

论 著

MRI动脉自旋标记和经颅多普勒超声测量静息脑血流动力学研究*

黄伟¹ 范斌² 李倩楠³
尹安⁴ 王礼星^{5,*} 袁超⁶

1.深圳市宝安区中心医院超声医学科

TCD室 (广东 深圳 518101)

2.空军军医大学第一附属医院肝胆外科

(陕西 西安 710000)

3.西北大学附属第一医院(西安市第一

医院)健康体检部 (陕西 西安 710001)

4.中国人民解放军郑州联勤保障中心临潼

康复疗养中心训练康复科

(陕西 临潼 710600)

5.中国人民解放军联勤保障部队第九四〇

医院超声科 (甘肃 兰州 730030)

6.南方医科大学南方医院 (广东 广州 515000)

【摘要】目的 评估MRI动脉自旋标记和经颅多普勒超声测量静息脑血流动力学价值。方法 35名健康志愿者(青年组20人,老年组15人)完成两次实验(TCD/MRI)。评估了成像方式内和成像方式之间的老化和健康影响。结果 与年轻受试者相比,老年受试者大脑中动脉血流速度(MCAV, TCD)降低,通过时间(MRI)减慢($P<0.05$)。年轻组的灰质脑血流灌注(MRI)高于老年组,但差异不显著($P=0.13$)。年轻组的运动效果与老年组相反。整个队列通过时间与MCAV相关($r=\text{TCD}0.63$; $P<0.05$),而组织灌注量与一测量无关。结论 TCD和MRI提供了互补的静息CBF测量,值得推广。

【关键词】MRI动脉自旋标记; 经颅多普勒超声; 静息脑血流动力学

【中图分类号】R730.41

【文献标识码】A

【基金项目】2023年度广东省医学科学基金指令性课题项目(C2023066)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.04.012

A Study on Resting Cerebral Hemodynamics Measured by MRI Arterial Spin Labeling and Transcranial Doppler Ultrasound*

HUANG Wei¹, FAN Bin², LI Qian-nan³, YIN An⁴, WANG Li-xing^{5,*}, YUAN Chao⁶.

1.TCD Room, Ultrasound Medicine Department, Bao'an Central Hospital of Shenzhen, Shenzhen 518101, Guangdong Province, China

2.Department of Hepatobiliary Surgery, The First Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an, Shaanxi 710000, China

3.Department of Health Examination, the First Affiliated Hospital of Northwest University(Xi'an NO.1 Hospital), Xi'an 710001, Shaanxi Province, China

4.Department of Training rehabilitation, Lintong Rehabilitation Center, Zhengzhou Joint Logistics Support Center of the People's Liberation Army of China Lintong 710600, Shaanxi Province, China

5.Department of Ultrasound, 940 Hospital of the Joint Logistics Support Force of the People's Liberation Army of China, Lanzhou 730030, Gansu Province, China

6.Nanfang Hospital, Southern Medical University, Guangzhou 515000, Guangdong Province, China

ABSTRACT

Objective To evaluate the value of MRI arterial spin labeling and transcranial Doppler ultrasound in measuring resting cerebral hemodynamics. **Methods** 35 healthy volunteers (20 in the youth group and 15 in the elderly group) completed two experiments (TCD/MRI). Evaluated the aging and health impacts within and between imaging methods. **Results** Compared with young participants, the middle cerebral artery blood flow velocity (MCAV, TCD) of elderly participants decreased and slowed down over time (MRI) ($P<0.05$). The gray matter cerebral blood flow perfusion (MRI) of the young group was higher than that of the elderly group, but the difference was not significant ($p=0.13$). The exercise effect of the young group is opposite to that of the elderly group. The entire queue was correlated with MCAV over time ($r=\text{TCD}0.63$; $P<0.05$), while tissue perfusion was not related to measurement. **Conclusion** TCD and MRI provide complementary resting CBF measurements and are worth promoting.

Keywords: MRI Arterial Spin Labeling; Transcranial Doppler Ultrasound; Resting Cerebral Hemodynamics

静息脑血流量(CBF)和灌注测量已被用来确定大脑健康状况。测量静息脑血流的两种最常见的神经成像方法是经颅多普勒(TCD)超声和动脉自旋标记(ASL)磁共振成像(MRI)^[1]。基于TCD的测量包括大脑中动脉血流速度(MCAV)和/或脑血管电导(CVCI)[通过MCAV除以平均动脉压(MAP)计算出来],通常用于评估静息CBF^[2]。ASL MRI测量通常用于评估跨所有灰质组织(全球灌注)或特定感兴趣区域(ROI)内的灰质组织的脑血流灌注^[3]。

由于TCD和ASL MRI针对的是血管树的不同方面, TCD针对的是血管中的特定点(例如MCA的中心区域),而ASL是测量由大量微血管组成的组织中的血流灌注;不能假设两种模式的测量结果将直接相关^[4]。此外,由于每种模式报告了多个指标(TCD: MCAV, CVCI; ASL: 脑血流灌注, 转运时间),尚不清楚哪种指标将在不同模式之间关系最密切^[5]。因此,系统地考虑这些模式和指标之间的差异是否会改变对不同组之间静息CBF测量差异的解释是重要的,这取决于用于评估静息CBF的成像模式^[6]。因此,这项研究的目的是检验这些方法的差异是否改变了预期静息CBF差异的组之间的静息CBF的相对结果测量(即, 年轻/老年和适合/不适合)。

1 资料与方法

1.1 研究资料 纳入2023年1月至2023年12月来我院参加健康体检的健康志愿者35名,分为两个年龄组: 20名年轻志愿者,平均年龄(24 ± 7)岁; 15名老年志愿者,平均年龄(66 ± 7)岁。如果参与者有任何神经或精神疾病,或者12导联心电图(ECG)显示有任何异常,则将其排除在外。根据最大耗氧量(VO_2max)体能测试的表现,将组进一步分为健康组和不健康组。35名受试者完成了静息TCD和MRI CBF测量。

1.2 研究方法 参与者总共完成了五次访问。第一次访问包括一般健康筛查、核磁共振安全筛查、健康问卷和心电图(如果超过50岁)。第二次访问包括在跑步机或固定自行车上进行有氧健身测试。第三次访问是利用TCD和CBF。最后两次访问涉及收集CBF测量,一次使用TCD,另一次使用MRI。有氧适应能力由最大耗氧量(VO_2max)测试确定。所有的休息测量都是从参与者在一天中的同一时间仰卧休息至少20分钟后呼吸室内空气的时间段开始记录的。对于TCD治疗, 仰卧位休息时间包括定位左右大脑中动脉和补充生理测量(如下所述)。对于MRI检查, 仰卧期包括熟悉扫描环境和计划实验扫描所需的标准设置扫描。

TCD检查^[3]: 使用经颅多普勒超声(TCD)测量左右两侧大脑中动脉(MCAV)的血流速度, 2 MHz探头分别放置在左右两侧的颞窗上。探头用超声波凝胶制备,并用耳机固定到位。用三导联心电图连续监测心率和电活动。呼气末二氧化碳分压(PetCO_2)是从受试

【第一作者】黄伟,女,副主任医师,主要研究方向:经颅多普勒超声。E-mail: haixiaifeifei@yeah.net

【通讯作者】王礼星,女,副主任医师,主要研究方向:心脏血管疾病超声诊断及介入治疗。E-mail: 857562464@qq.com

者在测试过程中呼气的口罩中逐一呼吸采集的, 口罩上连接气体分析仪。使用LabChart软件通过模数转换器记录这些数据。

MRI检查^[5,7]: 所有MRI数据均在3T飞利浦Achieva磁共振扫描仪上采集。所有数据采集均采用全身发射线圈和32通道头部接收线圈。为了能够使用MRI定量静息血流灌注, 使用具有二维回波平面成像(2D-EPI)读数的血流敏感交替反转恢复(FAIR)脉冲ASL序列(2D-EPI, 1995)采集图像。扫描持续10分钟。成像参数为: 回声时间(TE): 9ms; 重复时间(TR): 8 S; 反转次数(TIS): 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 S; 体素大小: 平面 3.25×3.25 mm; 层厚: 5 mm; 层厚: 12; 视野: 212×212 mm; 无背景抑制或血管压碎; 平行成像灵敏度编码(感觉因子): 2.5。对所有受试者的灰质和不同感兴趣区的平均脑血流灌注和通过时间进行了测定。此外, 通过平均参与者个体的平均脑灌注和通过时间图, 分别为所有参与者以及年轻组和老年组创建了平均脑灌注和通过时间组图。心率是根据ASL采集期间采集的心电向量图计算的, 并在整个时间段内平均。从LabChart软件中

记录的呼出呼气轨迹的峰值获得 $PETCO_2$ 。将这些值与TCD数据采集访问中采取的不同测量方法进行比较。

1.4 统计学方法 使用Spearman相关系数对不同成像方式的静息脑血流测量进行比较。P值小于0.05被认为具有统计学意义, 统计软件采用SPSS 26.0。为了校正TCD和MRI测量之间的多重比较, 我们通过除以比较次数来调整P值。

2 结果

2.1 不同年龄静息脑血流测量分析 具体如图1所示, 年轻和老年参与者在MCAV($P=0.008$)和CVCi($P=0.005$)的测量方面存在显著的组间差异, 年轻组的这两项测量的平均值比老年组高约30%。正如预期的那样, 与不匹配组相比, 老年匹配组的MCAV和CVCi更高(分别为31%和60%), 尽管只对CVCi测量有显著意义($P=0.016$; MCAV: $P=0.099$)。相比之下, 与不匹配的同龄人相比, 年轻匹配组的平均MCAV和CVCi较低(分别为23%和7%), 尽管仅在MCAV测量方面显著(MCAV: $P=0.024$ 和CVCi: $P=0.170$)。

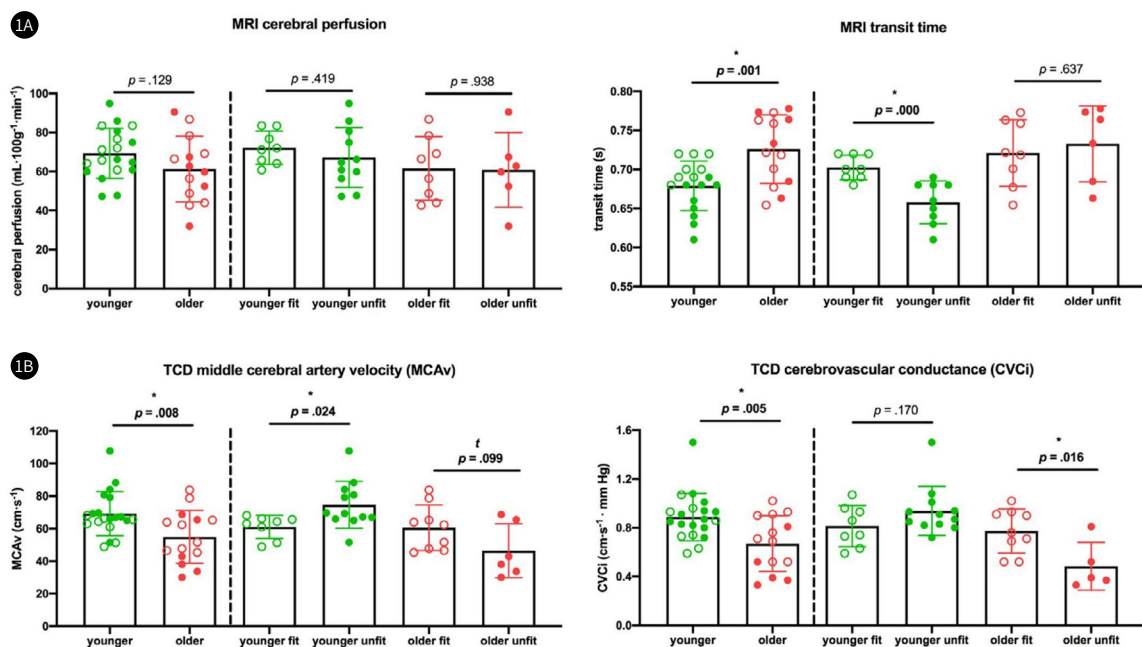
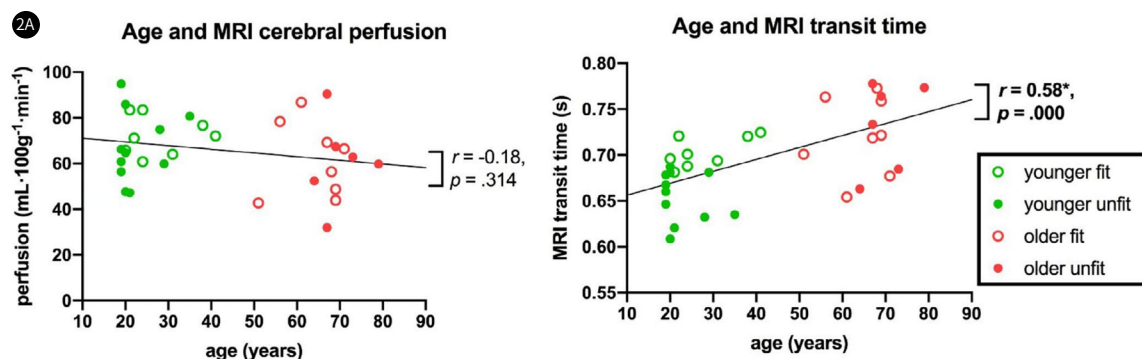


图1A-图1B 不同年龄静息脑血流测量分析。显示了从(1A)磁共振数据和(1B)经颅多普勒数据获得的静息脑血流测量的平均和单个参与者数。缩写: CVCi, 脑血管电导; MCAV, 大脑中动脉血流速度; MRI, 磁共振成像; TCD, 经颅多普勒。

2.2 不同年龄与静息脑血流的相关性 具体如图2所示, 随着年龄的增加, MCAV和CVCi都在以每10年为一阶段下降($P<0.05$)。

2.3 运动后不同年龄静息脑血流测量分析 具体如图3所示, 在低龄组中, 体能与灰质转运时间显著相关($r=0.85$; $P<0.001$),

其中适应度增加与更长的运输时间相关(图3A)。在年轻人群中, 健康与MCAV呈负相关($r = -0.64$; $P = 0.003$), 而CVCi无显著相关性(图3B)。相比之下, 老龄组的适应度与CVCi呈正相关($r=0.68$; $P<0.010$), 与MCAV无显著相关性(图3B)。



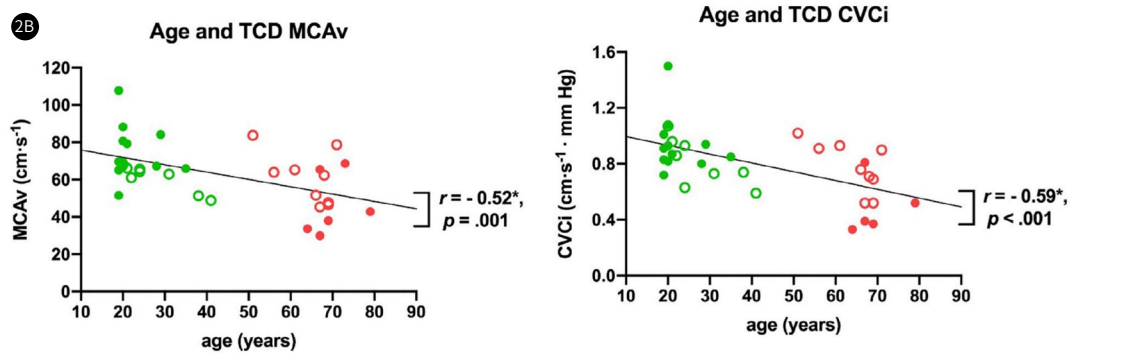


图2A-图2B 年龄与不同静息CBF测量值的相关性。(2A)MRI灰质(GM)脑灌注和GM传递时间;(2B)TCD MCAv和CVCi。

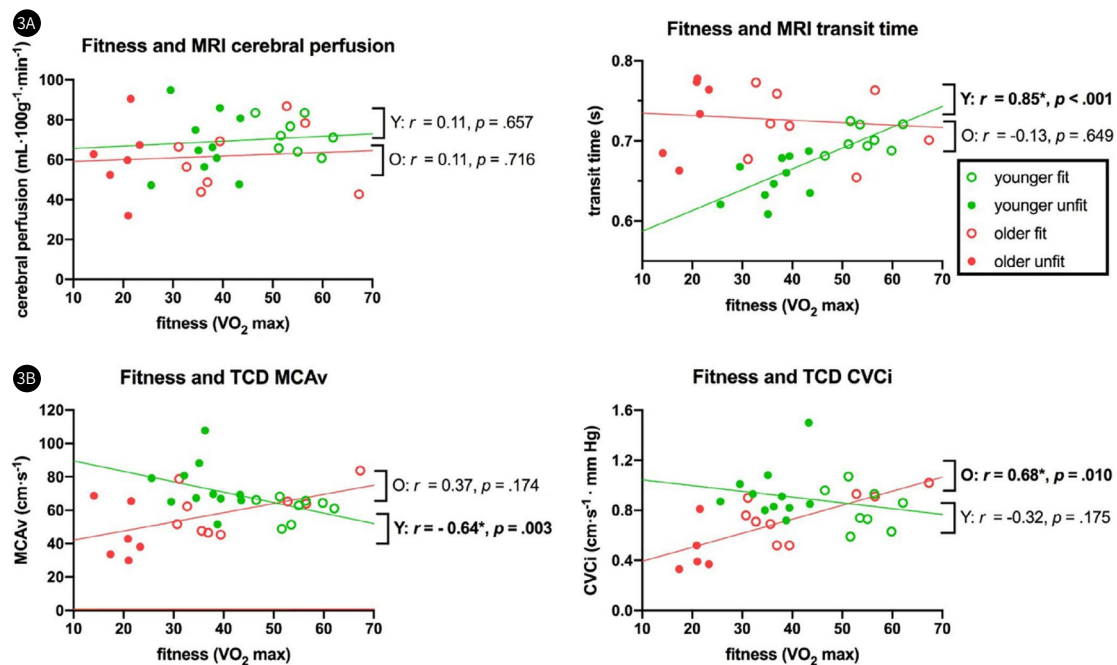


图3A-图3B 年轻组(绿色)和老年组(红色)的适应度($V \cdot O_{2max}$)与静息CBF测量值的相关性。(3A) MRI GM脑灌注和GM传递时间,(3B)TCD MCAv和CVCi。最佳拟合线分别显示了年轻人和老年人的Spearman的r和显著性值。

2.4 脑血流测量分析相关性 具体如图4所示, ASL脑血流灌注和TCD的MRI灌注测量结果与使用MCAv和CVCi评估的基于TCD的CBF静息测量结果没有相关性(图4A)。所有灰质CBF的ASL通过时

间和TCD: ASL-MRI通过时间测量与所有TCD静息CBF测量结果呈负相关(MCAv: $P < 0.001$ 和CVCi: $P = 0.01$)(图4B)。

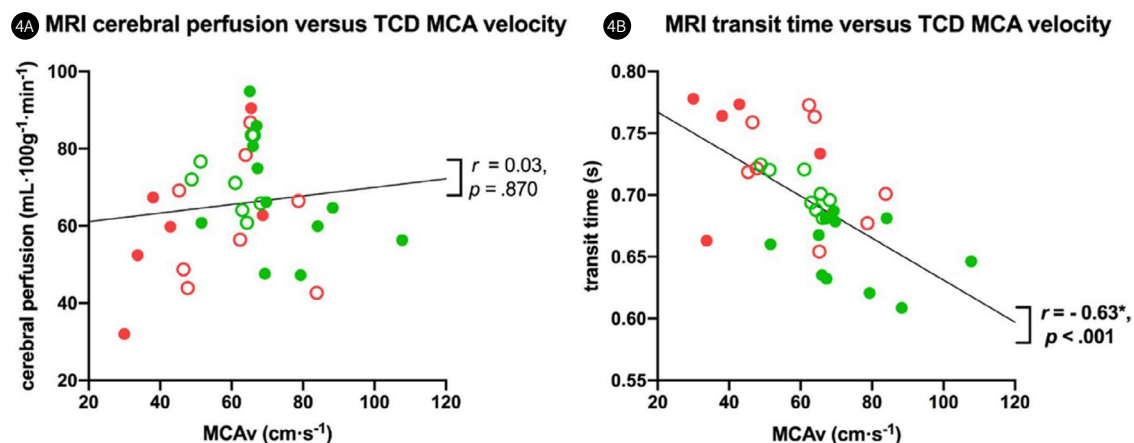


图4A-图4B (4A)MRI灰质血流灌注与TCD大脑中动脉血流速度、(4B)MRI灰质通过时间与TCD大脑中动脉血流速度的相关性。

3 讨 论

TCD测量结果显示,与年轻组相比,老年组的静息MCAV和CVCI显著降低。MRI测量结果显示,在整个灰质(和所有感兴趣区)中,老年组的静息脑血流灌注低于年轻组,尽管组内差异仅在枕叶和顶叶显著^[7]。在整个灰质和所有感兴趣区中,老年组的通过时间比年轻组更长。这些发现与之前使用TCD或MRI的报告一致,并如假设的那样,显示了同一队列中不同模式之间的良好一致性^[8]。对整个队列的相关分析表明,随着年龄的增加,MCAV和CVCI指标都减少了^[9]。

虽然并不是在所有灰质中都观察到了年龄对CBF灌注量的影响,但在枕叶的年轻和老年参与者之间观察到了显著的CBF灌注量差异(年轻组高37%)^[10]。在静息CBF测量中,年轻组和老年组之间观察到了相反的健身效果^[11]。年龄较大的FIT组静息CVCI和MCAV较高,转运时间稍短(图1和图3)^[12]。老年组的发现与大多数现有文献一致,这些文献报告了更高的静息CBF(无论是灌注还是MCAV),具有更好的适应性。我们在我们的TCD测量(图1和3B)中看到了与这些先前报告一致的明显效果,而在MRI ASL(图1和3A)测量中的效果非常弱,并不显著^[13]。这种微弱的效果可能是由于我们被要求使用的筛选过程(所有年龄较大的参与者都必须接受锻炼前评估-参见方法),这意味着即使我们不适合的小组也相对健康^[14]。或者,我们使用多反转时间MRI ASL序列将确保更准确地估计当通过时间在整个组中变化时的血流灌注,因此,与使用单一TI的研究相比,我们在老年组中观察到的灌注效应可能会因此而降低^[15]。相反,在不适合组中,较年轻的队列显示出比适合组更高的MCAV,这得到了CBF转运时间差异的支持(图1和图3)^[16]。这一发现与以前关于静息CBF和不同年龄健康状况的大部分工作不同。然而,其他人最近的研究也观察到了相互矛盾的发现。在评估相似的血流指标(例如TCD速度和MRI通过时间)时,TCD和MRI成像设备提供了互补的静息CBF测量,其中在整个队列和子组内的不同设备之间观察到类似的差异^[17]。这有力地表明,当健康参与者接受调查并且测量的CBF指标是兼容的(例如,血流速度与血液通过时间)时,可以比较使用不同方式评估静息CBF的研究结果^[18]。然而,MRI脑血流灌注的测量及其与转运时间和速度(MCAV和CVCI)的相关性不太清楚,可能是由于所使用的指标(通过血管的血流速度与毛细血管床中的组织灌注率)的差异^[19];因此,需要进一步的研究,调查不同人群(即,年轻人、老年人和疾病)内部和之间的差异及其相关性。这项研究中的发现不能推广到静息CBF或疾病人群的其他成像方式^[20];然而,它们确实突显了考虑用于评估脑血管健康的指标的差异的必要性。

综上所述,TCD和MRI提供了互补的静息CBF测量,值得推广。因此,有必要进一步研究,以确定TCD和MRI静息CBF测量是否补充使用不同成像模式或数据采集方法获得的其他静息CBF测量,并确定TCD和ASL MRI静息CBF测量在特定疾病状态下是否保持互补。

参考文献

- [1] Sarabi M S, Ma S J, Jann K, et al. Vessel density mapping of small cerebral vessels on 3D high resolution black blood MRI[J]. *Neuroimage*, 2024, 286: 120504.
- [2] Rivera-Rivera L A, Roberts G S, Peret A, et al. Unraveling diurnal and technical variability in cerebral hemodynamics from neurovascular 4D-Flow MRI[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2024: 271678X-241232190X.
- [3] Onkenhout L, Arts T, Ferro D, et al. The relation between vascular risk factors and flow in cerebral perforating arteries. A 7 Tesla MRI study[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2024.
- [4] Guo C, Wang B, Huo Y, et al. The effects of P2 segment of posterior cerebral artery to thalamus blood supply pattern on gait in cerebral small vessel disease: A 7 T MRI based study[J]. *Neurobiol Dis*, 2024, 190: 106372.
- [5] Liu P, Monnier H, Owashi K, et al. The effects of free breathing on cerebral venous flow: a real-time phase contrast MRI study in healthy adults[J]. *J Neurosci*, 2024, 44 (3).
- [6] Zhang Z, Ding Z, Chen F, et al. Quantitative analysis of multimodal MRI markers and clinical risk factors for cerebral small vessel disease based on deep learning[J]. *Int J Gen Med*, 2024, 17: 739-750.
- [7] Franx B, van Tilborg G, van der Toorn A, et al. Propofol anesthesia improves stroke outcomes over isoflurane anesthesia—a longitudinal multiparametric MRI study in a rodent model of transient middle cerebral artery occlusion[J]. *Front Neurol*, 2024, 15: 1332791.
- [8] Paladini D, Biancotto G, Della S F, et al. Neurosonographic and MRI diagnosis of fetal cerebral lesions heralding polymicrogyria[J]. *Ultrasound Obstet Gynecol*, 2024, 63 (3): 293-302.
- [9] Yuzkan S, Balsak S, Cinkir U, et al. Multiple sclerosis versus cerebral small vessel disease in MRI: a practical approach using qualitative and quantitative signal intensity differences in white matter lesions[J]. *Acta Radiol*, 2024, 65 (1): 106-114.
- [10] Fettahoglu A, Zhao M, Khalighi M, et al. Early-frame [(18)F]Florbetaben PET/MRI for cerebral blood flow quantification in patients with cognitive impairment: comparison to an [(15)O]water gold standard[J]. *J Nucl Med*, 2024, 65 (2): 306-312.
- [11] Goyal M S, Vidal L, Chetcuti K, et al. MRI-based brain volume scoring in cerebral malaria is externally valid and applicable to lower-resolution images[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2024, 45 (2): 205-210.
- [12] Saglietto A, Bertello E, Barra M, et al. MRI pattern characterization of cerebral cardioembolic lesions following atrial fibrillation ablation[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2024, 11: 1327567.
- [13] Civrny J, Tomas D, Cerna M. MRI of cerebral oedema in ischaemic stroke and its current use in routine clinical practice[J]. *Neuroradiology*, 2024, 66 (3): 305-315.
- [14] Hofman M, Lavini C, van der Zwan A, et al. MRI in patients with a cerebral aneurysm clip: review of the literature and incident databases and recommendations for the Netherlands[J]. *Phys Med*, 2024, 117: 103187.
- [15] Damestani N L, Jacoby J, Michel C B, et al. MRI assessment of cerebral white matter microvascular hemodynamics across the adult lifespan[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024.
- [16] Le TT, Im G H, Lee C H, et al. Mapping cerebral perfusion in mice under various anesthesia levels using highly sensitive BOLD MRI with transient hypoxia[J]. *Sci Adv*, 2024, 10 (9): m7605.
- [17] Say B, Bayar M N, Inal M, et al. Evaluation of putamen area and cerebral peduncle with surrounding cistern in patients with Parkinson's disease: is there a difference from controls in cranial MRI? [J]. *Neurol Res*, 2024, 46 (3): 220-226.
- [18] Bai X, Fan P, Li Z, et al. Evaluating middle cerebral artery plaque characteristics and lenticulostriate artery morphology associated with subcortical infarctions at 7T MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024, 59 (3): 1045-1055.
- [19] Bonacci M C, Caligiuri M E. Editorial for "MRI assessment of cerebral white matter microvascular hemodynamics across the adult lifespan" [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024.
- [20] Aramendia-Vidaurreta V, Dux-Santoy L. Editorial for "cerebral sinus hemodynamics in adults revealed by 4D Flow MRI" [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024.

(收稿日期: 2024-03-19)

(校对编辑: 姚丽娜)