

脑小血管病传统影像标志物到多模态融合与AI驱动的精准确估

范正^{1*}, 常卓然², 梁佳欣^{3#}

¹延安市人民医院CT诊断科, 陕西 延安

²延安市人民医院放射科, 陕西 延安

³延安市人民医院核医学科, 陕西 延安

收稿日期: 2025年11月16日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月17日

摘要

脑小血管病是神经影像学领域常见的脑血管病变, 老年人群中极为普遍, 存在显著增加缺血性卒中和出血性卒中的发生风险, 亟需临床早期识别和积极干预, 传统MRI标志物反映的往往是不可逆的终末器官损伤, 如何帮助临床早期识别并积极干预, 不仅需要通过传统影像标志物的再认识与优化评估, 更依赖新兴多模态影像技术以及人工智能的应用。

关键词

脑小血管病, CSVD, DTI, 动态增强磁共振成像, SWI, 人工智能

From Traditional Neuroimaging Biomarkers to Multimodal Fusion and AI-Driven Precision Assessment in Cerebral Small Vessel Disease

Zheng Fan^{1*}, Zhuoran Chang², Jiaxin Liang^{3#}

¹Department of CT Diagnosis, Yan'an People's Hospital, Yan'an Shaanxi

²Department of Radiology, Yan'an People's Hospital, Yan'an Shaanxi

³Department of Nuclear Medicine, Yan'an People's Hospital, Yan'an Shaanxi

Received: November 16, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 17, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 范正, 常卓然, 梁佳欣. 脑小血管病传统影像标志物到多模态融合与AI驱动的精准确估[J]. 临床医学进展, 2025, 15(12): 2192-2197. DOI: 10.12677/acm.2025.15123643

Abstract

Cerebral small vessel disease (CSVD) is a prevalent cerebrovascular disorder in neuroimaging, particularly common in the elderly population, and significantly elevates the risk of both ischemic and hemorrhagic stroke. There is an urgent clinical need for early detection and proactive intervention. While conventional MRI biomarkers primarily reflect irreversible end-organ damage, advancing early clinical recognition and intervention requires not only refined evaluation and reinterpretation of traditional imaging markers but also the integration of emerging multimodal imaging technologies and artificial intelligence applications.

Keywords

Cerebral Small Vessel Disease, CSVD, DTI, Dynamic Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging, SWI, Artificial Intelligence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

脑小血管病(cerebral small-vessel disease, CSVD)是神经影像学领域常见的脑血管病变,其影像学表现具有隐匿性特征,易被初诊医师忽略。该疾病在影像学上表现为累及脑内小动脉、微血管及小静脉系统的临床-影像综合征。现代影像学定义将其范畴扩展至受累血管周围 2~5 mm 范围内的脑实质影像改变,包括白质高信号、腔隙性梗死、脑微出血和血管周围间隙扩大等特征性影像学表现[1]。

CSVD 常见的病因分型包括:I 型,小动脉硬化;II 型,散发性或遗传性脑淀粉样血管病(cerebral amyloid angiopathy, CAA); III 型,其他遗传性 CSVD; IV 型,炎症或免疫介导的小血管病; V 型,静脉胶原病; VI 型,其他小血管病[2]。

CSVD 在老年人群中极为普遍,发病率随年龄增长而显著升高。由于其与高血压、糖尿病和衰老的强相关性,CSVD 被认为是神经系统中最常见的与血管相关的疾病,其患病率远高于症状性卒中。CSVD 的存在显著增加缺血性卒中(尤其是穿支动脉梗死)和出血性卒中的发生风险,亟需临床早期识别和积极干预。

由于其受累血管直径微小(40~200 μm)且深在,在活体中难以直接进行组织病理学检查。因此,神经影像学不仅成为临床诊断 CSVD 的唯一可行手段,更是探索其病理生理机制、进行分期和预后预测的核心工具,完美地弥补了组织病理学的局限性。

根据 2013 年国际血管改变神经影像标准报告小组的标准,其主要影像学特征包括近期皮质下小梗死(recent small subcortical infarct, RSSI)、推测为血管源性的腔隙、推测为血管源性的脑白质高信号(white matter hyperintensity, WMH)、血管周围间隙(perivascular space, PVS)、脑微出血(cerebral microbleed, CMB)和脑萎缩[3]。这些标志物是脑小血管在长期慢性损伤后遗留在脑中的“痕迹”。基于这些标志物 Staals 等[4]提出了一个可以全面评价 CSVD 影像学总负荷的评分表,将研究视角从单一病灶提升到了全脑水平,能更有效地预测认知衰退、步态异常和卒中复发等临床结局。因此 CSVD 不仅仅是一个孤立的影像学发现,也是连接血管性危险因素与脑功能损害的“桥梁”,是导致一系列神经功能缺损的临床综合征。

当前脑小血管病的传统 MRI 标志物主要反映终末器官的不可逆结构性损伤,而非血管本身的早期功能性改变。这种“重结果、轻过程”的影像学特征凸显了传统方法的局限性。正因如此,近年来影像学技术突破显得尤为迫切——通过新型成像方法与量化分析,实现对早期微血管病变的动态监测及其病理生理过程的精准量化。

2. 传统影像标志物的再认识与优化评估

基于上述原因,不少研究人员针对传统影像标志物进行了相关的再认识与优化评估,突出对其“定量分析”及“动态演变”的研究。WMH 作为 CSVD 中比较重要的影像标志物,之前的评估一直使用 Fazekas 视觉直观评分量表[5],联影智能 CSVD 智能分析软件[6]会将 WMH 病灶自动分割为侧脑室缘 WMH(距脑室 ≤ 3 mm)、侧脑室旁 WMH(距脑室 3~13 mm)、深部 WMH(介于侧脑室旁和近皮层之间)和近皮层 WMH(距皮髓质交界 ≤ 4 mm),WMH 体积为上述 4 个区域 WMH 病灶体积之和。李宗等[7]利用联影智能 CSVD 智能分析软件自动分割 WMH 体积与定量 Fazekas 评分进行比较,发现体积定量更具临床应用价值。杨娟等[8]针对老年 2 型糖尿病患者 WMH 进行了为期 2 年的随访,发现皮层下 WMH 有一定进展,认知存在进一步受损。这些尝试在一定程度上推动了 CSVD 影像学的发展,但其繁琐的后处理程序及较长的随访周期,仍不能帮助临床早期识别并积极干预。

3. 新兴多模态影像技术的突破性应用

扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)是在扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)技术的基础之上发展的一项技术,DTI 不仅可以利用水分子运动的方向依赖性无创地显示脑白质纤维束结构,还可以更具体地分析 WMH 导致功能障碍的区域以及功能连接[9][10]。Maillard 等[11]发现 WMH 周围的正常表现脑白质区,可以表现出与 WMH 类似的 DTI 的特征,NAWM 区域虽然受损程度较轻,但是随着时间的推移有进一步损伤的危险,这标志着 DTI 可作为 CSVD 极早期的生物标志物。Xue Zhang 等[12]在一项针对 CSVD 患者的 7-T MRI 研究中,通过测量患者血管周围间隙弥散率 DTI-ALPS,揭示了小静脉的破坏可能会损害血管周围扩散率,从而影响 WMH 和 PVS 的进展。

以往的研究认为血脑屏障(blood brain barrier, BBB)受损是 CSVD 的产生和进展的重要机制之一[13]。动态增强磁共振成像(dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging, DCE-MRI)可以通过半定量或定量参数无创性地反映颅内血流灌注及明确有无血管内皮功能障碍。Nasel 等[14]通过分析 DCE-MRI 半定量参数信息及达峰时间直方图,发现了 DCE-MRI 可以识别早期阶段的 CSVD,明确了 BBB 与 CSVD 发生的相关性。Li 等[15]采用 Patlak 药代动力学模型,证实了 WMH 形成过程中,BBB 受损是其中最重要的一个环节,且患者认知功能下降与 BBB 的受损密切相关。

近年来,随着超高场(7 T)MRI 技术的不断成熟,其在脑小血管病领域的研究亦日趋广泛。脑小动脉病变可造成严重的临床不良结局[16],但脑小动脉在 3 T-MRI 基本难以观察,基于 7 T 时间飞跃法(time-of-flight, TOF)MRA 能够清楚地观察到豆纹动脉、脉络膜动脉、脑桥动脉、小脑上动脉等细小动脉[17]。脑微梗死通常由微小动脉梗死缺血引起,但微梗死灶在 3T 等低场强 MRI 检出率有限,有学者[18]对比了 3 T 和 7 T-MRI 检测的效率,发现仅有 27% 的 7 T 图像上检测到的病灶可在 3 T 图像上被观察到,这是由于 7 T-MRI 信噪比及磁敏感效应进一步增强,提升了微出血病灶的检出率。总之,7 T-MRI 在小血管结构功能评估、微小病灶检出方面具有很大优势,能够“见所未见”,帮助研究人员精准评估小血管退变和脑实质损伤。

随着磁化率加权成像(susceptibility weighted imaging, SWI)的广泛应用,脑微出血(cerebral microbleeds, CMBs)的检出率不断增加。CMBs 可作为诊断脑小血管病的关键影像标志物,并且 CMBs 的数量、位置

与认知障碍的严重程度和类型存在密切的相关性。SWI 是一种敏感的 MRI 成像序列,能够有效检测脑组织中的微出血、铁沉积和钙化。SWI 序列结合了磁化率效应和相位信息,具有较高的空间分辨率和敏感性,尤其对于小于 3 mm 的 CMBs 具有较好的识别能力。相比传统的 T2 加权成像,SWI 能够更清晰地显示 CMBs 的位置、数量和分布[19]。此外,利用从 SWI 相位图像重建的定量敏感性成像(QSM),可以提供有价值的特征,为脑小血管病变的诊断提供重要依据[20] [21]。近年来,各种深度学习(deep learning, DL)在医学影像分析中取得了显著的进展,特别是卷积神经网络(CNN),Al-Masni 及 Kim 等人[22] [23]提出的各种 DL 模型,可以进一步提升 SWI 对 CMBs 检出的准确率、灵敏度和特异度,并且提供了更高的可解释性和灵活性,更具临床价值的辅助决策。

4. AI 与大数据驱动的分析革命

人工智能(artificial intelligence, AI)在医学领域的使用已经较为普遍,尤其是在影像诊断方面展现出不俗的应用潜力,在 CSVD 影像诊断方面,AI 基于深度学习的算法能够自动识别和量化传统方法难以检测的细微病变,如早期的脑白质结构改变及微小出血灶,从而提高了 CSVD 影像诊断的敏感性和特异性[24]。更可以通过整合如结构 MRI、弥散张量成像、动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL)等不同影像模态的数据,进一步全面和精确的建立微血管功能评估模型[25]。梁佳欣等人[26]利用人工智能影像工具 U-AI 对脑体积进行定量分析,建立 CSVD 总负荷评分结合定量脑体积的影像学模型,进一步完善对 CSVD 影像总负荷的评估,并证实了该影像模型在 CSVD 患者认知障碍方面有重要的研究价值。当然,人工智能在脑小血管病研究中的应用仍面临诸多挑战:首先,模型的可解释性不足,且在不同人群或队列中的泛化能力存在波动,影响其临床可信度;其次,高质量、标准化的纵向随访数据匮乏,且现有数据集分散、异构,制约了模型的普适性;第三,AI 工具在真实临床场景中的效能验证不足,且与现有诊疗流程的整合存在壁垒;最后,在医学伦理监管、医疗责任界定与算法偏见控制方面,尚需建立相应的规范与标准。

5. 挑战与未来方向

目前虽然针对 CSVD 的研究仍有许多不足,但影像学毋庸置疑极大地推动了 CSVD 的研究进展。从起初单纯的常规 MRI 序列,到目前以 DTI、DCE-MRI、SWI 及 QSM 等为代表的新型磁共振技术的研究,进一步将对 CSVD 的研究推向了微观化和定量化,并已成为目前研究不可或缺的影像技术。而近年异军突起的人工智能技术在针对 CSVD 的相关研究中取得了一定进展,这也为 CSVD 的研究带来了新的启示。综上所述,不难发现如今关于 CSVD 的研究正呈现多元化、标准化、临床化、定量化和自动化的态势。最后需指出的是,一方面,未来关于 CSVD 的研究定将会更加贴近临床,更多的研究会从临床实际需要的角度去设计;另一方面,针对神经领域的研究离不开影像学的发展,相信未来更全面合理的影像与临床的结合则可能将 CSVD 的研究推向新的高潮。

基金项目

陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目,项目编号(20230315)。

参考文献

- [1] 中国研究型医院学会脑小血管病专业委员会《中国脑小血管病诊治专家共识》编写组. 中国脑小血管病诊治专家共识 2021 [J]. 中国卒中杂志, 2021, 16(7): 716-726.
- [2] Pantoni, L. (2010) Cerebral Small Vessel Disease: From Pathogenesis and Clinical Characteristics to Therapeutic Challenges. *The Lancet Neurology*, 9, 689-701. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(10\)70104-6](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(10)70104-6)

- [3] Wardlaw, J.M., Smith, E.E., Biessels, G.J., Cordonnier, C., Fazekas, F., Frayne, R., *et al.* (2013) Neuroimaging Standards for Research into Small Vessel Disease and Its Contribution to Ageing and Neurodegeneration. *The Lancet Neurology*, **12**, 822-838. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(13\)70124-8](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(13)70124-8)
- [4] Staals, J., Makin, S.D.J., Doubal, F.N., Dennis, M.S. and Wardlaw, J.M. (2014) Stroke Subtype, Vascular Risk Factors, and Total MRI Brain Small-Vessel Disease Burden. *Neurology*, **83**, 1228-1234. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000000837>
- [5] Duering, M., Finsterwalder, S., Baykara, E., Tuladhar, A.M., Gesierich, B., Konieczny, M.J., *et al.* (2018) Free Water Determines Diffusion Alterations and Clinical Status in Cerebral Small Vessel Disease. *Alzheimer's & Dementia*, **14**, 764-774. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2017.12.007>
- [6] Zhu, W., Huang, H., Zhou, Y., Shi, F., Shen, H., Chen, R., *et al.* (2022) Automatic Segmentation of White Matter Hyperintensities in Routine Clinical Brain MRI by 2D VB-Net: A Large-Scale Study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, **14**, Article 915009. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.915009>
- [7] 李宗, 许开喜. 脑白质高信号评分及体积与近期皮层下小梗死关系的研究[J]. 临床放射学杂志, 2025, 44(10): 1813-1817.
- [8] 杨娟, 程健, 冯轶, 等. 老年 2 型糖尿病患者脑白质高信号和认知功能损伤危险因素随访研究[J]. 中国神经精神疾病杂志, 2023, 49(10): 598-603.
- [9] Reijmer, Y., Fotiadis, P., Martinez-Ramirez, S., *et al.* (2015) Structural Network Alterations and Neurological Dysfunction in Cerebral Amyloid Angiopathy. *Brain*, **138**, 179-188. <https://doi.org/10.1093/brain/awu316>
- [10] Joutel, A. and Chabriat, H. (2017) Pathogenesis of White Matter Changes in Cerebral Small Vessel Diseases: Beyond Vessel-Intrinsic Mechanisms. *Clinical Science*, **131**, 635-651. <https://doi.org/10.1042/cs20160380>
- [11] Maillard, P., Fletcher, E., Harvey, D., Carmichael, O., Reed, B., Mungas, D., *et al.* (2011) White Matter Hyperintensity Penumbra. *Stroke*, **42**, 1917-1922. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.110.609768>
- [12] Zhang, X., Pei, X., Shi, Y., Yang, Y., Bai, X., Chen, T., *et al.* (2025) Unveiling Connections between Venous Disruption and Cerebral Small Vessel Disease Using Diffusion Tensor Image Analysis along Perivascular Space (DTI-ALPS): A 7-T MRI Study. *International Journal of Stroke*, **20**, 497-506. <https://doi.org/10.1177/17474930241293966>
- [13] Nasel, C., Boubela, R., Kalcher, K. and Moser, E. (2017) Normalised Time-to-Peak-Distribution Curves Correlate with Cerebral White Matter Hyperintensities—Could This Improve Early Diagnosis? *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, **37**, 444-455. <https://doi.org/10.1177/0271678x16629485>
- [14] Li, Y., Li, M., Zhang, X., Shi, Q., Yang, S., Fan, H., *et al.* (2017) Higher Blood-Brain Barrier Permeability Is Associated with Higher White Matter Hyperintensities Burden. *Journal of Neurology*, **264**, 1474-1481. <https://doi.org/10.1007/s00415-017-8550-8>
- [15] Lakhani, D.A., Zhou, X., Tao, S., Westerhold, E.M., Eidelman, B.H., Singh Sandhu, S.J., *et al.* (2023) Clinical Application of Ultra-High Resolution Compressed Sensing Time-of-Flight MR Angiography at 7T to Detect Small Vessel Pathology. *The Neuroradiology Journal*, **36**, 335-340. <https://doi.org/10.1177/19714009221129576>
- [16] Shi, Z., Zhao, X., Zhu, S., Miao, X., Zhang, Y., Han, S., *et al.* (2023) Time-of-Flight Intracranial MRA at 3 T versus 5 T versus 7 T: Visualization of Distal Small Cerebral Arteries. *Radiology*, **306**, 207-217. <https://doi.org/10.1148/radiol.220114>
- [17] van Veluw, S.J., Hilal, S., Kuijf, H.J., Ikram, M.K., Xin, X., Yeow, T.B., *et al.* (2015) Cortical Microinfarcts on 3T MRI: Clinical Correlates in Memory-Clinic Patients. *Alzheimer's & Dementia*, **11**, 1500-1509. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2014.12.010>
- [18] Koj, S., Choi, Y., Jeong, E.S., *et al.* (2024) Automated Quantification of Cerebral Microbleeds in Susceptibility-Weighted MRI: Association with Vascular Risk Factors, White Matter Hyperintensity Burden, and Cognitive Function. *American Journal of Neuroradiology*, **46**, 1007-1015. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a8552>
- [19] Luo, Y., Gao, K., Fawaz, M., Wu, B., Zhong, Y., Zhou, Y., *et al.* (2024) Automatic Detection of Cerebral Microbleeds Using Susceptibility Weighted Imaging and Artificial Intelligence. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 2640-2654. <https://doi.org/10.21037/qims-23-1319>
- [20] Kang, C., Mehta, P., Chang, Y.S., *et al.* (2025) Enhanced Reader Confidence and Differentiation of Calcification from Cerebral Microbleed Diagnosis Using QSM Relative to SWI. *Clinical Neuroradiology*, **35**, 303-313.
- [21] Al-Masni, M.A., Kim, W.R., Kim, E.Y., Noh, Y. and Kim, D. (2020) Automated Detection of Cerebral Microbleeds in MR Images: A Two-Stage Deep Learning Approach. *Neuro Image: Clinical*, **28**, Article 102464. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102464>
- [22] Kim, J.H., Al-Masni, M.A., Lee, H., Choi, Y. and Kim, D. (2022) A Single-Stage Detector of Cerebral Microbleeds Using 3D Feature Fused Region Proposal Network (FFRP-Net). 2022 *IEEE 4th International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*, Incheon, 13-15 June 2022, 1-4.

-
- <https://doi.org/10.1109/aicas54282.2022.9869855>
- [23] Hu, X., Liu, L., Xiong, M. and Lu, J. (2023) Application of Artificial Intelligence-Based Magnetic Resonance Imaging in Diagnosis of Cerebral Small Vessel Disease. *CNS Neuroscience & Therapeutics*, **30**, e14841.
<https://doi.org/10.1111/cns.14841>
- [24] Choudhury, C., Goel, T. and Tanveer, M. (2024) A Coupled-Gan Architecture to Fuse MRI and PET Image Features for Multi-Stage Classification of Alzheimer's Disease. *Information Fusion*, **109**, Article 102415.
<https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102415>
- [25] Fazekas, F., Chawluk, J., Alavi, A., Hurtig, H. and Zimmerman, R. (1987) MR Signal Abnormalities at 1.5 T in Alzheimer's Dementia and Normal Aging. *American Journal of Roentgenology*, **149**, 351-356.
<https://doi.org/10.2214/ajr.149.2.351>
- [26] 梁佳欣. 基于影像总负荷评分及定量脑分割对脑小血管病患者认知障碍的诊断价值研究[D]: [硕士学位论文]. 延安: 延安大学, 2024.