

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.03.007

磁共振扩散加权成像与磁敏感加权成像 对急性脑小血管病的联合诊断价值

郭 凡, 鲍伟宇, 彭中琼

(洛阳市东方人民医院 医学影像科, 河南洛阳 471000)

【摘要】目的 探讨磁共振扩散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)与磁敏感加权成像(susceptibility-weighted imaging, SWI)对急性脑小血管病(cerebral small vessel disease, CSVD)的联合诊断价值,为急性 CSVD 诊断提供可靠的技术支持。**方法** 回顾性分析 2023 年 10 月至 2025 年 10 月洛阳市东方人民医院收治的 80 例疑似急性 CSVD 患者的临床和影像资料。以综合临床表现、全部磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)序列信息及至少 3 个月随访结果为“金标准”,分别单独评估 DWI、SWI 对急性缺血性病灶和脑微出血(cerebral microbleeds, CMB)的检出效能,并进一步分析 DWI 与 SWI 联合应用的临床诊断价值。**结果** DWI 对急性缺血性病灶的检出敏感度为 96.67% (58/60), SWI 对 CMB 的检出敏感度为 91.30% (21/23)。采用 DWI 与 SWI 进行联合诊断时,诊断体系对急性 CSVD 的整体识别能力得到显著增强,其敏感度高达 98.46% (64/65),联合诊断模式的特异度维持在 80.00% (12/15)。**结论** DWI 与 SWI 在急性 CSVD 诊断中能够形成有效互补,联合应用 DWI 与 SWI 可进一步提高急性 CSVD 病灶临床诊断结果的精确性,为其临床诊疗方案的制订提供可靠的影像学参考依据。

【关键词】 脑小血管病; 磁共振成像; 扩散加权成像; 磁敏感加权成像; 诊断价值

【中图分类号】 R743.3

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2026) 03-0040-06

The combined diagnostic value of magnetic resonance diffusion-weighted imaging and susceptibility-weighted imaging in acute cerebral small vessel disease

GUO Fan, BAO Weiyu, PENG Zhongqiong

(Medical Imaging Department, Luoyang Dongfang People's Hospital, Luoyang 471000, Henan, China)

【Abstract】Objective To evaluate the combined diagnostic value of combining magnetic resonance diffusion-weighted imaging (DWI) with susceptibility-weighted imaging (SWI) in acute cerebral small vessel disease (CSVD), and to provide reliable technical support for the diagnosis of acute CSVD. **Methods** A retrospective analysis was conducted on clinical and imaging data from 80 patients with suspected acute CSVD who were admitted in Luoyang Dongfang People's Hospital from October 2023 to October 2025. Using the comprehensive clinical manifestations, all magnetic resonance imaging (MRI) sequence information, and at least 3-month follow-up results as the “gold standard”, the detection efficacy of DWI and SWI for acute ischemic lesions and cerebral microbleeds (CMB) was separately evaluated. Furthermore, the clinical diagnostic value of the combined application of DWI and SWI was further analyzed. **Results** The sensitivity of DWI for detecting acute ischemic lesions was 96.67% (58/60), and the sensitivity of SWI for detecting CMB was 91.30% (21/23). When DWI and SWI were used for combined diagnosis, the overall recognition ability of the diagnostic system for acute CSVD was significantly enhanced, with a sensitivity as high as 98.46% (64/65). The specificity of the combined diagnostic mode remained at 80.00% (12/15). **Conclusion** DWI and SWI can form an effective complement in the diagnosis of acute CSVD. The combined application of DWI and SWI can further improve the accuracy of the clinical diagnosis results of acute CSVD lesions, providing a reliable imaging reference basis for the formulation of its clinical diagnosis and treatment plans.

【Key words】 Cerebral small vessel disease; Magnetic resonance imaging; Diffusion-weighted imaging; Susceptibility-weighted imaging; Diagnostic value

收稿日期: 2025-11-20。

作者简介: 郭 凡, 本科, 主管技师, 研究方向: 影像技术相关/磁共振。E-mail: gfl8638861695@163.com。

脑小血管病 (cerebral small vessel disease, CSVD) 是累及脑内小动脉、微动脉、毛细血管及小静脉的一系列病理过程^[1], 是引发脑卒中、认知障碍、步态异常等功能障碍的重要原因^[2-3]。CSVD 的核心影像表现为急性腔隙性梗死或脑微出血, 其早期精准诊断对后续治疗及预后评估至关重要^[4-5]。目前, 磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 是诊断 CSVD 的核心手段, 扩散加权成像 (diffusion-weighted imaging, DWI) 对细胞毒性水肿高度敏感, 磁敏感加权成像 (susceptibility-weighted imaging, SWI) 对脱氧血红蛋白、含铁血黄素等顺磁性物质敏感度极高, 可清晰显示常规序列难以检出的脑微出血 (cerebral microbleeds, CMB)。

急性 CSVD 常合并缺血和出血病灶, 增加了影像评估难度。常规 MRI 序列对发病数小时内的超急性期脑梗死敏感度不足, 对 CMB 检出率偏低^[6]。DWI 对细胞毒性水肿高度敏感, 是诊断急性期梗死的“金标准”, 但无法识别 CMB; SWI 对顺磁性物质 (如脱氧血红蛋白) 敏感, 检出 CMB 优势显著, 但对急性缺血灶的诊断缺乏特异性^[7]。已有研究多为单独分析 DWI 或 SWI 在 CSVD 中的应用价值^[8-9], 缺少二者联合诊断急性期 CSVD 的系统研究。基于此, 本研究通过综合评估 DWI 联合 SWI 对急性 CSVD 的诊断效能, 为临床早期精准诊断与个体化治疗决策提供更优化的影像学方案。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性收集洛阳市东方人民医院于 2023 年 10 月—2025 年 10 月就诊的疑似急性 CSVD 患者 80 例, 全部患者均存在急性局灶性神经功能缺损 (如纯运动性轻偏瘫、感觉异常、共济失调等) 或急性认知功能下降就诊, 且完成头颅多序列 MRI 检查。其中男性 44 例, 女性 36 例; 年龄 52~78 岁, 平均 (65.3±8.7) 岁。

1.2 纳入与排除标准

纳入标准: ① 年龄≥50 岁; ② 急性起病, 临床症状持续时间≥24 h 或 MRI 证实为新发脑内病灶; ③ MRI 检查包含 DWI ($b=0, 1\,000\text{ s/mm}^2$) 及 SWI 序列; ④ 临床资料完整。排除标准: ① 经证实为大动脉粥样硬化性脑卒中、心源性栓塞等其他明确病因的卒中; ② 合并颅内肿瘤、炎症、创伤、显性血管畸

形 (如动脉瘤、动静脉畸形); ③ 存在重度肝肾功能不全、血液系统疾病; ④ 存在 MRI 检查禁忌证或图像质量不佳, 无法满足诊断需求。

1.3 方法

1.3.1 MRI 检查

采用 SIEMENS Spectra 3.0T 超导型磁共振扫描仪完成检查, 扫描序列及参数如下。① DWI 序列 采用单次激发平面回波成像 (single-shot echo planar imaging, SS-EPI) 序列, 重复时间 (repetition time, TR) 5 000 ms, 回波时间 (echo time, TE) 95 ms, 矩阵 128×128 , 层厚 5 mm, 层间距 1 mm, b 值设置为 0 和 $1\,000\text{ s/mm}^2$ 。② SWI 序列 采用三维梯度回波 (three-dimensional gradient echo, 3D-GRE) 序列, TR 28 ms, TE 20 ms, 翻转角 15° , 矩阵 320×224 , 层厚 2 mm, 层间距 0 mm。③ 常规序列: 以轴位横断面 T_1 加权成像 (T_1 -weighted imaging, T_1 WI)、 T_2 加权成像 (T_2 -weighted imaging, T_2 WI)、液体衰减反转恢复序列 (fluid-attenuated inversion recovery, FLAIR) 作为基础参照序列。

1.3.2 图像分析

由 2 名具有 5 年以上神经影像诊断经验的副主任医师采用双盲法独立阅片。意见不一致时经协商达成统一结论, 具体分析内容如下。

(1) DWI 图像分析。观察是否存在提示急性缺血的高信号病灶, 参照 STRIVE-2 标准将近期皮质下小梗死 (recent small subcortical infarction, RSSI) 定义为 DWI 呈高信号、表观弥散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC) 对应图呈低信号, 病灶最大径 $\leq 20\text{ mm}$, 且位于穿支动脉供血区 (如基底节区、丘脑、脑干、半卵圆中心)。

(2) SWI 图像分析。观察图像中是否存在点状、圆形或类圆形的均匀低信号病灶, 病灶直径 2~5 mm。排除血管流空信号、钙化及颅骨骨质伪影后定义为 CMB, 同步记录 CMB 病灶数目与分布区域 (脑叶、深部脑区/幕下区域)。

(3) 最终临床诊断“金标准”。综合患者急性临床症状、所有 MRI 序列 (包括 DWI、SWI、 T_2 WI、FLAIR) 表现, 以及至少 3 个月的临床随访结果判定。其中急性缺血性 CSVD 定义为存在 RSSI; 急性出血性 CSVD 或混合型定义为存在 CMB, 伴有或不伴 RSSI。

1.4 观察指标

(1) 以最终临床诊断为“金标准”,分别计算 DWI 序列诊断急性缺血性 CSVD(RSSI)的敏感度、特异度、阳性预测值(positive predictive value, PPV)和阴性预测值(negative predictive value, NPV)。

(2) 计算 SWI 序列诊断 CMB 的敏感度、特异度、PPV 和 NPV。

(3) 计算 DWI 与 SWI 联合诊断急性 CSVD(判定标准为 DWI 阳性或 SWI 阳性)的整体诊断效能指标。

(4) 记录病灶特征。RSSI 的病灶数目、分布部位;CMB 的病灶数目、分布区域(脑叶、深部脑区/幕下区域)。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 26.0 软件进行数据分析。计量资料均先行 Shapiro-Wilk 正态性检验,符合正态分布的

计量资料,以均数 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm s$)表示;不符合正态分布的计量资料以中位数(四分位数间距)表示。计数资料以例(%)表示,采用 χ^2 检验比较不同序列或组合诊断效能的差异。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者基本情况及最终诊断结果

80 例疑似患者中,最终确诊急性 CSVD 者 65 例(81.25%),非 CSVD 其他神经系统疾病 15 例(18.75%)。65 例急性 CSVD 患者中,单纯急性缺血性 CSVD(仅存在 RSSI)42 例(64.62%),缺血合并出血性 CSVD(RSSI+CMB)18 例(27.69%),单纯出血性 CSVD(仅存在 CMB)5 例(7.69%),合并 CMB 的患者总计 23 例。

2.2 各 MRI 序列的诊断效能分析

不同 MRI 序列的诊断效能结果见表 1。

表 1 DWI、SWI 及二者联合诊断急性 CSVD 的效能结果比较(%)

诊断方法与目标病灶	敏感度	特异度	PPV	NPV
DWI (诊断 RSSI, $n=60$) *	96.67 (58/60)	100 (20/20)	100 (58/58)	90.91 (20/22)
DWI (诊断 CMB, $n=23$)	0 (0/23)	100 (57/57)	0 (0/0)	71.25 (57/80)
SWI (诊断 RSSI, $n=60$)	30.00 (18/60)	85.00 (17/20)	85.71 (18/21)	28.81 (17/59)
SWI (诊断 CMB, $n=23$)	91.30 (21/23)	98.25 (56/57)	95.45 (21/22)	96.55 (56/58)
DWI 或 SWI 阳性 (联合诊断急性 CSVD, $n=65$)	98.46 (64/65)	80.00 (12/15)	95.52 (64/67)	92.31 (12/13)

注: DWI: 扩散加权成像; SWI: 磁敏感加权成像; CSVD: 脑小血管病; PPV: 阳性预测值; NPV: 阴性预测值; RSSI: 近期皮质下小梗死; CMB: 脑微出血。*根据“2.1”最终诊断结果, RSSI 患者包括单纯缺血性 CSVD (42 例)与缺血合并出血性 CSVD (18 例), 共计 60 例; 非 RSSI 患者为 20 例。

DWI 对 RSSI 的检测敏感度为 96.67%, 特异度为 100%, 但 DWI 对 CMB 的检测敏感度为 0, 无法检出 CMB 病灶。SWI 对 CMB 的检测敏感度为 91.30%, 特异度为 98.25%, 但对 RSSI 的检测敏感度仅 30.00%, 对 RSSI 的检测能力有限。DWI 与 SWI 联合诊断急性 CSVD 的整体检出敏感度可达 98.46%, 但其特异度为 80.00%, 低于单一序列的诊断特异度。分析该结果的原因: 本研究中 3 例最终确诊为非 CSVD 的患者, 其 SWI 序列上存在微小低信号灶, 被误判为 CMB 阳性; 另有 2 例非 CSVD 患者的 DWI 序列出现疑似急性缺血的可疑信号, 最终通过综合分析判断其为阴性。由 2 名高年资医师对检测结果进行复核, 并对序列进行判读, 将 SWI 上的低信号解读为因小静脉的流空信号或局灶性顺磁性物质沉积导致的结果偏差, DWI 上的可疑信号无对应 ADC 图信号降低, 并非真正的急性缺血病灶。上述结果提示, 应用 SWI 评估 CMB 时需常规鉴别血管伪影等干扰因素, 应用 DWI 诊断急性梗死时不能仅依托单一序列信号, 需

结合临床信息与 ADC 图进行综合判读。三者的受试者操作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线对比结果见图 1。

2.3 病灶特征分析

病灶分布统计图见图 2。在 42 例单纯缺血性 CSVD 患者中, 共检出 RSSI 病灶 58 个, 平均每例(1.38 ± 0.62)个, 最常见部位为基底节区(36 个, 62.1%), 其次为丘脑(12 个, 20.7%)、脑桥(7 个, 12.1%); 在 23 例合并 CMB 的患者中, SWI 共检出 CMB 病灶 187 个, 平均每例(8.13 ± 5.24)个。其中, 深部脑区/幕下区域分布为主者 12 例(52.2%), 脑叶分布为主者 8 例(34.8%), 混合分布 3 例(13.0%)。

典型病例影像图见图 3。患者, 女性, 75 岁, 左侧肢体无力 14 h, 急性期脑梗死, 脑血管淀粉样变。图 3A、3B 分别为 DWI 序列及 ADC 图, 显示右侧脑室旁急性期脑梗死; 图 3C、3D、3E、3F 分别为幅度图、相位图、最小密度投影及 SWI 图, 显示脑实质多发 CMB。

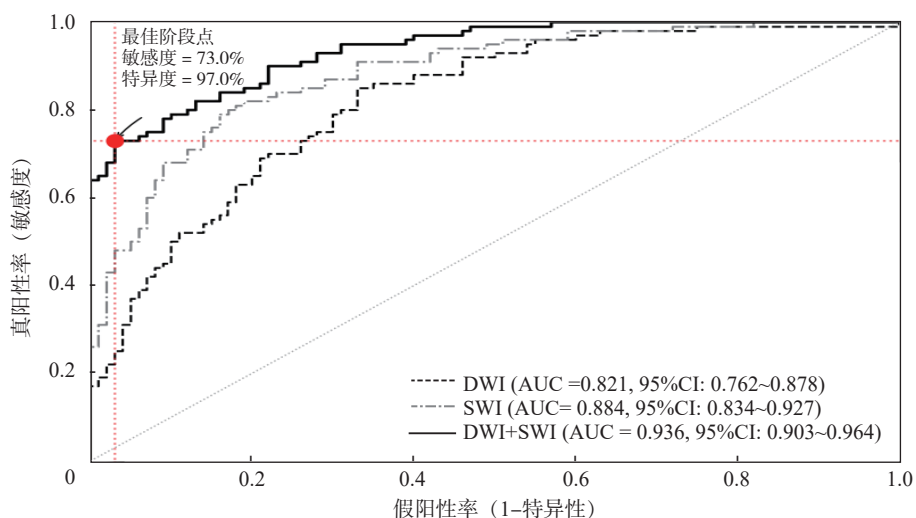


图1 DWI、SWI及联合诊断的ROC曲线

注: DWI: 扩散加权成像; SWI: 磁敏感加权成像; ROC: 受试者操作特征。

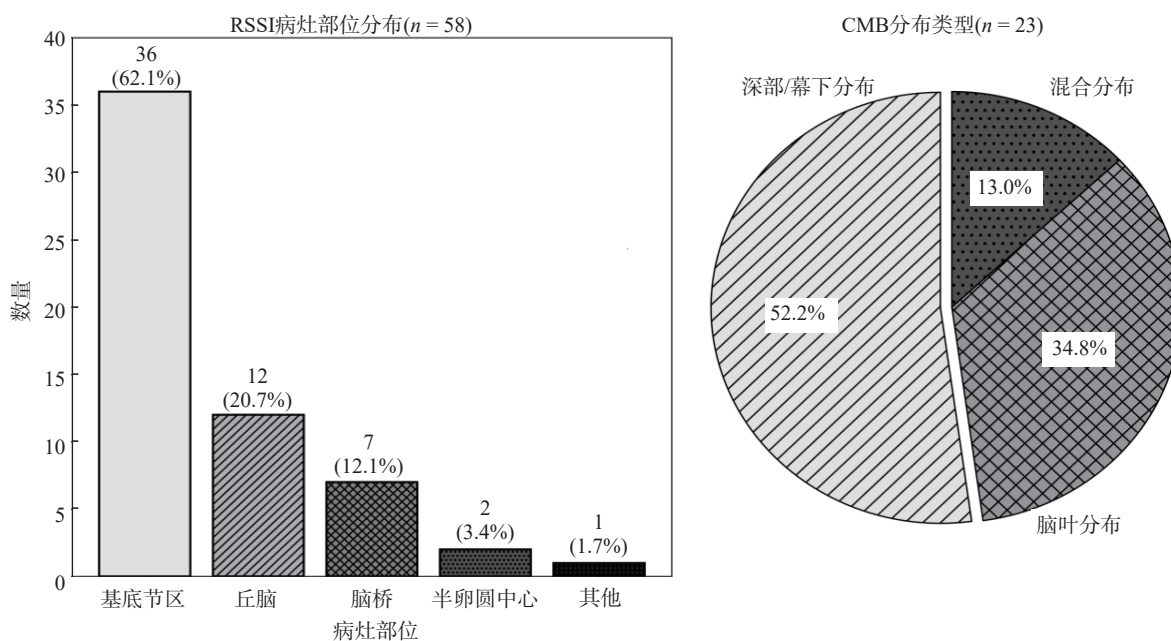


图2 病灶分布统计图

注: RSSI: 近期皮质下小梗死; CMB: 脑微出血。

3 讨论

CSVD的病理机制较为复杂,其影像表现既可为RSSI,也可微血管破裂导致的CMB,二者常共存且相互影响。本研究结果显示,在最终确诊的急性CSVD患者中,超过1/3(35.4%)合并有CMB,凸显了在急性期同时评估缺血与出血风险的重要性。传统MRI常规序列(T_1 WI、 T_2 WI、FLAIR)对急性缺血病灶,特别是超急性期病灶及微小出血灶的检测能力十分有限。

DWI通过检测水分子扩散受限,能在梗死后数分钟内显示缺血脑组织,对急性缺血性CSVD的诊断具有不可替代的价值。本研究证实DWI诊断RSSI具有高效能(敏感度96.67%),与既往研究一致^[10]。然而,DWI无法直接显示CMB。SWI利用组织间磁化率差异成像,对顺磁性物质高度敏感,是检测CMB最敏感的序列。本研究中SWI对CMB的检出敏感度达91.3%,显著优于常规序列,但存在将血管流空信号等伪影误判为CMB的可能,致使其特异度并非

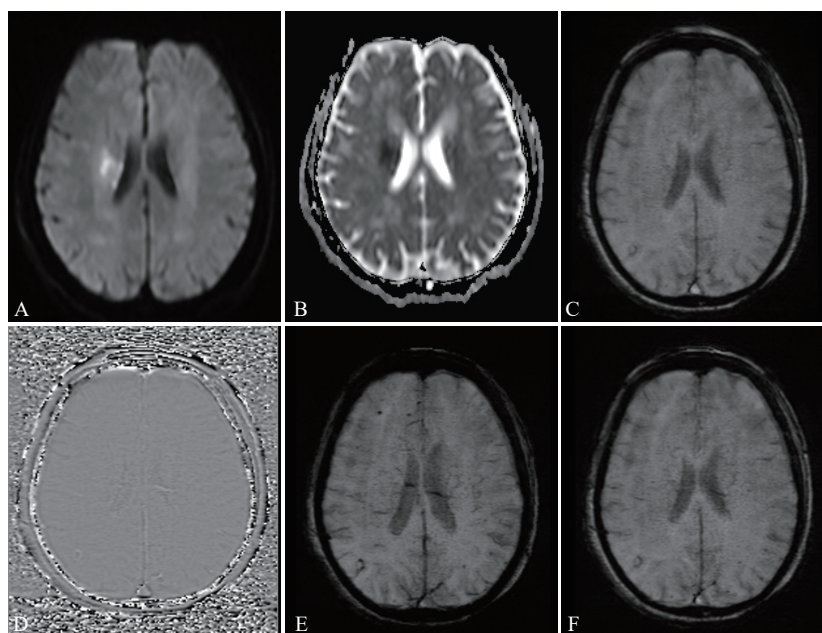


图3 典型病例影像图

注: DWI: 磁共振扩散加权成像; ADC: 表观弥散系数; SWI: 磁敏感加权成像; CMB: 脑微出血。

100%,这与技术原理及判读经验有关。

本研究最重要的发现是,DWI与SWI联合应用能显著提高急性CSVD的整体检出率(敏感度98.46%)。本研究系统评估了各序列对不同类型病灶的检测能力(表1)。结果明确显示DWI与SWI在检测目标病灶上存在显著互补性:DWI对RSSI高度敏感,但对CMB不显影;SWI对CMB高度敏感,但对急性缺血灶的检测能力有限。这种互补性正是联合诊断策略能够将整体敏感度提升至接近100%的基础。近年来,针对微小脑部病变可视化技术的研究不断拓展,如Ambwani等提出的新型体积渲染技术,可在胎儿MRI中有效区分左右脑微小损伤,为未来CSVD微小病灶的精准空间定位与侧别判别提供了新思路^[11]。近期一项针对急性脑梗死患者的研究同样证实,DWI与SWI联合应用可显著提高对脑微出血的诊断敏感度与特异度^[12]。这种联合策略的优势在于实现了“一站式”评估:DWI精准锁定急性责任缺血灶,SWI则全面揭示并存的微出血负荷,这对于临床治疗决策至关重要。

本研究也存在一定不足。本研究的样本量有限,后续需纳入更多样本来进一步验证结果的可靠性。本研究采用了严格的临床综合诊断作为“金标准”,但未能纳入高分辨率管壁成像等先进影像技

术,后续需将这些技术纳入研究以提供更可靠的证据支持。

综上,DWI与SWI联合应用在CSVD的影像评估中效果显著,可为急性CSVD提供可靠、全面的影像学评估,有助于降低临床误诊风险。

参考文献

- [1] 邢新博,王雪扬,马林,等. 脑小血管病影像标志物的研究现状及未来[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58 (1): 1-5.
- [2] 中华医学会放射学分会神经学组. 脑小血管病MRI规范化应用专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58 (1): 6-17.
- [3] MAHAMMEDI A, WANG L L, WILLIAMSON B J, *et al.* Small Vessel Disease, a Marker of Brain Health: What the Radiologist Needs to Know[J]. *Am J Neuroradiol*, 2022, 43(5): 650-660.
- [4] GYANWALI B, TAN C S, PETR J, *et al.* Arterial Spin-Labeling Parameters and Their Associations with Risk Factors, Cerebral Small-Vessel Disease, and Etiologic Subtypes of Cognitive Impairment and Dementia[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2022, 43(10):1418-1423.
- [5] VOORTER P H M, STRINGER M S, DINTHER M V, *et al.* Heterogeneity and Penumbra of White Matter Hyperintensities in Small Vessel Diseases Determined by Quantitative MRI[J]. *Stroke*, 2026, 56(1):128-137.
- [6] GROSSET L, DIMITROVIC A, GUILLONNET A, *et al.* MRI-Proven Incident Ischemia: A New Marker of Disease Progression in Small Vessel Diseases[J]. *Stroke*, 2025, 56(1):39-45.
- [7] 卓子良,卓颖,谭佳宁,等. 脑小血管病总负荷评分联合3D-ASL技术在急性缺血性脑卒中患者静脉溶栓中的应用价

- 值[J]. 中风与神经疾病杂志, 2026, 43 (1): 15-19.
- [8] 王辉, 王静, 汪兰. 脑小血管病总负荷评分联合磁敏感加权血管造影预测急性腔隙性脑梗死卒中复发的临床价值[J]. 全科医学临床与教育, 2024, 22 (2): 123-127.
- [9] 崔明愚, 李小刚, 刘欣, 等. 老年脑小血管病患者症状性急性皮质下脑微梗死的临床及影像学特征[J]. 中华脑血管病杂志 (电子版), 2026, 20 (1): 50-56.
- [10] ARSAVA EM, YILMAZ E, TOPCUOGLU MA. Incidental DWI Lesions in Patients with Recent Small Subcortical Infarctions[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2022, 31(4):106304.
- [11] AMBWANI G, SHI Z, LUO K, *et al.* Distinguishing Laterality in Brain Injury in Rabbit Fetal Magnetic Resonance Imaging Using Novel Volume Rendering Techniques[J]. Dev Neurosci, 2025, 47(1):55-67.
- [12] 万润济, 周鹏程, 李亮. DWI结合SWI对急性脑梗死患者脑微出血的诊断价值[J]. 中国医学创新, 2025, 22 (4): 134-137.