

Arterial spin labeling combined with territory arterial spin labeling technology for evaluating collateral compensation in patients with severe stenosis or occlusion of unilateral middle cerebral artery

LIU Jiangjing, LI Chen, LIN Bin, WANG Lingting, ZHOU Zhipeng*

(Department of Radiology, Affiliated Hospital of Guilin Medical College, Guilin 541001, China)

[Abstract] **Objective** To observe the value of arterial spin labeling (ASL) combined with territory ASL (t-ASL) technology for evaluating collateral compensation in patients with severe stenosis or occlusion of unilateral middle cerebral artery (MCA). **Methods** Data of 52 patients with severe stenosis or occlusion of unilateral MCA (lesion group) were retrospectively analyzed. The patients were divided into poor collateral circulation subgroup ($n=23$) or good subgroup ($n=29$) based on relative cerebral blood flow (rCBF). Meanwhile, 55 healthy subjects were taken as controls (control group). Based on ASL (post labeling delay [PLD]=1 525, 2 525 ms) and t-ASL images, cerebral blood flow (CBF), rCBF and CBF difference (CBF in PLD 2 525 ms—CBF in PLD 1 525 ms) were compared between groups and subgroups within lesion group, and the source of collateral compensation was observed. The correlations of the above parameters and compensation status were explored using Kendall correlation analysis. **Results** Significant differences of CBF and CBF difference were found between the affected side of lesion group and the left side of control group, as well as of rCBF between groups (all $P<0.001$). In both groups, CBF on PLD=2 525 ms images were greater than that on PLD=1 525 ms images (both $P<0.05$), and CBF in the affected side was smaller than that in the opposite side in lesion group (all $P<0.05$). Significant differences of CBF and rCBF in the affected side, also of CBF difference (all $P<0.001$), as well as of the proportion of non collateral compensation and contralateral internal carotid artery (ICA)+vertebral basilar artery (VBA) compensation were found between subgroups within lesion group (both $P<0.05$). In lesion group, rCBF (PLD=2 525 ms) had low positive correlation with the presence of VBA collateral compensation ($r=0.397$, $P=0.004$). **Conclusion** ASL combined with t-ASL were helpful for evaluating collateral compensation in patients with unilateral MCA stenosis or occlusion.

[Keywords] middle cerebral artery; stenosis; occlusion; collateral circulation; arterial spin labeling; perfusion imaging

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.04.010

动脉自旋标记联合区域性动脉自旋标记技术评估 单侧大脑中动脉重度狭窄或闭塞患者侧支代偿

刘蒋静, 李晨, 林斌, 王玲廷, 周智鹏*

(桂林医学院附属医院放射科, 广西 桂林 541001)

[摘要] **目的** 观察动脉自旋标记(ASL)联合区域性 ASL(t-ASL)技术评估单侧大脑中动脉(MCA)重度狭窄或闭塞患者侧支代偿的价值。 **方法** 回顾性选取 52 例单侧 MCA 重度狭窄或闭塞患者(病变组), 根据相对脑血流量(rCBF)将其进一步分为侧支循环不良亚组($n=23$)及良好亚组($n=29$); 以 55 名健康体检者为对照组。基于 ASL[标记后延迟时间

[第一作者] 刘蒋静(1999—), 女, 广西柳州人, 在读硕士。研究方向: 头颈神经影像诊断学。E-mail: 1453534828@qq.com

[通信作者] 周智鹏, 桂林医学院附属医院放射科, 541001。E-mail: bigbird_zhou@hotmail.com

[收稿日期] 2023-12-22 [修回日期] 2024-01-31

(PLD)=1 525、2 525 ms]和 t-ASL 图像比较组间及病变组内亚组间脑血流量(CBF)、rCBF 及 CBF 差值(PLD 2 525 ms 下 CBF-PLD 1 525 ms 下 CBF),观察侧支代偿来源;以 Kendall 相关性分析评估各参数与代偿的相关性。**结果** 病变组患侧与对照组左侧 CBF、CBF 差值的差异及组间 rCBF 差异均有统计学意义(P 均 <0.001),且 2 组 PLD=2 525 ms 下 CBF 均大于 PLD=1 525 ms(P 均 <0.05),病变组患侧 CBF 均小于对侧(P 均 <0.05)。病变组内 2 亚组间 CBF 差值、患侧 CBF 及 rCBF 差异(P 均 <0.001),以及侧支无代偿和对侧颈内动脉(ICA)+椎基底动脉(VBA)代偿占比差异均有统计学意义(P 均 <0.05)。病变组 rCBF(PLD=2 525 ms)与存在 VBA 侧支代偿呈低度正相关($r=0.397, P=0.004$)。**结论** ASL 联合 t-ASL 有助于评估单侧 MCA 狭窄或闭塞患者侧支代偿情况。

[关键词] 大脑中动脉;狭窄;闭塞;侧支循环;动脉自旋标记;灌注成像

[中图分类号] R743; R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2024)04-0526-05

我国脑血管疾病致死率居于首位,且缺血性脑血管疾病致残率亦较高^[1]。急性脑卒中患者颅内动脉侧支循环状态及颅内责任血管能否成功再通对于挽救缺血脑组织十分重要,同时影响预后^[2]。数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)是评估急性脑卒中责任血管及侧支血管的金标准,但有创且具有一定风险^[3]。CT 血管造影(CT angiography, CTA)及 CT 灌注(CT perfusion, CTP)可一站式评估急性缺血性脑卒中,但不适用于存在对比剂不良反应者^[4]。动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL)技术可利用标记后延迟时间(post labeling delay, PLD)定量评估脑血流量(cerebral blood flow, CBF);基于 ASL 的区域性 ASL(territory ASL, t-ASL)能以动脉血中的氢质子为内源性示踪剂,通过标记双侧颈内动脉(internal carotid arteria, ICA)及椎基底动脉(vertebral basilar artery, VBA)实现单支血管灌注区域成像,有助于观察缺血区域侧支循环来源及开放情况^[5]。本研究观察 ASL 联合 t-ASL 评估单侧大脑中动脉(middle cerebral artery, MCA)狭窄或闭塞患者侧支代偿的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性收集 2021 年 9 月—2023 年 5 月于桂林医学院附属医院接受头颅 MR 检查的 52 例单侧 MCA 重度狭窄或闭塞患者(病变组),男 35 例、女 17 例,年龄 30~77 岁、平均(55.5±10.0)岁。纳入标准:①MRA 显示单侧 MCA 重度狭窄(狭窄程度 $>75\%$)或闭塞,颅内其他动脉仅轻度狭窄或无狭窄;②接受常规 MR、ASL(PLD=1 525、2 525 ms)及 t-ASL 检查。排除资料不全而无法判断侧支代偿情况者。另以同期 55 名接受健康体检者为对照组,男 28 名、女 27 名,年龄 19~71 岁、平均(43.7±17.2)岁;纳入标准同病变组②。本研究获医院伦理委员会批准(2022YJSLL-36),受试者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用 GE 3.0T Signa Architect

MR 仪、48 通道专用颅脑接收线圈。嘱受试者仰卧接受颅脑扫描,采集 T1WI、T2WI、Sag 3D T1 脑容积成像(brain volume imaging, BRAVO)、液体衰减反转恢复(fluid attenuated inversion recovery, FLAIR) T2WI,行 Cor silenz MRA、弥散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)、ASL 灌注成像(PLD = 1 525、2 525 ms)、t-ASL 成像;ASL 参数为 TR 4 685 ms、5 380 ms, TE 53.5 ms, FOV 269 mm×240 mm,矩阵 512×512,层厚 4 mm;行 t-ASL 时,以超选择性 ASL(super-selective ASL, SS-ASL)标记 ICA,以血管编码 ASL(vessel-encoded ASL, VE-ASL)标记 VBA, TR 4 642 ms, TE 53.5 ms, FOV 269 mm×240 mm,矩阵 512×512,层厚 4 mm。

1.3 图像处理 由分别具有 3 年及 23 年工作经验的医师及主任医师各 1 名于 GE AW4.7 工作站分析图像。选择 PLD=1 525 ms、2 525 ms 的 ASL CBF 图,对病变组于靠近侧脑室水平的 3 个层面勾画患侧 MCA 供血区域作为 ROI,并对称投射至对侧,联合 t-ASL 评估患侧区域侧支代偿血管来源;于对照组 3 个相应层面中的左侧 MCA 供血区域勾画 ROI,并投射至对侧;以 3 个层面 ROI 的平均 CBF 为结果,计算 CBF 差值(PLD 2 525 ms 下 CBF-PLD 1 525 ms 下 CBF)和患侧/左侧与对侧 CBF 比值[即相对 CBF(relative CBF, rCBF)];以 rCBF(PLD=2 525 ms) <0.8 为低灌注、 $0.8\sim1.2$ 为等灌注、 >1.2 高灌注,并将病变组中的低灌注者归入侧支循环不良亚组(不良亚组),将等灌注及高灌注者归入侧支循环良好亚组(良好亚组)。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 25.0 统计分析软件。以 $\bar{x}\pm s$ 表示符合正态分布的计量资料,行独立样本 t 检验;采用 χ^2 检验比较计数资料。以单项随机效应模型计算组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)评估观察者间勾画 ROI 并测量 CBF 的一致性,ICC >0.75 为一致性好。采用 Kappa 检验

评估观察者间判断侧支代偿来源的一致性:以 Kappa 值 >0.75 为一致性良好,0.40~0.75 为中等,<0.40 为差。行 Kendall 相关性分析,以 |r|<0.4 为低度相关,0.4~0.7 为中度相关,>0.7 为高度相关。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

观察者间勾画 ROI 并测量 CBF 的一致性均好 (ICC = 0.756~0.987, P 均 <0.001)。病变组患侧与对照组左侧 MCA 供血区域 CBF、CBF 差值的差异及组间 rCBF 差异均有统计学意义 (P 均 <0.001),且 2 组 PLD = 2 525 ms 下的 CBF 均大于 PLD = 1 525 ms (P 均 <0.05),病变组患侧 CBF 均小于对侧 (P 均 <0.05);见表 1。病变组内亚组间 CBF 差值、患侧 CBF 及 rCBF 差异均有统计学意义 (P 均 <0.001),见表 2。

观察者间评估侧支代偿血管来源的一致性均良好 (Kappa 值均 >0.75)。病变组内不良亚组与良好亚组侧支无代偿及对侧 ICA+VBA 代偿者占比差异均有统计学意义 (P 均 <0.05)。见表 3 及图 1。

病变组 rCBF (PLD=2 525 ms) 与存在 VBA 侧支代偿呈低度正相关 (r=0.397, P=0.004)。

3 讨论

动脉通过时间 (arterial transit time, ATT) 指动脉血从标记层面流入采集层面的时间间隔。ASL 灌注图像在 PLD 时间与 ATT 完全一致时质量最高;而 PLD 需足够长,以使血液到达毛细血管床^[6]。以 ASL 定量测量 MCA 灌注区域不同时期 CBF、联合 t-ASL 可评估患侧侧支代偿能力;联合应用 ASL、t-ASL 及 MRA 能有效评估颅内血管狭窄或闭塞后的二级侧支代偿开放情况^[7]。目前 ASL 及 t-ASL 多用于研究烟雾病^[5,8]、动静脉血管畸形^[9]、颅内脑膜瘤^[10] 及非动脉硬化脑疾病^[11] 等。

本研究发现,2 组 PLD=2 525 ms 下的 CBF 均大

表 1 单侧 MCA 重度狭窄/闭塞患者与健康人 MCA 供血区域 CBF 比较

组别	CBF(PLD=1 525 ms) [ml/(100 g·min)]		CBF(PLD=2 525 ms) [ml/(100 g·min)]	
	患侧/左侧	对侧	患侧/左侧	对侧
病变组 (n=52)	22.91±6.92*#	38.76±8.93*	37.92±9.13#	45.43±6.74
对照组 (n=55)	37.80±7.63*	38.95±7.58*	44.36±5.66	44.20±5.57
t 值	10.555	0.123	4.355	-1.003
P 值	<0.001	0.902	<0.001	0.304

组别	CBF 差值 [ml/(100 g·min)]		rCBF (PLD=1 525 ms)	rCBF (PLD=2 525 ms)
	患侧/左侧	对侧		
病变组 (n=52)	15.02±5.67	6.84±7.78	0.60±0.14	0.85±0.20
对照组 (n=55)	6.63±5.20	5.38±4.97	0.90±0.13	1.01±0.09
t 值	-7.992	-1.152	11.498	5.381
P 值	<0.001	0.252	<0.001	<0.001

注: * : 与同侧别 CBF(PLD=2 525 ms) 相比 P<0.05; # : 与相同 PLD 下的对侧相比 P<0.05

表 2 侧支循环不良与良好的单侧 MCA 重度狭窄/闭塞患者 MCA 供血区域 CBF 比较

亚组别	CBF(PLD=1 525 ms) [ml/(100 g·min)]		CBF(PLD=2 525 ms) [ml/(100 g·min)]	
	患侧	对侧	患侧	对侧
不良亚组 (n=23)	17.80±3.08	35.94±7.63	30.37±5.19	46.37±5.85
良好亚组 (n=29)	26.97±6.42	40.99±9.38	43.91±6.84	44.68±7.39
t 值	6.773	2.096	7.861	-0.894
P 值	<0.001	0.041	<0.001	0.376

亚组别	CBF 差值 [ml/(100 g·min)]		rCBF (PLD=1 525 ms)	rCBF (PLD=2 525 ms)
	患侧	对侧		
不良亚组 (n=23)	12.60±4.61	10.81±6.60	0.51±0.13	0.66±0.12
良好亚组 (n=29)	16.94±5.76	3.69±7.27	0.67±0.10	0.99±0.11
t 值	2.935	-3.655	4.749	10.392
P 值	0.005	0.001	<0.001	<0.001

表 3 侧支循环不良与良好的单侧 MCA 重度狭窄/闭塞侧支代偿来源 (例)

亚组别	无代偿	对侧 ICA	VBA	对侧 ICA+VBA
不良亚组 (n=23)	5	8	10	0
良好亚组 (n=29)	0	3	16	10
χ ² 值	4.698	3.244	0.702	7.725
P 值	0.008	0.072	0.402	0.005

于 PLD=1 525 ms, 表明 PLD 足够长时可显示相对缓慢的血流;病变组患侧 CBF 均小于对侧,且 rCBF (PLD=1 525 ms) 均低于 0.8, 提示患侧呈低灌注改变;同时,病变组 PLD=2 525 ms 下的 rCBF 稍高于 PLD=1 525 ms, 意味着患侧存在血流信号, 提示存在侧支代偿。既往研究^[12] 表明, 急性期脑梗死患者梗死区域于 ASL (PLD=1 525 ms、2 525 ms) 中呈高灌注状态与脑组织侧支循环代偿或血管再通有关, 提示梗死后

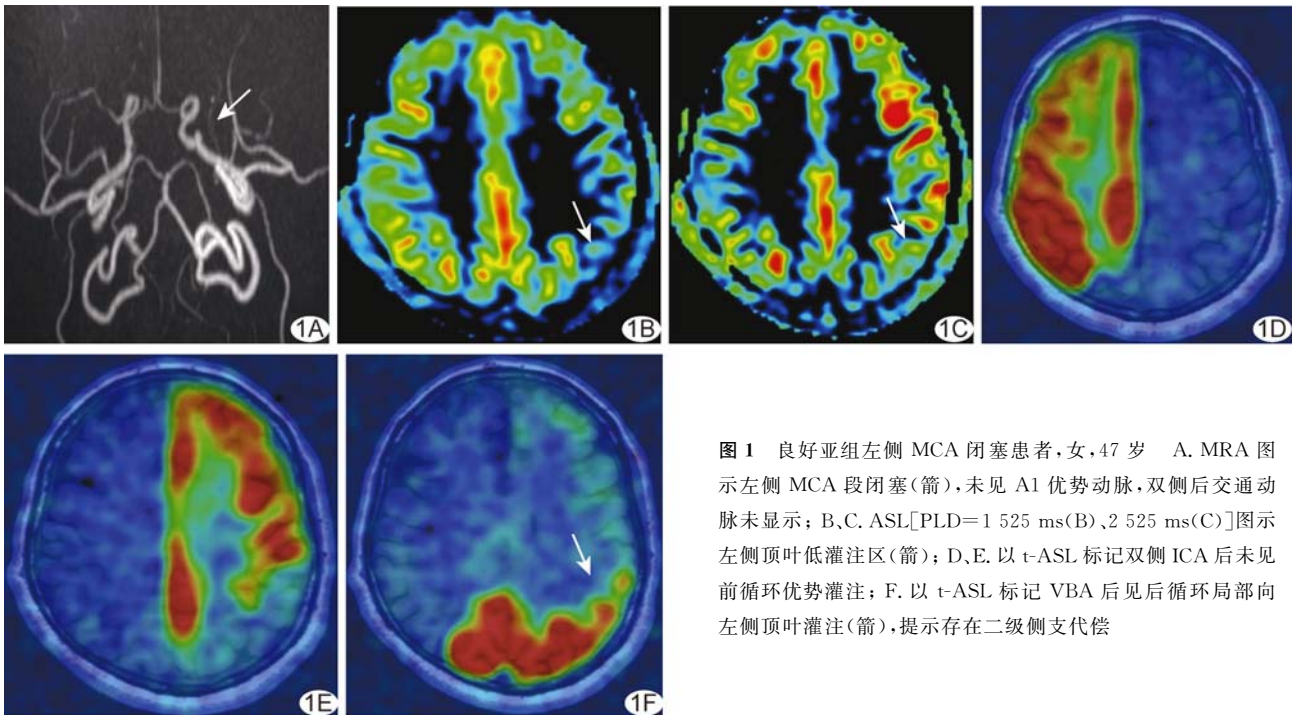


图 1 良好亚组左侧 MCA 闭塞患者,女,47 岁 A. MRA 图示左侧 MCA 段闭塞(箭),未见 A1 优势动脉,双侧后交通动脉未显示; B、C. ASL[PLD=1 525 ms(B)、2 525 ms(C)]图示左侧顶叶低灌注区(箭); D、E. 以 t-ASL 标记双侧 ICA 后未见前循环优势灌注; F. 以 t-ASL 标记 VBA 后见后循环局部向左侧顶叶灌注(箭),提示存在二级侧支代偿

血脑屏障被破坏而存在出血倾向。本研究病变组 2 例单侧 MCA 闭塞后急性脑梗死 ASL 呈高灌注,随访显示颅内梗死区均未见明显出血,推测与侧支循环代偿或血管再通有关。利用 ASL 技术有助于评估单侧 MCA 重度狭窄或闭塞患者脑血流动力状态及预测预后;PLD=1 525 ms ASL 有助于检测脑灌注不足,而 PLD=2 525 ms ASL 能更准确地显示低灌注范围^[13]。

t-ASL 可用于评估单侧 MCA 重度狭窄或闭塞患者侧支代偿来源。MCA 重度狭窄或闭塞患者颅内存在胚胎型大脑后动脉 (posterior cerebral artery, PCA) 时,同侧前循环灌注范围可扩大到后循环至枕叶部分;存在大脑前 A1 优势动脉时则前循环向对侧灌注。PCA 偏侧优势指一侧 MCA 重度狭窄或闭塞后该侧 PCA 血流量较对侧更多,MRA 提示 PCA 较对侧增粗、延长;既往研究^[14]发现,单侧 MCA M1 段狭窄或闭塞后 PCA 出现偏侧优势提示 PCA 与 MCA 之间已建立软脑膜侧支循环,预示预后良好。本研究以 t-ASL 评估前 MRA 显示病变组不良亚组 5 例大脑前交通动脉开放、9 例 A1 优势动脉、8 例大脑后交通动脉、7 例胚胎型 PCA,在良好亚组则分别为 3、12、9 及 8 例;无侧支代偿多见于不良亚组,而对侧 ICA + VBA 联合代偿多见于良好亚组,且 rCBF (PLD = 2 525 ms) 与 VBA 侧支代偿呈低度正相关;病变组 32 例可见 VBA 偏侧优势灌注(图 1),提示存在二级侧支

循环。

综上,ASL 联合 t-ASL 有助于评估单侧 MCA 狭窄或闭塞患者侧支代偿。本研究的主要局限性:①为单中心回顾性分析,且样本量较小;②t-ASL 无法定量 CBF,有待后续进一步观察。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:刘蒋静研究设计、数据分析、图像处理和分析、撰写和修改文章;李晨图像处理和数据分析;林斌研究设计、数据分析;王玲廷查阅文献;周智鹏指导、审阅文章、经费支持。

[参考文献]

- [1] 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,中华医学会神经病学分会神经血管介入协作组. 中国急性缺血性卒中早期血管内介入诊疗指南 2022[J]. 中华神经科杂志, 2022, 55(6):565-580.
- [2] 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.
- [3] XIANG S, FAN F, HU P, et al. The sensitivity and specificity of TOF-MRA compared with DSA in the follow-up of treated intracranial aneurysms[J]. J Neurointerv Surg, 2021, 13(12): 1172-1179.
- [4] MO X, CUI Y, YUAN J, et al. Study on a new "One-stop-shop" scan protocol combining brain CT perfusion and head-and-neck CT

- angiography by using 256-detector CT for stroke patients[J]. Eur J Radiol, 2022, 154:110426.
- [5] SEE A P, STOUT J N. Cerebrovascular reserve in moyamoya requires more standardization: Editorial on ASL-MRI guided evaluation of multiple burr hole revascularization surgery in moyamoya disease[J]. Acta Neurochir (Wien), 2023, 165(8): 2071-2072.
- [6] WANG Y, GREER J S, ZHOU L, et al. A 3D-printed phantom for quality-controlled reproducibility measurements of arterial spin labeled perfusion[J]. Magn Reson Med, 2024, 91(2):819-827.
- [7] XU F, ZHU D, FAN H, et al. Magnetic resonance angiography and perfusion mapping by arterial spin labeling using Fourier transform-based velocity-selective pulse trains: Examination on a commercial perfusion phantom[J]. Magn Reson Med, 2021, 86(3):1360-1368.
- [8] GAO X Y, LI Q, LI J R, et al. A perfusion territory shift attributable solely to the secondary collaterals in moyamoya patients: A potential risk factor for preoperative hemorrhagic stroke revealed by t-ASL and 3D-TOF-MRA[J]. J Neurosurg, 2019:1-9.
- [9] TOGAO O, OBARA M, HELLE M, et al. Vessel-selective 4D-MR angiography using super-selective pseudo-continuous arterial spin labeling may be a useful tool for assessing brain AVM hemodynamics[J]. Eur Radiol, 2020, 30(12):6452-6463.
- [10] PANIGRAHI M, BODHEY N K, PATI S K, et al. Differentiation between various types and subtypes of intracranial meningiomas with advanced MRI[J]. SA J Radiol, 2022, 26(1):2480.
- [11] 邓颖欣, 肖新兰, 舒婷, 等. 自身免疫性脑炎动脉自旋标记灌注表现[J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(1):150-152.
- [12] 中华医学会放射学分会质量管理与安全管理学组, 中华医学会放射学分会磁共振学组. 动脉自旋标记脑灌注 MRI 技术规范应用专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2016, 50(11):817-824.
- [13] ZHOU J, HE J, WANG W. Application of 3D-ASL in hemodynamic analysis and prognosis evaluation of vascular cognitive impairment[J]. Am J Transl Res, 2022, 14(11):7960-7968.
- [14] 周建国, 卢明聪, 孟云, 等. 单侧大脑中动脉 M1 段闭塞后脑动脉硬化与侧支循环建立相关性研究[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(2):212-216.

使用阿拉伯数字和汉字数字的一般原则

根据 GB/T 15835《出版物上数字用法的规定》

(1) 在统计图表、数学运算、公式推导中所有数字包括正负整数、小数、分数、百分数和比例等, 都必须使用阿拉伯数字。

(2) 在汉字中已经定型的词、词组、成语、缩略语等都必须使用汉语数字, 例如: 一次方程、三维超声、二尖瓣、法洛四联症、星期一、五六天、八九个月、四十七八岁等。

(3) 除了上述情况以外, 凡是使用阿拉伯数字而且又很得体的地方, 都应该使用阿拉伯数字。遇到特殊情况时, 可以灵活掌握, 但应该注意使全篇同一。

(4) 如果数字的量级小于 1 时, 小数点前面的零(0)不能省去, 如 0.32 不能写成.32。