30±2.98	1.40±0.10	9.17±1.29	0.53±0.15
侧支良好组	55	1.28±0.24	36.51±4.79	1.26±0.07	7.98±1.16	0.32±0.10
t值		-4.818	-8.148	7.904	4.611	8.064
P值		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

2.4 以最佳截断值分析HIR对侧支不良的诊断价值 根据结果2.3获取HIR诊断侧支不良的最佳截断值，以>0.46为阳性表达，以<0.46为阴性表达。以DSA检查结果为诊断“金标准”，HIR诊断侧支不良真阳性52例，假阳性5例，假阴性3例，真阴性32

例，诊断灵敏度为94.55%(52/55)、特异度为86.49%(32/37)、准确度为91.30%(84/92)、误诊率为13.51%(5/37)、漏诊率为5.45%(3/55)。见表3。

表3 ASL结果与DSA检查结果(例)

HIR结果	DSA结果		合计
	阳性	阴性	
阳性	52	5	57
阴性	3	32	35
合计	55	37	92

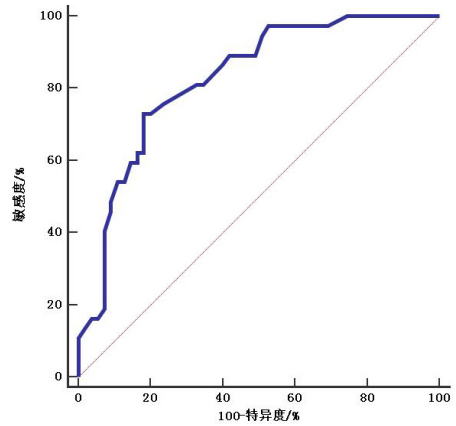


图1 HIR诊断侧支不良ROC曲线。

2.5 HIR与ASL诊断侧支不良的一致性分析 ASL结果显示, CIS患者侧支不良58例, 侧支良好34例, HIR结果显示, CIS患者侧支不良57例, 侧支良好35例, 与ASL结果相比, HIR诊断CIS患者侧支不良的Kappa值为0.930(95%CI: 0.895~0.972), 具有良好一致性。

2.6 不同预后一般资料比较 与预后良好患者相比, 预后不良患者吸烟史占比及NIHSS评分、梗死面积较高, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 见表4。

2.7 不同预后CTP参数比较 与预后良好患者相比, 预后不良患者rCBV、rCBF值较低, rMTT、Tmax、HIR值较高, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 见表5。

2.8 HIR与CIS患者预后不良的关系 Logistic回归分析显示, NIHSS评分、吸烟史、梗死面积、rCBV、rCBF、rMTT、Tmax、HIR是CIS患者预后不良的独立相关影响因素, 差异有统计学意义($P < 0.05$); 校正后, HIR仍是CIS患者预后不良的独立相关影响因素, 差异有统计学意义($P < 0.05$)。见表6。

2.9 HIR对预后的预测价值 ROC曲线显示, 治疗2周后HIR值预测CIS患者预后不良的AUC为0.794(95%CI: 0.697~0.871), 最佳截断值为0.76, 最佳诊断敏感度为82.61%, 特异度为62.32%。见图2。

表4 不同预后一般资料比较[n(%)]

临床资料	预后不良(n=23)	预后良好(n=69)	t/χ ² 值	P值
性别			0.232	0.630
男	12(52.17)	32(46.38)		
女	11(47.83)	37(53.62)		
年龄(岁)	59.14±5.02	57.82±4.79	1.104	0.272
BMI(kg/m ²)	21.88±1.19	22.05±1.07	0.608	0.545
发病至入院时间(h)	3.91±0.84	3.65±0.77	1.371	0.174
高脂血症	7(30.43)	16(23.19)	0.483	0.487
糖尿病	5(21.74)	14(20.29)	0.022	0.882
高血压	8(34.78)	23(33.33)	0.016	0.899
吸烟史	10(43.48)	13(18.84)	5.585	0.018
饮酒史	9(39.13)	30(43.48)	0.134	0.715
遗传病史	0(0.00)	2(2.90)	0.000	1.000
肿瘤病史	1(4.35)	2(2.90)	0.115	0.735
NIHSS评分(分)	14.18±2.19	11.25±1.83	5.774	0.000
梗死面积(mm ²)	62.85±6.34	42.73±5.96	13.372	0.000

表5 不同预后CTP参数比较

预后	n	rCBV(mL/100 g)	rCBF(mL/min·100 g)	rMTT(s)	Tmax(s)	HIR
预后不良	23	0.74±0.13	18.88±1.92	1.86±0.13	13.38±1.34	0.76±0.19
预后良好	69	1.34±0.26	38.52±4.85	1.14±0.05	6.82±1.08	0.28±0.08
t值		-10.606	-18.876	38.542	23.713	17.057
P值		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表6 HIR与CIS患者预后不良的关系

自变量	校正前			校正后		
	OR值	95%CI	P值	OR值	95%CI	P值
吸烟史	1.967	1.258~3.076	0.000	-	-	-
NIHSS评分	3.018	2.079~4.382	0.000	-	-	-
梗死面积	2.588	1.790~3.741	0.000	-	-	-
rCBV	0.564	0.356~0.895	0.000	-	-	-
rCBF	0.583	0.425~0.799	0.000	-	-	-
rMTT	3.871	3.012~4.975	0.000	-	-	-
Tmax	2.555	1.657~3.940	0.000	-	-	-
HIR	2.884	2.059~4.039	0.000	3.008	2.146~3.215	0.000

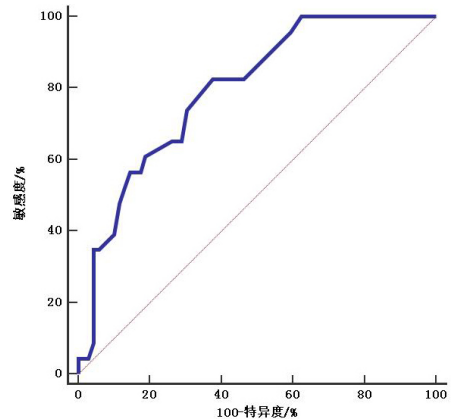


图2 HIR预测预后的ROC曲线。

3 讨论

越来越多研究显示,侧支状态良好有助于减少梗死面积、改善预后,早期判断侧支循环情况、预测预后,并采取针对性干预,对CIS患者至关重要^[8-9]。当前CIS影像学检查方式有多种,ASL通过血流灌注情况反映脑组织灌注程度,进而评估脑血管病变,是较为先进的影像学检查方式^[10]。本研究结果显示,ASL对CIS患者侧支不良诊断灵敏度为90.73%、准确度为88.04%,提示其具有较高诊断价值,与徐晓晗等^[11]学者研究观点相符。CTP临床应用更为广泛,本研究探寻其诊断侧支状态及预测预后的HIR临界值,并分析其与ASL诊断侧支不良的一致性。

部分CIS患者脑内可形成新生血管系统,建立侧支循环,可一定程度上为脑缺血组织提供血流灌注,是维持颅内血流动力学稳定,减轻组织损伤、坏死的关键^[12-13]。本研究发现,侧支不良组rCBV、rCBF值低于侧支良好组,rMTT、Tmax、HIR值高于侧支良好组,提示CTP定量参数与CIS患者侧支循环建立情况密切相关。随着影像学技术不断发展,CTP在临床应用已较为广泛,可清晰显示包含软脑膜侧支循环在内的脑血管壁情况及管腔状态,亦可提示脑缺血位置、大小及脑组织血流灌注情况^[14-15]。采集CTP原始灌注数据传输至工作站,可测算出rCBV、rCBF、rMTT、Tmax、HIR等定量参数,其中,rCBV、rCBF值较低,表示此处脑组织灌注不足,血容量较小,进而反映侧支循环建立不良,脑血流难以通过该血管系统代偿性灌注缺血组织,而灌注不足、血液黏稠度高、管腔直径小,可进一步导致血液流速缓慢,rMTT、Tmax、HIR值升高,此类患者再通治疗有效率较低,可能导致预后不良^[16-18]。

HIR是Tmax超过10 s体积与超过6 s体积的比值,而Tmax是反映脑组织缺血最敏感的CTP定量灌注参数,汤文琴等^[19]学者研究指出,Tmax、HIR值对侧支循环状态的敏感度较高,可为本研究结果提供依据。CIS患者脑血管管腔狭窄,脑循环储备功能下降,若侧支状态不良,难以代偿性供血,则可引起Tmax值升高,Tmax超过6 s可视为低灌注区域,超过10 s则接近严重低灌注状态,当严重低灌注脑组织体积占比较大时,核心梗死与低灌注体积匹配失衡,HIR值可明显升高,说明血流灌注严重不足,侧支循环未建立或建立不良,核心梗死面积较大,可能导致治疗效果欠佳,预后较差^[20-24]。本研究发现,HIR值诊断CIS患者侧支不良的AUC为0.825,HIR以最佳截断值为界对侧支不良的诊断灵敏度为94.55%、准确度为91.30%,且其诊断结果与ASL诊断结果的Kappa值为0.930,明显高于0.7,提示HIR对侧支不良具有较高诊断价值。陈聚惠等^[25]学者分析发现HIR预测侧支循环良好的AUC为0.910,与本研究结果相似。

基于前文描述,本研究进一步探讨HIR与CIS患者预后的关系,发现吸烟史占比、NIHSS评分、梗死面积及rCBV、rCBF、rMTT、Tmax、HIR值在不同预后患者中存在差异,且ROC曲线显示HIR值预测预后不良的AUC为0.794,具有一定预测价值,可作为临床预测预后的有效影像学参数。此外,CTP与CTA应用同一设备,CTA侧支循环评分亦是临床评估侧支状态的良好指标,且CTA原始图像亦可提供软脑膜侧支循环信息,建议临床可将CTP、CTA进行一站式检查,获取HIR值等定量参数结果,并结合本研究HIR临界值,有助于早期识别侧支不良及预后不良高风险人群,并指导临床采取个性化应对措施,尽可能提高临床疗效,改善预后,值得临床推广应用。

综上所述,CTP HIR与ASL诊断CIS患者侧支不良一致性良好,对侧支不良及预后不良具有一定诊断及预测价值,可为临床判断侧支状态、预测预后提供可靠参考。本研究仅对一次检查结果进行对比分析,HIR临界值可能具有一定偏倚,后续研究有待进行更深层探讨,进一步验证本研究结果。

参考文献

[1] Maida CD, Norrito RL, Daidone M, et al. Neuroinflammatory mechanisms in ischemic stroke: focus on cardioembolic stroke, background, and therapeutic approaches[J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(18): 6454.
[2] Putaala J. Ischemic stroke in young adults[J]. *Continuum (Minneapolis)*, 2020, 26(2): 386-414.

[3] Jolugbo P, Ariëns RAS. Thrombus composition and efficacy of thrombolysis and thrombectomy in acute ischemic stroke[J]. *Stroke*, 2021, 52(3): 1131-1142.
[4] Fan JL, Brassard P, Rickards CA, et al. Integrative cerebral blood flow regulation in ischemic stroke[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2022, 42(3): 387-403.
[5] Mittmann BJ, Braun M, Runck F, et al. Deep learning-based classification of DSA image sequences of patients with acute ischemic stroke[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2022, 17(9): 1633-1641.
[6] 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.
[7] 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. 中国缺血性脑卒中和短暂性脑缺血发作二级预防指南2014[J]. *中华神经科杂志*, 2015, 48(4): 258-273.
[8] Uniken Venema SM, Dankbaar JW, 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] Mangiardi M, Bonura A, Iaccarino G, et al. The pathophysiology of collateral circulation in acute ischemic stroke[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(14): 2425.
[10] Kidoguchi M, Akazawa A, Komori O, et al. Prediction of occurrence of cerebral infarction after successful mechanical thrombectomy for ischemic stroke in the anterior circulation by arterial spin labeling[J]. *Clin Neuroradiol*, 2023, 33(4): 965-971.
[11] 徐晓晗, 曹际斌, 孙文阁, 等. 多反转恢复时间的磁共振动脉自旋标记灌注成像在缺血性脑血管病中的临床应用价值[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2022, 33(7): 457-461.
[12] Yun SW, Kim WY, Lee JB. Correlation between Serum Erythropoietin and Cerebral Collateral Flow in Acute Ischemic Stroke Patient[J]. *Korean J Fam Med*, 2023, 44(1): 53-57.
[13] Cao RY, Lu Y, Qi P, et al. Collateral circulation and BNP in predicting outcome of acute ischemic stroke patients with atherosclerotic versus cardioembolic cerebral large-vessel occlusion who underwent endovascular treatment[J]. *Brain Sci*, 2023, 13(4): 539.
[14] Václavík D, Volný O, Cimřová P, et al. The importance of CT perfusion for diagnosis and treatment of ischemic stroke in anterior circulation[J]. *J Integr Neurosci*, 2022, 21(3): 92.
[15] Nael K, Tadayon E, Wheelwright D, et al. Defining ischemic core in acute ischemic stroke using ct perfusion: a multiparametric bayesian-based model[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40(9): 1491-1497.
[16] Suo ST, Zhao ZC, Zhao HL, et al. Cerebral hemodynamics in symptomatic anterior circulation intracranial stenosis measured by angiography-based quantitative flow ratio: association with CT perfusion[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(8): 5687-5697.
[17] 陈丽颖, 余辉云, 向入平, 等. CTP参数对短暂性脑缺血发作近期进展为急性脑梗死的预测价值探讨[J]. *国际神经病学神经外科学杂志*, 2022, 49(2): 20-23.
[18] Lyndon D, van den Broek M, Niu B, et al. Hypoperfusion intensity ratio correlates with CTA collateral status in large-vessel occlusion acute ischemic stroke[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2021, 42(8): 1380-1386.
[19] 汤文琴, 黎红华, 陈信坚, 等. 大脑中动脉闭塞患者侧支循环与脑灌注研究[J]. *中风与神经疾病杂志*, 2016, 33(06): 517-520.
[20] Potreck A, Scheidecker E, Weyland CS, et al. RAPID CT perfusion-based relative cbf identifies good collateral status better than hypoperfusion intensity ratio, cbv-index, and time-to-maximum in anterior circulation stroke[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2022, 43(7): 960-965.
[21] Baek JH, Kim YD, Lee KJ, et al. Low hypoperfusion intensity ratio is associated with a favorable outcome even in large ischemic core and delayed recanalization time[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(9): 1869.
[22] Lakhani DA, Balar AB, Koneru M, et al. The compensation index is better associated with dsa asitn collateral score compared to the cerebral blood volume index and hypoperfusion intensity ratio[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(23): 7365.
[23] Kurmann CC, Kaesmacher J, Pilgram-Pastor S, et al. Correlation of collateral scores derived from whole-brain time-resolved flat panel detector imaging in acute ischemic stroke[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2022, 43(11): 1627-1632.
[24] van Horn N, Broocks G, Kabiri R, et al. Cerebral hypoperfusion intensity ratio is linked to progressive early edema formation[J]. *J Clin Med*, 2022, 11(9): 2373.
[25] 陈聚惠, 付晓, 张琼, 等. 4D-CTA评估急性缺血性脑卒中患者侧支循环与CTP灌注参数的相关性[J]. *临床放射学杂志*, 2020, 39(2): 270-275.

(收稿日期: 2024-07-12)

(校对编辑: 姚丽娜)