

幕上分水岭脑灌注与 ICA 狭窄程度的相关性研究

裴禹淞 乔鑫鑫 王治国 张国旭

中国人民解放军北部战区总医院, 辽宁 沈阳 110016

通信作者: 张国旭

【摘要】 目的 应用 CT 灌注 (computed tomography perfusion, CTP) 成像技术探讨幕上各分水岭区血流灌注与颈内动脉 (internal carotid artery, ICA) 狭窄程度的相关性。方法 分析 97 例单侧 ICA 狭窄 ($\geq 50\%$) 患者的临床及 CTP 资料, 并以 37 例无血管狭窄 (或单侧 ICA 狭窄 $< 50\%$) 患者为对照组。所有患者在入院后均行 CT 平扫、CTP 及数字减影血管造影 (digital subtraction angiography, DSA) 检查, 对称性选取双侧幕上各分水岭区, 进行参数值的测量。分析不同狭窄程度组各分水岭区的灌注状态。结果 单侧 ICA 狭窄时, 各个分水岭区患侧与健侧的平均通过时间 (mean transit time, MTT) 和达峰时间 (time to peak, TTP) 差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 患侧较健侧时间延长; 仅在半卵圆中心患侧脑血流量 (cerebral blood flow, CBF) 较健侧明显降低, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$); 后角白质患侧脑血容量 (cerebral blood volume, CBV) 较健侧增加, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$); 前角和后角的灰质 CBF、CBV 均高于同侧白质, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。半卵圆中心 rCBF、rTTP、rMTT 在不同狭窄组间差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 放射冠 rTTP、rMTT 在不同狭窄组间差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 前角白质 rTTP 在不同狭窄组间差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。结论 CTP 成像能够有效评价幕上分水岭区脑血流灌注情况。单侧 ICA 狭窄时, 不同分水岭区脑血流灌注存在差异; 单侧 ICA 重度狭窄或闭塞时, 仅半卵圆中心表现为低灌注。

【关键词】 颈内动脉; 狭窄; 分水岭; CT 灌注

【中图分类号】 R445.3 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1673-5110 (2022) 06-0705-08

基金项目: 辽宁省重点研发资助计划 (编号: 2019JH2/10300010)

Study on the correlation between brain watershed perfusion and ICA Stenosis

PEI Yusong, QIAO Xinxin, WANG Zhiguo, ZHANG Guoxu

General Hospital of Northern Theater Command, Shenyang 110016, China

Corresponding author: ZHANG Guoxu

【Abstract】 Objective The correlation between blood perfusion in the supratentorial watersheds and the degree of stenosis of the internal carotid artery (ICA) was investigated by computed tomography perfusion (CTP) imaging technology. Methods 97 patients with unilateral ICA stenosis ($\geq 50\%$) were analyzed, and 37 patients without vascular stenosis (or unilateral ICA stenosis $< 50\%$) were used as the control group. All patients underwent CT scan, CTP and digital subtraction angiography (DSA) examination after admission. The watershed areas of the bilateral supratentorial areas were selected symmetrically to measure the parameter values. The perfusion status of each watershed area in different stenosis degree groups was statistically analyzed. Result In the case of unilateral ICA stenosis, the difference in mean transit time (MTT) and time to peak (TTP) between the affected

DOI: 10.12083/SYSJ.220559

本文引用信息: 裴禹淞, 乔鑫鑫, 王治国, 张国旭. 幕上分水岭脑灌注与 ICA 狭窄程度的相关性研究 [J]. 中国实用神经疾病杂志, 2022, 25(6): 705-712. DOI: 10.12083/SYSJ.220559

Reference information: PEI Yusong, QIAO Xinxin, WANG Zhiguo, ZHANG Guoxu. Study on the correlation between brain watershed perfusion and ICA Stenosis [J]. Chinese Journal of Practical Nervous Diseases, 2022, 25(6): 705-712. DOI: 10.12083/SYSJ.220559

side and the healthy side in each watershed area was statistically significant ($P < 0.05$), and the affected side was more healthy than the healthy side. Only the cerebral blood flow (CBF) on the affected side of the semiovale center was significantly lower than that on the healthy side, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). , CBV) was increased compared with the healthy side, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). The rCBF, rTTP and rMTT in the center of semiovale were statistically significant between different stenosis groups ($P < 0.05$), the corona radiata rTTP and rMTT were statistically significant between different stenosis groups ($P < 0.05$), and the anterior horn white matter rTTP in different stenosis groups There was statistical significance ($P < 0.05$). Conclusion CTP imaging can effectively evaluate the cerebral blood perfusion in the supratentorial watershed area. In unilateral ICA stenosis, there were differences in cerebral blood perfusion in different watershed areas; in severe unilateral ICA stenosis or occlusion, only the center of semiovale showed hypoperfusion.

【Key words】 Internal carotid artery; Stenosis; CT perfusion imaging; watershed

分水岭脑梗死 (cerebral watershed infarction, CWSI) 是指发生在颅内大血管分布交界区的局限性脑梗死, 在临床上较常见。早期研究表明脑灌注下降是 CWSI 发生的重要原因^[1]。最新研究表明, 不同类型 CWSI 的发病机制不同^[2]。皮质分水岭梗死 (cortical watershed infarction, CWI) 主要由微栓子造成, 脑血流灌注不会明显减少。内分水岭区对缺血敏感性高, 侧支供应相对少, 颅内外血管狭窄导致的血流动力学障碍 (hemodynamic impairment, HDI) 是内分水岭梗死 (internal watershed infarction, IWI) 最主要的原因^[3-5]。当血管狭窄程度达 50% 以上时, 供血远端的脑组织便会受到影响, 最先在内分水岭区发生低灌注^[6-7], 这为研究不同类型 CWSI 提供了影像学依据。相比常规 CT 扫描手段, CT 灌注 (computed tomography perfusion, CTP) 成像可以直接反映 CWSI 患者的脑血流动力学改变, 为其提供功能学信息, 尤其是多参数的应用, 能更加定量有效反映局部脑组织血流灌注的改变, 以便临床医生能够量化脑组织灌注损伤的程度, 以确定不同时期脑组织损伤状态和脑梗死发展进程^[8-10]。目前大多数研究对已经发生 CWSI 患者分析, 评估梗死区或其周围的脑灌注水平, 却少有研究 CTP 多参数量化 ICA 不同程度狭窄时, 不同分水岭区脑血流动力学改变的差异。所以我们基于 CTP 技术研究 ICA 狭窄程度不同时, 幕上各分水岭区脑灌注的差异, 有助于了解分水岭脑梗死的发生机制, 对预防脑卒中发生及复发具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性收集 2018-10—2020-12 在中国人民解放军北部战区总医院就诊患者 134 例, 收集所有患者的一般临床资料。ICA 无狭窄或单侧狭窄 $< 50\%$ 为对照组, 单侧 ICA 狭窄 $\geq 50\%$ 为狭窄组, 狭

窄部位为 ICA 近端, 其中 ICA 狭窄 $50\% \sim 69\%$ 为中度狭窄组, 70% 及以上为重度狭窄组 (包括闭塞)。

纳入标准: (1) 狭窄组患者因不同程度神经系统症状就诊; (2) 对照组无任何神经系统疾病; (3) 均由 DSA 判定狭窄程度; (4) 所有患者入院后 24 h 内行 CT 平扫及 CTP 检查。排除标准: (1) 合并其他颅颈大血管狭窄程度 $> 50\%$; (2) 全身低灌注因素者 (脱水、发病前服用降压药等) 或心源性栓塞者; (3) 半年内有支架植入术、血管成形术和溶栓术者; (4) 凝血功能障碍者。

1.2 检查设备及扫描参数 所有患者均经 GE 64 排螺旋 CT (GE Discovery CT750 HD, 通用电气公司, 美国) 扫描仪扫描。以听眦线为基线, 于右肘静脉放置高压注射留置针, 连接高压注射器, 行 CT 平扫及 CTP 扫描。灌注扫描时以 5 mL/s 的速度经肘静脉注入碘海醇 (350 mg/L) 40 mL 及生理盐水 20 mL 。扫描参数如下: 管电压 120 kV , 管电流 250 mA , 矩阵 512×512 , 管球旋转时间 $\leq 1 \text{ s}$, 延迟 5 s 扫描, 动态扫描 50 s , 获得 420 幅图像, 重建层厚为 10 mm , 获得 14 层全脑灌注图像。

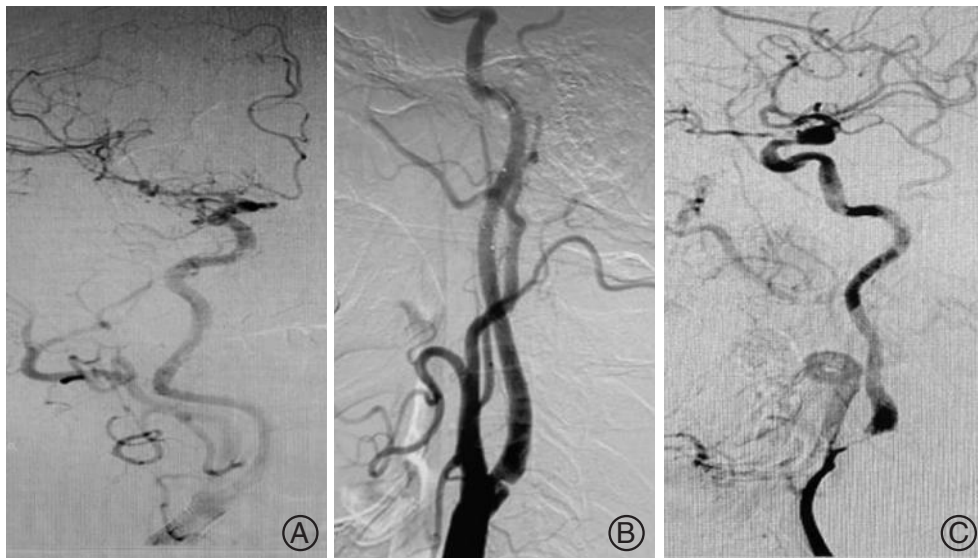
1.3 灌注图像处理 采用 NeroPerfusion 的软件包 (Aquarius i Ntuition Edition Ver.4.4.6, 泰锐影像公司, 美国) 对 CTP 的原始图像进行后处理, 选择基底动脉及上矢状窦作为输入动脉和输出静脉, 生成参数伪彩图, 包括达峰时间 (time to peak, TTP) 参数、平均通过时间 (mean transit time, MTT) 参数、脑血流量 (cerebral blood flow, CBF) 参数和脑血容量 (cerebral blood volume, CBV) 参数, 手动勾画一侧脑组织的感兴趣区, 灌注应用软件自动产生对侧镜像区, 相应感兴趣区灌注参数各测量 2 次, 求平均值作为最终绝对参数值; 以患侧与健侧的比值或右侧与左侧的比值分别作为狭窄组或对照组的相对参数值, 即相对达峰时间 (relative time to peak, rTTP) 参

数、相对平均通过时间(relative mean transit time, rMTT)参数、相对脑血流量(relative cerebral blood flow, rCBF)参数、相对脑血容量(relative cerebral blood volume, rCBV)参数^[11-12]。

CWSI 分型^[13]包括:(1)皮层前型:大脑前动脉与大脑中动脉皮层支的分界区,即额顶区;(2)皮层后型:大脑中动脉与大脑后动脉皮层支的分界区,即顶颞枕区;(3)皮层下型:包括发生在双侧脑室消失前的最后一个层面的放射冠区和双侧脑室消失后的第一个层面的半卵圆中心。根据此分型选择感兴趣区^[5];同时对前、后角的灰质、白质进一步细分。所有

感兴趣区的选择和CTP结果均由两名高级影像医生独立判定,两人对血管狭窄程度不知情,当意见不一时对图像审查,均经讨论建立共识。手动选取的感兴趣区(避开钙化、血管及坏死)为直径平均约1 cm的圆形,判定灰、白质区时不可重叠。

1.4 狭窄判定及分组 基于NASCET标准^[14-15],本研究将患者分为3组:ICA无狭窄(或狭窄<50%)为对照组;单侧ICA狭窄为50%~69%作为中度狭窄组;单侧ICA狭窄 \geq 70%作为重度狭窄组(包括闭塞)。见图1。



注:DSA图示(A-C)A:右侧ICA未见狭窄;B:右侧ICA中度狭窄,狭窄程度约50%;C:右侧ICA重度狭窄,狭窄程度约90%

图1 ICA血管狭窄程度评估图例

Figure 1 Legend of ICA vascular stenosis assessment

1.5 统计学方法 配对t检验分析狭窄组相同分水岭区患侧绝对灌注参数;单因素方差分析及最小显著差异t检验(LSD-t检验)分析不同狭窄组相对灌注参数;计量资料用均数 \pm 标准差($\bar{x}\pm s$)表示,计数资料用频数[n(%)]表示。所有数据均使用SPSS 24.0统计软件进行分析, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 临床资料比较 (1)对照组37例,其中存在单侧<50% 15例;(2)中度狭窄组36例,其中存在对侧<50% 7例;(3)重度狭窄组61例,其中存在对侧<50% 11例。单因素分析中,性别、高血脂在3组间差异有统计学意义($P < 0.05$)。见表1。

2.2 狭窄组感兴趣区患侧和健侧绝对灌注参数比较 患侧半卵圆中心TTP、MTT较健侧均延长,CBF

降低,差异有统计学意义($P < 0.05$),CBV未见明显变化;前白质和后角白质的CBV增加差异有统计学意义($P < 0.05$)。见表2。

2.3 狭窄程度不同组间各感兴趣区相对灌注参数比较 单因素方差分析结果显示,半卵圆中心rCBF、rTTP、rMTT在不同狭窄组间差异有统计学意义($P=0.000, P=0.000, P=0.000$),放射冠rTTP、rMTT在不同狭窄组间差异有统计学意义($P=0.000, P=0.002$),前角白质rTTP在不同狭窄组间差异有统计学意义($P=0.010$)。两两比较分析结果显示,与对照组相比,中度狭窄组、重度狭窄组半卵圆中心rTTP、rMTT均延长,差异均有统计学意义($P < 0.05$),rCBF下降,仅在重度狭窄组差异有统计学意义($P=0.000$);放射冠rMTT、rTTP延长,差异有统计学意义($P < 0.05$)。前角白质和后角白质rTTP、rMTT均延长,差异有统计

表 1 不同狭窄组间患者的一般临床资料分析

Table 1 General clinical data analysis of patients in different stenosis groups

资料	对照组 (n=37)	中度狭窄组 (n=36)	重度狭窄组 (n=61)	F 值	P 值
年龄/岁	63±8	64±8	64±8	0.344	0.710
男性/[n(%)]	26(70.3)	26(72.2)	54(88.5)	6.053 ^a	0.048
高血压/[n(%)]	24(64.9)	28(77.8)	38(62.3)	2.583 ^a	0.275
高血脂/[n(%)]	16(43.2)	20(55.6)	17(27.9)	7.550 ^a	0.023
HHcy/[n(%)]	11(29.7)	14(38.9)	27(44.3)	2.048 ^a	0.359
糖尿病/[n(%)]	8(21.6)	12(33.3)	25(41.0)	3.872 ^a	0.144
冠心病/[n(%)]	10(27.0)	12(33.3)	17(27.9)	0.435 ^a	0.805
吸烟史/[n(%)]	23(62.2)	20(55.6)	40(65.6)	0.965 ^a	0.617
饮酒史/[n(%)]	15(46.9)	17(47.2)	34(55.7)	2.209 ^a	0.331
既往卒中史/[n(%)]	0	2(2.8)	5(8.2)	Fisher	0.263
腔隙性脑梗死/[n(%)]	1(2.7)	4(11.1)	10(16.4)	Fisher	0.102

注：^a:Pearson χ^2 检验;Fisher:Fisher's exact 精确检验

表 2 狭窄组各分水岭区患、健侧绝对灌注参数比较

Table 2 Comparison of absolute perfusion parameters of affected and unaffected sides in each watershed area of stenosis group

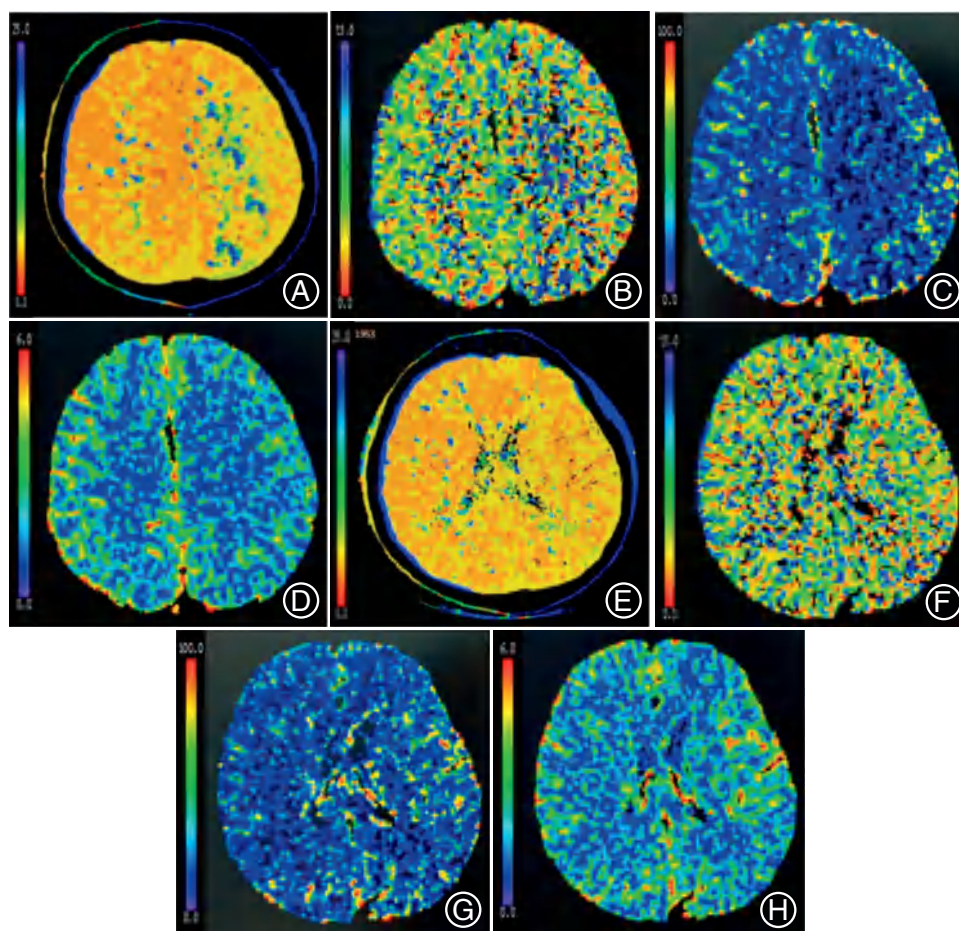
参数	患侧	健侧	t 值	P 值
前角白质				
CBV/(mL/100 g)	1.74±0.54	1.65±0.52	3.644	0.000
CBF/(mL/100 g·min)	14.41±11.1	13.38±4.20	0.978	0.331
MTT/s	12.25±1.96	11.70±2.18	3.892	0.000
TTP/s	28.49±3.88	27.28±3.62	5.736	0.000
前角灰质				
CBV/(mL/100 g)	2.42±0.73	2.40±0.80	0.508	0.613
CBF/(mL/100 g·min)	18.46±6.20	18.35±6.04	1.227	0.223
MTT/s	11.28±1.91	11.15±2.03	1.168	0.246
TTP/s	24.38±3.96	23.78±3.88	3.451	0.001
后角白质				
CBV/(mL/100 g)	1.76±0.44	1.68±0.40	2.587	0.011
CBF/(mL/100 g·min)	14.46±3.57	14.26±3.49	1.260	0.211
MTT/s	11.69±1.83	11.40±1.80	2.397	0.018
TTP/s	28.39±4.14	27.98±3.82	1.916	0.058
后角灰质				
CBV/(mL/100 g)	2.50±0.82	2.45±0.80	1.849	0.068
CBF/(mL/100 g·min)	19.89±6.34	19.74±6.19	1.901	0.060
MTT/s	11.28±1.77	11.01±1.75	1.840	0.069
TTP/s	24.58±3.49	24.04±3.54	3.782	0.000
半卵圆中心				
CBV/(mL/100 g)	1.56±0.50	1.56±0.52	-0.056	0.956
CBF/(mL/100 g·min)	11.64±3.63	13.76±4.68	-5.213	0.000
MTT/s	13.07±2.21	10.98±1.78	10.672	0.000
TTP/s	29.77±4.02	26.99±3.85	11.864	0.000
放射冠				
CBV(mL/100 g)	1.77±0.57	1.74±0.55	0.938	0.350
CBF/(mL/100 g·min)	13.88±4.66	14.28±4.91	-1.221	0.225
MTT/s	12.21±2.01	11.11±1.64	5.706	0.000
TTP/s	27.73±4.12	25.95±3.90	8.981	0.000

学意义($P < 0.05$)。与中度狭窄组相比,在重度狭窄组半卵圆中心 rTTP、rMTT 及 rCBF 差异有统计学意义($P < 0.05$)。见表 3 及图 2。

表 3 狭窄程度不同组各分水岭区相对灌注参数比较
Table 3 Comparison of relative perfusion parameters in each watershed area in different groups of stenosis

参数	对照组	中度狭窄组	重度狭窄组	F 值	P 值
前角白质					
Rcbv/(mL/100 g)	1.02±0.16	1.03±0.14	1.09±0.17	2.485	0.087
rCBF/(mL/100 g·min)	1.01±0.08	1.00±0.05	1.12±0.99	0.519	0.596
rMTT/s	1.02±0.06	1.04±0.09	1.07±0.15 ^a	1.837	0.163
rTTP/s	1.00±0.05	1.04±0.09 ^a	1.05±0.10 ^a	4.825	0.010
前角灰质					
rCBV(mL/100 g)	1.01±0.12	1.01±0.12	1.04±0.17	0.451	0.638
rCBF/(mL/100 g·min)	0.99±0.05	1.00±0.04	1.01±0.07	1.455	0.237
rMTT/s	1.00±0.07	1.02±0.11	1.02±0.11	0.391	0.677
rTTP/s	1.01±0.04	1.03±0.06	1.03±0.09	0.606	0.547
后角白质					
rCBV(mL/100 g)	0.99±0.14	1.04±0.13	1.08±0.22 ^a	3.022	0.052
rCBF/(mL/100 g·min)	1.00±0.05	1.01±0.03	1.03±0.16	0.870	0.421
rMTT/s	0.99±0.08	1.04±0.10 ^a	1.03±0.12 ^a	2.348	0.100
rTTP/s	1.00±0.07	1.01±0.07	1.02±0.08	0.401	0.671
后角灰质					
rCBV(mL/100 g)	0.96±0.11	0.98±0.09	1.00±0.09	2.047	0.133
rCBF/(mL/100 g·min)	1.00±0.04	1.00±0.03	1.01±0.05	0.933	0.396
rMTT/s	1.00±0.09	1.03±0.21	1.04±0.10	0.929	0.397
rTTP/s	1.01±0.04	1.02±0.07	1.03±0.06	1.849	0.161
半卵圆中心					
rCBV(mL/100 g)	1.02±0.11	1.08±0.19	1.01±0.33	1.163	0.316
rCBF/(mL/100 g·min)	1.00±0.06	0.98±0.15	0.83±0.29 ^{ab}	30.265	0.000
rMTT/s	1.00±0.07	1.11±0.13 ^a	1.26±0.22 ^{ab}	30.962	0.000
rTTP/s	1.01±0.04	1.07±0.08 ^a	1.13±0.10 ^{ab}	26.711	0.000
放射冠					
rCBV(mL/100 g)	1.02±0.14	1.03±0.12	1.07±0.34	0.511	0.601
rCBF/(mL/100 g·min)	1.21±1.40	1.00±0.09	1.00±0.31	1.043	0.355
rMTT/s	1.01±0.09	1.08±0.13 ^a	1.13±0.20 ^a	7.723	0.002
rTTP/s	1.01±0.05	1.05±0.05 ^a	1.09±0.10 ^a	11.048	0.000

注:^a:代表与对照组间有统计意义;^b:代表与中度狭窄组间差异有统计意义。半卵圆中心(重度狭窄 vs 对照:CBF: $P=0.000$, MTT: $P=0.000$, TTP: $P=0.000$; 重度狭窄 vs 中度狭窄:CBF: $P=0.000$, MTT: $P=0.000$, TTP: $P=0.000$; 中度狭窄 vs 对照: MTT: $P=0.005$, TTP: $P=0.004$);放射冠(重度狭窄 vs 对照: MTT: $P=0.000$, TTP: $P=0.000$; 重度狭窄 vs 中度狭窄: TTP: $P=0.012$; 中度狭窄 vs 对照: MTT: $P=0.033$);前角白质(重度狭窄 vs 对照: TTP: $P=0.006$; 中度狭窄 vs 对照: TTP: $P=0.008$);后角白质(重度狭窄 vs 对照: CBV: $P=0.016$);后角灰质(重度狭窄 vs 对照: CBV: $P=0.045$)



注:A-D半卵圆中心层面低灌注参数伪彩图;左侧半卵圆中心TTP(A)、MTT(B)延长;CBF(C)降低、CBV(D)未见明显变化。E-H放射冠层面灌注参数伪彩图;左侧放射冠TTP(E)、MTT(F)、CBF(G)、CBV(H)均未见明显变化

图2 低灌注图例

Figure 2 Legend of low perfusion

3 讨论

ICA狭窄发生率较高,传统观点认为血管严重狭窄或闭塞会产生反复的低血压,进而造成血流动力学受损。在这种情况下,边界区内低灌注增加了对缺血的易感性,从而导致梗死^[16-17]。目前研究表明,ICA狭窄时限制流向大脑的血液流动,进而导致脑灌注不足,影响认知功能^[18-19],尤其在侧支稀疏的分水岭区,血流动力学不足,代偿不及时很容易导致脑梗死^[20]。超过80%的患者ICA狭窄与同侧脑灌注明显减少有关^[21],且与CWSI发现相关^[22]。ICA狭窄同侧大脑半球灌注减低的患者比灌注正常的患者发生梗死的风险增加^[23-25]。

CWSI作为缺血性脑卒中中的一种特殊亚型,与ICA狭窄所致的血流动力学障碍有关,尤其是IWI^[26-27]。本研究认为CTP成像能对ICA狭窄患者分水岭区脑微循环状态进行定性定量分析,有助于症状性颈动脉

狭窄患者的风险分层及治疗方案的选择,在计划血管重建之前,正确识别异常灌注区域尤为重要。

WEILL等^[28]在研究中根据患者有无CWSI进行分组,发现CWSI的发生与同侧粥样硬化性ICA狭窄有关。DONG等^[29]在研究中发现同侧ICA狭窄是IWI的独立脑血管危险因素,但其未进一步分析各梗死亚型。本研究对内分水岭区及皮质分水岭区进一步细分,发现单侧ICA狭窄程度 $\geq 70\%$ 时,半卵圆中心表现为脑灌注减低,即MTT、TTP明显延长,CBF明显下降。而放射冠及皮质分水岭各区脑血流灌注并无明显减低,这与早期的SPECT研究结果一致^[30-32],ICA严重狭窄可作为半卵圆中心脑梗死发生的警示性标志。

相比皮质分水岭区,内分水岭区血供主要来源于大脑前动脉的浅表穿支和大脑中动脉豆纹动脉的深穿支,浅表穿支为ICA的最远端且灌注压最低,深

穿支缺乏侧支循环^[4]。因此 IWI,尤其是发生在半卵圆中心的脑梗死与低灌注引起的 HDI 关系更密切,常常由 TOAST I 型(大动脉粥样硬化型)造成。根据 Spencer 曲线理论^[33],血管轻度狭窄(< 50%)不会引起脑血流动力学发生变化,中度狭窄(50%~69%)对脑灌注的影响尚未明确,重度狭窄(> 70%)时,脑灌注压很难维持稳定,因此对于粥样硬化性血管狭窄的患者,治疗前应及时评估脑灌注状态。

不论 ICA 狭窄程度如何,皮质分水岭区脑血流动力学变化不大,仅表现为 TTP、MTT 延长,rCBF 正常或轻度下降,rCBV 正常或升高,此时机体处于循环储备期,脑血流尚能维持相对稳定^[34-35]。SORGUN 等^[36]研究认为这是因为皮质区软脑膜侧支血管丰富,对脑缺血的耐受性较强。然而现在更多的观点认为,TOAST II 型(心源性栓塞)对 CWI 的意义更为重大^[37-38],当心壁收缩性受损或心脏血栓为不稳定的溃疡性斑块时,导致栓塞 CWI,并影响后续溶栓治疗效果^[39]。

早期识别 CWSI,需要对半卵圆中心和放射冠的低灌注高度重视,灌注减低发生机制不仅是小动脉闭塞,可能还提示同侧大血管狭窄。因此对于存在大血管狭窄患者,临床应同时关注狭窄程度及脑灌注状态。

本研究存在以下不足:(1)感兴趣区基于手动选取,对参数值的测量存在主观性;(2)对于皮质分水岭区出现的轻微灌注异常,现有研究认为是栓塞所致,本研究未对 ICA 狭窄患者行斑块分析,后续将进一步展开研究;(3)本研究属于回顾性研究,样本量少,会存在选择偏倚。

4 参考文献

- [1] MOUSTAFA R R, IZQUIERDO GD, JONES P S, et al. Watershed infarcts in transient ischemic attack/minor stroke with > or = 50% carotid stenosis: hemodynamic or embolic? [J]. *Stroke*, 2010, 41 (7) : 1410-1416. DOI: 10.1161/STROKEAHA.110.580415.
- [2] ELSADEK A, GABER A, AFIFI H, et al. Microemboli versus hypoperfusion as an etiology of acute ischemic stroke in Egyptian patients with watershed zone infarction [J]. *Egypt J Neurol Psychiatr Neurosurg*, 2019, 55(1) : 2. DOI: 10.1186/s41983-018-0045-8.
- [3] WODARZ R. Watershed infarctions and computed tomography. A topographical study in cases with stenosis or occlusion of the carotid artery [J]. *Neuroradiology*, 1980, 19 (5) : 245-248. DOI: 10.1007/BF00347803.
- [4] LI Y, LI M, ZHANG X, et al. Clinical features and the degree of cerebrovascular stenosis in different types and subtypes of cerebral watershed infarction [J]. *BMC Neurol*, 2017, 17(1) : 166. DOI: 10.1186/s12883-017-0947-6.
- [5] MANGLA R, KOLAR B, ALMAST J, et al. Border zone infarcts: pathophysiologic and imaging characteristics [J]. *Radio Graphics*, 2011, 31(5) : 1201-1214. DOI: 10.1148/rg.315105014.
- [6] GAUDIELLO F, COLANGELO V, BOLACCHI F, et al. Sixty-four section CT cerebral perfusion evaluation in patients with carotid artery stenosis before and after stenting with a cerebral protection device [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2008, 29 (5) : 919-923. DOI: 10.3174/ajnr.A0945.
- [7] MOMJIAN M I AND BARON J C. The pathophysiology of watershed infarction in internal carotid artery disease: review of cerebral perfusion studies [J]. *Stroke*, 2005, 36 (3) : 567-577. DOI: 10.1161/01.STR.0000155727.82242.e1.
- [8] OLIVOT J M, MLYNASH M, THIJS V N, et al. Optimal Tmax threshold for predicting penumbral tissue in acute stroke [J]. *Stroke*, 2009, 40(2) : 469-475. DOI: 10.1161/STROKEAHA.108.526954.
- [9] CAMPBELL BRUCE C V, CHRISTENSEN S, LEVI C R, et al. Cerebral blood flow is the optimal CT perfusion parameter for assessing infarct core [J]. *Stroke*, 2011, 42: 3435-40. DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.618355.
- [10] MURPHY B D, FOX A J, LEE D H, et al. Identification of penumbra and infarct in acute ischemic stroke using computed tomography perfusion-derived blood flow and blood volume measurements [J]. *Stroke*, 2006, 37: 1771-7. DOI: 10.1161/01.STR.0000227243.96808.53.
- [11] YAMAUCHI H, HIGASHI T, KAGAWA S, et al. Impaired perfusion modifies the relationship between blood pressure and stroke risk in major cerebral artery disease [J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2013, 84: 1226-1232. DOI: 10.1136/jnnp-2013-305159.
- [12] KIM J H, LEE E J, LEE S J, et al. Comparative evaluation of cerebral blood volume and cerebral blood flow in acute ischemic stroke by using perfusion-weighted MR imaging and SPECT [J]. *Acta Radiol*, 2002, 43: 365-70. DOI: 10.1034/j.1600-0455.2002.430404.x.
- [13] 冯加纯, 饶明俐, 刘多三, 等. 分水岭脑梗塞的 CT, 临床及病因研究(附 94 例报告) [J]. *中风与神经疾病杂志*, 1991, 8(4) : 214-216.
- [14] North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators, BARNETT H J M, TAYLOR D W, et al. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis [J]. *N Engl J Med*, 1991, 325 (7) : 445-453. DOI: 10.1056/NEJM199108153250701.
- [15] CASSOLA N, BAPTISTA-SILVA J C, NAKANO L C, et al. Duplex ultrasound for diagnosing symptomatic carotid stenosis in the extracranial segments [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2022, 7 (7) : CD013172. DOI: 10.1002/14651858.CD013172.pub2.
- [16] HOWARD R, TREND P, RUSSELL R W. Clinical features of ischemia in cerebral arterial border zones after

- periods of reduced cerebral blood flow[J]. Arch Neurol, 1987, 44 (9) : 934-940. DOI: 10.1001/archneur.1987.00520210036016.
- [17] DERDEYN C P, KHOSLA A, VIDEEN T O, et al. Severe hemodynamic impairment and border zone--region infarction [J]. Radiology, 2001, 220: 195-201. DOI: 10.1148/radiology.220.1.r01j109195.
- [18] BALESTRINI S, PEROZZI C, Altamura C, et al. Severe carotid stenosis and impaired cerebral hemodynamics can influence cognitive deterioration [J]. Neurology, 2013, 80(23) : 2145-50. DOI: 10.1212/WNL.0b013e318295d71a.
- [19] MARSHALL R S, FESTA J R, CHEUNG Y K, et al. Cerebral hemodynamics and cognitive impairment: baseline data from the RECON trial[J]. Neurology, 2012, 78 (4) : 250-255. DOI: 10.1212/WNL.0b013e31824365d3.
- [20] YONG S W, BANG O Y, LEE P H, et al. Internal and cortical border-zone infarction: clinical and diffusion-weighted imaging features[J]. Stroke, 2006, 37(3) : 841-6. DOI: 10.1161/01.STR.0000202590.75972.39.
- [21] KHAN A A, PATEL J, DESIKAN S, et al. Asymptomatic carotid artery stenosis is associated with cerebral hypoperfusion [J]. J Vasc Surg, 2021, 73 (5) , 1611-1621. DOI: 10.1016/j.jvs.2020.10.063.
- [22] 张小喜, 是明启, 成红学, 等. 以认知障碍为主要表现的颈内动脉狭窄临床分析[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2022, 25(1) : 82-86. DOI: 10.12083/SYSJ.201106.
- [23] TAYLOR R A, KASNER S E. Natural history of asymptomatic intracranial arterial stenosis [J]. J Neuroimaging, 2009, 1: 17S-19S. DOI: 10.1111/j.1552-6569.2009.00416.x.
- [24] HOSODA K. The Significance of Cerebral Hemodynamics Imaging in Carotid Endarterectomy: A Brief Review [J]. Neurol Med Chir (Tokyo), 2015, 55 (10) : 782-788. DOI: 10.2176/nmc.ra.2015-0090.
- [25] JONGEN L M, VAN DER WORP H B, WAAIJER A, et al. Interrelation between the degree of carotid stenosis, collateral circulation and cerebral perfusion[J]. Cerebrovasc Dis, 2010, 30: 277-284.
- [26] TSUTSUI S, NANBA T, YOSHIOKA Y, et al. Preoperative brain temperature imaging on proton magnetic resonance spectroscopy predicts hemispheric ischemia during carotid endarterectomy for unilateral carotid stenosis with inadequate collateral blood flow[J]. Neurol Res, 2018, 40(8) : 617-623. DOI: 10.1080/01616412.2018.1457130.
- [27] HOSSMANN K A, HEISS W D. History of the Letzter Wiese/Last Meadow Concept of Brain Ischemia [J]. Stroke, 2016, 47 (3) : e46-50. DOI: 10.1161/STROKEAHA.115.010976.
- [28] WEILL C, SUISSA L, DARCOURT J, et al. The Pathophysiology of Watershed Infarction: A Three-Dimensional Time-of-Flight Magnetic Resonance Angiography Study [J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2017, 26 (9) : 1966-1973. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.06.016.
- [29] DONG M X, HU L, HUANG Y J, et al. Cerebrovascular risk factors for patients with cerebral watershed infarction: A case-control study based on computed tomography angiography in a population from Southwest China [J]. Medicine (Baltimore), 2017, 96(28) : e7505. DOI: 10.1097/MD.0000000000007505.
- [30] MOUSTAFA R R, MOMJIAN M, JONES P S, et al. Microembolism versus hemodynamic impairment in rosary-like deep watershed infarcts: a combined positron emission tomography and transcranial Doppler study [J]. Stroke, 2011, 42 (11) : 3138-3143. DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.616334.
- [31] MORIWAKI H, MATSUMOTO M, HASHIKAWA K, et al. Hemodynamic aspect of cerebral watershed infarction: assessment of perfusion reserve using iodine 123-iodoamphetamine SPECT [J]. J Nucl Med, 1997, 38(10) : 1556-1562.
- [32] 张秋洪, 陈汉水, 岳岑, 等. 尼莫地平负荷 SPECT 脑血流灌注显像在急性非致残性脑血管病中的诊断价值[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2019, 22(21) : 2334-2344.
- [33] KALARIA R. Neuropathological diagnosis of vascular cognitive impairment and vascular dementia with Implications for Alzheimer's disease [J]. Acta Neuropathol, 2016, 131(5) : 659-685. DOI: 10.1007/s00401-016-1571-z.
- [34] 高培毅, 林燕. 脑梗死前期脑局部低灌注的 CT 灌注成像表现及分期[J]. 中华放射学杂志, 2003, 37(10) : 882-886. DOI: 10.3760/j.issn:1005-1201.2003.10.005.
- [35] D'ESTERRE C D, AVIV R, LEE T Y. The evolution of the cerebral blood volume abnormality in patients with ischemic stroke: a CT perfusion study[J]. Acta Radiol, 2012, 53(4) : 461-7. DOI: 10.1258/ar.2012.110582.
- [36] SORGUN M H, RZAYEV S, YILMAZ V, et al. Etiologic Subtypes of Watershed Infarcts [J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2015, 24 (11) : 2478-2483. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2015.06.002.
- [37] HWANG K J, HEO S H, CHANG D I. Multiple microembolic brain infarctions in Clonorchis sinensis infestation [J]. J Neurol Sci, 2012, 319 (1/2) : 133-134. DOI: 10.1016/j.jns.2012.05.028.
- [38] IIDA H, LAW I, PAKKENBERG B, et al. Quantitation of regional cerebral blood flow corrected for partial volume effect using O-15 water and PET: I. Theory, error analysis, and stereologic comparison [J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2000, 20 (8) : 1237-1251. DOI: 10.1097/00004647-200008000-00009.
- [39] 王军杰, 吕爱红, 李兆妍. 血管超声对静脉溶栓疗效影响因素的研究 [J]. 中国实用神经疾病杂志, 2020, 23(8) : 706-710. DOI: 10.12083/SYSJ.2020.08.166.