doi 10.12122/j.issn.1674-4500.2026.05.10 分子影像学杂志, 2026, 49(5): 630-636

急性缺血性脑卒中患者早期神经功能恶化的预测：基于MRI的高信号血管征、脑白质高信号体积及表观扩散系数

王秀萍，胡珊珊，黄银生
浙江大学医学院附属邵逸夫医院龙游分院神经内科，浙江 衢州 324400

摘要：目的 探讨基于MRI的高信号血管征（HVS）、脑白质高信号（WMH）体积及表观扩散系数（ADC）值对急性缺血性脑卒中（AIS）患者早期神经功能恶化（END）的预测价值。**方法** 收集2024年5月~2025年5月我院收治的AIS患者120例。根据入院7 d内是否发生END分为发生组（*n*=28）和未发生组（*n*=92）。收集患者一般资料，检测中性粒细胞百分比（NEUT%）、高敏C反应蛋白（hs-CRP）、纤维蛋白原（FIB）、D-二聚体（D-D）等实验室参数。所有患者入院后24 h内完成头颅MRI检查，评估HVS阳性率、WMH体积及ADC值。分析MRI参数与END相关指标的相关性，采用ROC曲线评估HVS、WMH体积及ADC值对END的预测价值。**结果** 发生组的入院7 d内美国国立卫生研究院卒中量表（NIHSS）评分最大值未高于发生组（*P*<0.05）。发生组NEUT%、FIB、D-D、hs-CRP高于未发生组（*P*<0.05）。发生组的HVS阳性率更高，WMH体积更大，ADC值更低（*P*<0.05）。AIS伴END患者HVS阳性率与入院7 d内NIHSS评分最大值呈正相关，WMH体积与NEUT%、D-D、hs-CRP、入院7 d内NIHSS评分最大值呈正相关，ADC值与NEUT%、D-D、入院7 d内NIHSS评分最大值呈负相关（*P*<0.05）。联合预测AIS患者END的预测效能最高，约登指数为0.689，曲线下面积为0.898，敏感度、特异度分别为92.86%、76.09%。**结论** 基于MRI的HVS、WMH体积及ADC值与AIS患者END相关，三者联合检测对AIS患者END具有较高的预测价值，可为临床识别END患者提供参考。
关键词：急性缺血性脑卒中；早期神经功能恶化；磁共振成像；高信号血管征；脑白质高信号；表观扩散系数

Prediction of early neurological deterioration in patients with acute ischemic stroke: based on MRI hyperintense vessel sign, white matter hyperintensity volume and apparent diffusion coefficient

WANG Xiuping, HU Shanshan, HUANG Yinsheng
Department of Neurology, Longyou Branch, Sir Run Run Shaw Hospital Zhejiang University School of Medicine, Quzhou 324400, China

Abstract: Objective To investigate the predictive value of hyperintense vessel sign (HVS), white matter hyperintensity (WMH) volume and apparent diffusion coefficient (ADC) value based on MRI on early neurological deterioration (END) in patients with acute ischemic stroke (AIS). **Methods** A total of 120 patients with AIS admitted to the hospital from May 2024 to May 2025 were collected. According to whether END occurred within 7 days of admission, they were divided into occurrence group and non-occurrence group. The general data of patients were collected, and the laboratory parameters such as neutrophil percentage (NEUT%), high-sensitivity C-reactive protein (hs-CRP), fibrinogen (FIB) and D-dimer (D-D) were detected. All patients completed cranial MRI within 24 h after admission to evaluate the positive rate of HVS, WMH volume and ADC value. Pearson/Spearman correlation analysis was used to explore the correlation between MRI parameters and END-related indicators. Receiver operating characteristic curve was used to evaluate the predictive value of HVS, WMH volume and ADC value on END. **Results** The maximum National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS) score within 7 days of admission in occurrence group was higher than that in occurrence group (*P*<0.05). NEUT%, FIB, D-D and hs-CRP were higher in occurrence group than those in non-occurrence group (*P*<0.05). The positive rate of HVS in occurrence group was higher, and the volume of WMH was larger, and the ADC value was lower (*P*<0.05). The positive rate of HVS in AIS patients with END was positively correlated with maximum NIHSS score within 7 days of admission, and WMH volume was positively correlated with NEUT%, D-D, hs-CRP and maximum NIHSS score within 7 days of admission, and ADC value was negatively correlated with NEUT%, D-D and maximum NIHSS score within 7 days of admission (*P*<0.05). The combined prediction had the highest predictive efficiency on END in AIS patients, with a Youden index of 0.689, an area under the curve of 0.898, a sensitivity of 92.86% and a specificity of 76.09%. **Conclusion** MRI-based HVS, WMH volume and ADC value are associated with END in AIS patients. The combined detection of the three has high predictive value on END in AIS patients, and can provide a reference for clinical identification of END patients.
Keywords: acute ischemic stroke; early neurological deterioration; magnetic resonance imaging; hyperintense vessel sign; white matter hyperintensity; apparent diffusion coefficient

急性缺血性脑卒中（AIS）是因脑供血动脉急性闭塞或严重狭窄引发局部脑组织血流突然中断，导致缺血、缺氧性坏死的急症，具有高发病率和高致残率，其核心病理为脑血管阻塞后的神经细胞死亡级联反应[1, 2]。早期神经功能恶化（END）定义为AIS发病后7 d内出现的神经功能缺损症状进行性加重[3]，会影响患者短期及长期预后，增加不良结局风险，包括更高的死亡率、更严重的功能障碍以及对康复治疗反应不佳[4, 5]。准确识别

收稿日期：2025-11-21
基金项目：浙江省医药卫生科技计划项目（2023XY222）
作者简介：王秀萍，主治医师，E-mail: 15258639710@163.com
通信作者：黄银生，副主任医师，E-mail: Renzuhanli@163.com

具有END高风险的AIS患者是临床实践中的重要目标，及时干预可能改善这类患者的结局。目前，临床识别END高风险患者的临床生化指标（如炎症、凝血功能指标等）由于缺乏高敏感度和特异度，在临床应用中价值有限，因此很大程度上仍依赖于急性缺血性卒中发病时的神经影像学特征[6, 7]。MRI能凭借对软组织的高分辨能力、多参数序列的灵活组合及无辐射特性，精准捕捉脑卒中后的脑组织病理改变，其中，高信号血管征（HVS）在流体衰减反转恢复（FLAIR）序列上呈梗死区域或其邻近区域沿血管走行分布的线样高信号，提示缓慢血流或侧支循环状态[8]。脑白质高信号（WMH）体积反映了脑小血管病的累积负荷，与血脑屏障完整性破坏和脑组织修复能力下降相关[9]。表观扩散系数（ADC）值量化了水分子扩散受限的程度，是评估急性缺血核心和周围组织状态的关键参数[10]。这3项MRI指标分别从血流动力学、慢性微血管损伤背景和急性细胞毒性水肿层面提供了信息。现有AIS患者END预测研究多聚焦单一或同类型影像指标，缺乏对侧支循环、脑小血管病及缺血损伤相关多模态MRI参数的系统整合，多模态指标联合预测的临床解释不足[11, 12]。因此，本研究旨在探究基于MRI的HVS、WMH体积及ADC值对AIS患者END的预测价值，为临床预测END提供新的、更有效的多模态影像学指标，以提升AIS患者的救治水平。

1 资料与方法

1.1 一般资料

使用G*Power3.1软件计算样本量，α=0.05，1-β=0.8，组数=2（END发生组、未发生组），效应量f参考急性缺血性脑卒中患者早期神经功能恶化相关研究[13]中临床及实验室指标的均数和标准差计算，得出f=0.40，采用单因素方差分析模型计算得到本研究所需最小总样本量为92例，按15%脱落率估算，至少需纳入106例患者，本研究最终实际纳入120例AIS患者，满足研究的样本量要求。

收集2024年5月~2025年5月我院收治的AIS患者120例。纳入标准：符合《中国急性缺血性脑卒中诊治指南2018》[14]中AIS的诊断标准，经临床症状、体征及头颅CT证实存在缺血性脑组织损伤；发病至入院时间≤72 h，且入院后完成至少7 d的临床观察及随访，明确是否发生END；入院后完成头颅MRI检查；具有完整的美国国立卫生研究院卒中量表（NIHSS）评分记录；资料完整。排除标准：非AIS患者，如脑出血、蛛网膜下腔出血、脑肿瘤卒中、脑脓肿等；入院7 d内发生明确可导致神经功能恶化的其他急性疾病，如严重肺部感染、败血症等；存在严重认知功能障碍、精神疾病或失语等，无法配合完成神经功能评估；处于妊娠或哺乳期；存在恶性肿瘤终末期等可能影响短期预后的严重基础疾病；既往存在严重神经系统疾病且遗留明显神经功能障碍，可能干扰本次神经功能评估。本研究已通过浙江大学医学院附属邵逸夫医院医学伦理委员会审批（审批号：2025093），研究符合《赫尔辛基宣言》相关伦理要求，所有患者或其家属均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 一般资料收集 性别、年龄、基础疾病、入院时NIHSS评分及入院7 d内NIHSS评分最大值（入院后7 d观察期内所记录的NIHSS评分中的最高值）等。

1.2.2 END相关实验室指标 患者入院后采集静脉血标本，分装于不同抗凝管进行处理：2 mL EDTA抗凝管标本，采用希森美康pocH-80i全自动血液分析仪检测白细胞计数（WBC）、中性粒细胞百分比（NEUT%），采血后1 h内完成检测；2 mL枸橼酸钠抗凝管（血∶抗凝剂=9∶1）标本经离心（3000 r/min，10 min），分离不含血小板的血浆，使用北京普利生ExC-810凝血分析仪及配套试剂，以凝固法检测纤维蛋白原（FIB），免疫比浊法检测D-二聚体（D-D）；5 mL分离胶促凝管标本，分离血清，空腹血糖（FBG）采用雅培Alinity c全自动生化分析仪以酶法检测，高敏C反应蛋白（hs-CRP）采用罗氏Cobasc702全自动生化分析仪以增强免疫比浊法测定（试剂盒购自罗氏公司），同型半胱氨酸（Hcy）采用循环酶法检测（试剂盒购自北京九强生物技术有限公司）。

1.2.3 MRI检测 采用西门子Prisma 1.5T磁共振成像系统对患者进行检查，患者取仰卧位，头部固定于头线圈内，行常规头颅MRI序列扫描，T1加权成像（T1WI）：TR 1800 ms，TE 20 ms，层厚5 mm，层间距1 mm，矩阵256×256，FOV 240 mm×240 mm；T2加权成像（T2WI）：TR 4500 ms，TE 90 ms，层厚5 mm，层间距1 mm，矩阵256×256，FOV 240 mm×240 mm；液体衰减反转恢复序列（FLAIR）：TR 8000 ms，TE 120 ms，反转时间（TI）2000 ms，层厚5 mm，层间距1 mm，矩阵256×256，FOV 240 mm×240 mm；弥散加权成像（DWI）：采用单次激发平面回波序列，TR 6000 ms，TE 70 ms，层厚5 mm，层间距1 mm，矩阵128×128，FOV 240 mm×240 mm，b值=0、1000 s/mm^2。扫描完成后，原始图像传输至工作站进行后处理。HVS检测由2位具有5年以上神经影像诊断经验的医师采用双盲法在FLAIR序列图像上进行评估，观察梗死区域或其邻近区域是否存在沿血管走行分布的线样高信号，判定HVS阳性/阴性。WMH体积检测将FLAIR序列图像导入ImageJ影像分析软件，由上述医师手动勾勒双侧脑室周围及深部脑白质高信号区域，软件自动计算WMH总体积。ADC值检测在DWI对应ADC图上，选取梗死核心区域（DWI高信号区），由医师放置3个感兴趣区（ROI）（每个感兴趣区面积为

50~100 mm²)，避开脑室、血管及伪影区域，软件自动生成每个ROI的ADC值，取3个ROI的ADC值的均值作为该患者最终ADC值（图1）。采用Kappa值检验2位医师对HVS判定结果的一致性，采用组内相关系数（ICC）评价2位医师对WMH体积勾画及ADC值ROI选取测量结果的一致性，结果显示HVS判定的Kappa值为0.85，WMH体积勾画的ICC值为0.89，ADC值测量的ICC值为0.91，均提示2位医师间的检测结果具有高度一致性。若2位医师评估结果不一致，经共同阅片讨论达成一致意见。

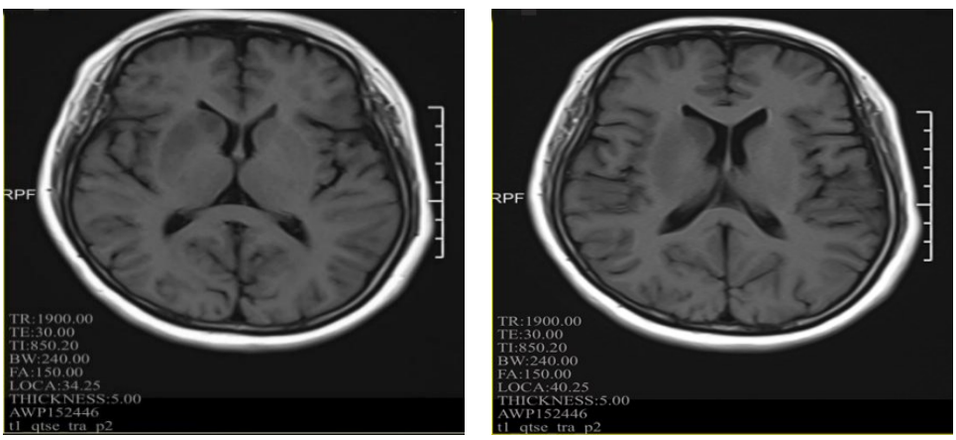

图1 AIS患者头颅T1像示梗塞灶

Fig.1 Infarct foci on cranial T1 imaging of AIS patients. A 56-year-old female presented with numbness and weakness of the left limb with slurred speech for 95 min. Cranial magnetic resonance T1 showed patchy recent infarct in the right lateral ventricle and basal ganglia, and patchy low signal was seen on T1.

1.2.4 分组　根据患者入院7 d内是否发生END进行分组，END定义为AIS患者入院后7 d内NIHSS评分较入院时增加≥2分，或运动功能分项评分较入院时增加≥1分。若入院时NIHSS评分≥10分，则以较入院时增加≥4分作为END判定标准[15]。符合上述END判定标准的患者纳入发生组（n=28），未达到上述END判定标准的患者纳入未发生组（n=92）。

1.3 统计学分析

采用SPSS24.0软件进行统计学分析。正态分布的计量资料以均数±标准差表示，组间比较采用t检验。计数资料以n(%)表示，组间比较采用χ^2检验。采用ROC曲线分析HVS、WMH体积、ADC值对AIS患者END的预测价值。NEUT%、FIB、D-D、hs-CRP与WMH体积、ADC值的相关性采用Pearson相关分析，与HVS阳性率的相关性采用Spearman相关分析。以P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组一般资料比较

发生组的入院7 d内NIHSS评分最大值高于未发生组（P<0.05，表1）。

2.2 两组END相关指标比较

发生组NEUT%、FIB、D-D、hs-CRP高于未发生组（P<0.05，表2）。

2.3 两组MRI参数比较

发生组的HVS阳性率更高，WMH体积更大，ADC值更低（P<0.05，表3）。

2.4 MRI参数与END相关指标的相关性

AIS伴END患者HVS阳性率与入院7 d内NIHSS评分最大值呈正相关，WMH体积与NEUT%、D-D、hs-CRP、入院7 d内NIHSS评分最大值正相关，ADC值与NEUT%、D-D、入院7 d内NIHSS评分最大值负相关（P<0.05，表4）。

2.5 MRI参数预测AIS患者END的ROC分析

HVS、WMH体积、ADC值及联合预测AIS患者END的曲线下面积（AUC）分别为0.710、0.812、0.850、0.898，其中联合预测的效能最高，约登指数为0.689，敏感度、特异度分别为92.86%、76.09%（表5、图2）。

3 讨论

AIS患者出现的END会导致神经功能缺损症状进行性加重，使梗死区域扩大、脑组织损伤范围延展，进而造成肢体运动、语言表达等功能恢复延迟，降低患者自理能力[16]。识别高危人群，需依托能反映脑组织病理生理状态的指标。MRI的多项参数可从不同角度体现脑组织状态，为解析END发生机制提供影像学支持[17]。明确这些参数与END的关联及联合预测价值，可优化风险评估，辅助临床决策。

表1 两组一般资料比较

Tab.1 Comparison of general data between the two groups

Item	Occurrence group (*n*=28)	Non-occurrence group (*n*=92)	χ^2/t	*P*
Age (year, *Mean*±*SD*)	62.42±4.15	63.74±5.63	1.148	0.253
Gender [*n*(%)]			0.021	0.884
Male	16(57.14)	54(58.70)		
Female	12(42.86)	38(41.30)		
Hypertension [*n*(%)]			0.244	0.622
Yes	17(60.71)	51(55.43)		
No	11(39.29)	41(44.57)		
Diabetes mellitus [*n*(%)]			0.629	0.428
Yes	13(46.43)	35(38.04)		
No	15(53.57)	57(61.96)		
Coronary heart disease [*n*(%)]				
Yes	9(32.14)	24(26.09)	0.395	0.530
No	19(67.86)	68(73.91)		
Smoking history [*n*(%)]			0.244	0.622
Yes	11(39.29)	41(44.57)		
No	17(60.71)	51(55.43)		
History of alcohol drinking [*n*(%)]			0.115	0.735
Yes	7(25.00)	26(28.26)		
No	21(75.00)	66(71.74)		
NIHSS score at admission (*Mean*±*SD*)	7.43±1.93	7.38±2.17	0.109	0.913
Maximum NIHSS score within 7 days of admission (*Mean*±*SD*)	10.46±2.38	7.53±1.26	8.551	<0.001

NIHSS: National Institutes of Health Stroke Scale.

表2 两组END相关指标比较

Tab.2 Comparison of END-related indicators between the two groups (*Mean*±*SD*)

Item	Occurrence group (*n*=28)	Non-occurrence group (*n*=92)	*t*	*P*
WBC ($\times10^9$/L)	9.47±1.83	8.92±2.14	1.229	0.222
NEUT% (%)	78.36±6.27	72.15±7.84	3.831	<0.001
FIB (g/L)	3.87±0.74	3.52±0.69	2.311	0.023
D-D (mg/L)	1.58±0.41	0.99±0.28	8.691	<0.001
FBG (mmol/L)	7.24±1.53	6.83±1.47	1.280	0.203
hs-CRP (mg/L)	7.06±2.01	5.13±1.13	6.472	<0.001
Hcy (μmol/L)	15.08±3.27	14.92±2.85	1.821	0.071

WBC: White blood cell count; NEUT%: Neutrophil percentage; FIB: Fibrinogen; D-D: D-dimer; FBG: Fasting blood glucose; hs-CRP: High-sensitivity C-reactive protein; Hcy: Homocysteine.

表3 两组MRI参数比较

Tab.3 Comparison of MRI parameters between the two groups (*Mean*±*SD*)

Item	Occurrence group (*n*=28)	Non-occurrence group (*n*=92)	χ^2/t	*P*
HVS [*n*(%)]			9.672	0.002
Positive	18(64.29)	29(31.52)		
Negative	10(35.71)	63(68.48)		
WMH volume (mL, *Mean*±*SD*)	14.28±3.15	9.37±2.06	9.663	<0.001
ADC value ($\times10^{-6}$ mm^2/s, *Mean*±*SD*)	521.74±35.19	598.26±42.75	8.617	<0.001

HVS: Hyperintense vessel sign; WMH: White matter hyperintensity; ADC: Apparent diffusion coefficient.

表4 MRI参数与END相关指标的相关性

Tab. 4 Correlation between MRI parameters and END-related indicators

Item	HVS positive rate		WMH volume		ADC value	
	r	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*
NEUT%	0.215	0.263	0.519	0.005	-0.412	0.001
FIB	0.134	0.497	0.306	0.113	-0.178	0.366
D-D	0.226	0.257	0.462	0.013	-0.397	0.036
hs-CRP	0.175	0.412	0.472	0.011	-0.232	0.266
Maximum NIHSS score within 7 days of admission	0.428	0.021	0.583	0.001	-0.457	0.001

表5 MRI参数预测AIS患者END的ROC分析

Tab. 5 ROC analysis of MRI parameters in predicting END in AIS patients

Item	cut-off	AUC	95% *CI*	Youden index	Sensitivity (%)	Specificity (%)	*P*
HVS	Positive	0.710	0.621-0.790	0.421	71.43	70.65	<0.001
WMH volume	>12.04 mL	0.812	0.730-0.877	0.489	75.00	73.91	<0.001
ADC value	≤570.12×10^{-6} mm^2/s	0.850	0.773-0.908	0.604	82.14	78.26	<0.001
Combination	-	0.898	0.829-0.946	0.689	92.86	76.09	<0.001

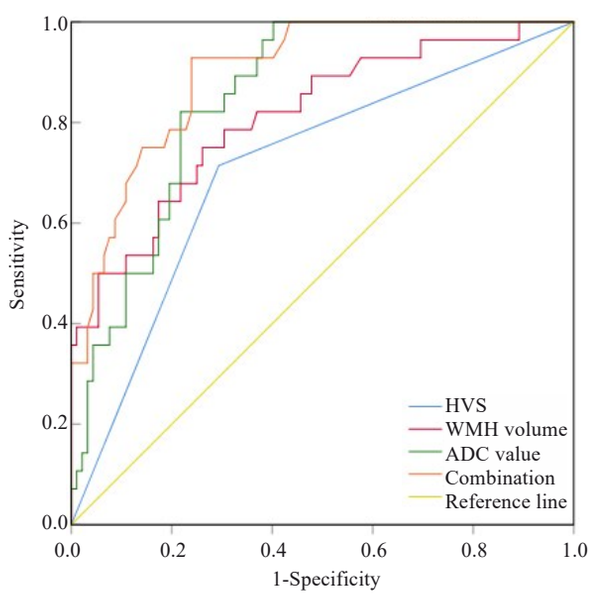

图2 MRI参数预测AIS患者END的ROC曲线

Fig. 2 ROC curves of MRI parameters in predicting END in AIS patients.

NEUT%升高提示机体炎症反应增强，炎症细胞浸润释放的氧自由基、蛋白酶等物质，会直接加剧脑组织缺血再灌注损伤[18]；FIB与血液黏稠度密切相关，其水平升高会加重脑血流灌注不足，既往141例AIS患者研究证实FIB是END独立预测因子[19]，本研究进一步验证了FIB升高在END发生中的作用；D-D水平升高提示血栓形成与溶解过程活跃，易导致梗死区域血管再闭塞，有研究对246例AIS患者的研究进一步证实，初始及随访D-D水平均与END密切相关，且初始D-D是END的独立关联因素（aOR：1.48，95% *CI*：1.06~2.05），其升高可通过促进额外血栓形成加重脑组织缺血，进而引发END[20]；hs-CRP作为系统性炎症敏感标志物，其升高会触发炎症级联反应，促进血管内皮损伤和炎症细胞浸润，进一步扩大脑损伤范围[21]。本研究结果显示，发生组NEUT%、FIB、D-D、hs-CRP高于未发生组，这提示上述指标的升高可能与AIS患者早期END的发生存在关联。这可能是因为NEUT%升高释放促炎介质加剧脑缺血炎症损伤，还形成胞外陷阱参与血栓形成，加重脑血流障碍并加剧神经功能缺损；FIB升高增加血黏度、促进血栓形成，减少梗死区灌注；D-D升高提示血栓纤溶活跃，易引发血管再闭塞；hs-CRP升高既反映全身炎症，还损伤血管内皮、加速动脉粥样硬化，加重脑缺血后的神经功能损害。

本研究结果显示，发生组的HVS阳性率更高，WMH体积更大，ADC值更低，这一结果提示HVS、WMH体积及ADC值的变化可能参与了AIS患者END的过程。这是因为FLAIR序列上HVS的出现，多提示梗死区周边血流缓慢或侧支循环不良，脑组织长期处于低灌注状态，进而加剧缺血损伤、诱发神经功能损害。相关动物实验[22]以恒河猴构建缺血性卒中模型，经多参数MRI动态监测发现，侧支循环状态不佳会导致梗死灶在卒中后48 h内快速扩大，最终引发END；临床研究亦证实[23]，远端HVS阳性是END的独立预测因子，且位于DWI病灶内的HVS更易诱发神经功能恶化。WMH体积增大反映脑小血管病变的累积负荷，血管壁病变、血脑屏障破坏等病理改变会降低脑组织对缺血损伤的耐受性，其区域血管自主调节功能受损，急性缺血时难以维持局部脑血流稳定，易扩大缺血损伤范围；且WMH常伴随神经纤维脱髓鞘及轴索损伤，干扰神经信

号传导，加重缺血所致的神经功能缺损，进而增加END发生风险[24]。既往研究发现AIS患者WMH的分期、亚型与END相关[25]，也有研究提示WMH等脑小血管病标志物与END风险相关[26]，本研究通过量化WMH体积，进一步为脑小血管病负荷与END的关联提供了数据支持。ADC值降低代表梗死区水分子扩散受阻，可量化细胞毒性水肿的严重程度，数值越低提示细胞损伤越重，神经元与胶质细胞的功能障碍也越显著，进而加重神经功能缺损[27]。相关研究证实，缺血区域相对ADC值（rADC）降低与早期神经功能恶化密切相关，当rADC≤0.67时，END的发生风险会升高（OR=13.7，95% *CI*：2.6~72.8）[28]；细胞水肿的进一步加剧会升高颅内压、压迫局部微循环，形成脑组织缺血缺氧的恶性循环，最终推动END的进展。

本研究结果显示，WMH体积与NEUT%、D-D、hs-CRP、入院7 d内NIHSS评分最大值呈正相关，ADC值与NEUT%、D-D、入院7 d内NIHSS评分最大值呈负相关，HVS阳性率与入院7 d内NIHSS评分最大值呈正相关，说明脑白质结构损伤、细胞水肿程度及血流动力学异常等MRI参数变化，可能与炎症、凝血相关指标及神经功能缺损程度存在相互影响。其机制可能为持续的炎症反应可通过损伤血管内皮细胞、促进血管壁纤维化等途径，加速脑小血管病变的进展，导致WMH体积增大[29,30]。凝血功能异常所引发的微血栓形成，会加重脑白质区域的血流灌注不足，加剧白质纤维的损伤。对于ADC值而言，中性粒细胞浸润后释放的炎症介质可破坏细胞膜的完整性，增加细胞内液体积聚，D-D所反映的血栓形成状态会加重局部缺血，抑制水分子扩散，使细胞毒性水肿加剧，ADC值降低。入院7 d内NIHSS评分最大值与WMH体积正相关，提示脑白质损伤越严重，神经功能缺损的峰值可能越高，这与脑白质内神经纤维束受损导致的神经传导障碍有关；其与ADC值负相关，表明细胞水肿越明显，神经功能缺损越严重，这是细胞结构破坏对神经功能产生的影响；其与HVS阳性率正相关，说明HVS所提示的血流动力学异常参与神经功能恶化过程，低灌注状态持续时间越长，神经功能缺损程度越重。既往针对107例急性小皮质下梗死患者的研究显示，灌注缺损患者END发生率更高[31]，本研究结果与之相互补充，进一步阐释了低灌注在END发生中的作用。

ROC曲线分析结果显示，HVS、WMH体积、ADC值联合预测AIS患者END的效能优于单一指标，说明多参数联合应用能更全面捕捉与END相关的病理生理信息。HVS从血流动力学角度反映脑灌注状态，WMH体积体现慢性血管病变的基础，ADC值则反映急性细胞损伤的程度，三者涵盖不同层面的病理改变。在临床实践中，可在患者入院后24 h内完成的头颅MRI检查中，系统评估HVS阳性情况、WMH体积及ADC值，同时结合NEUT%、FIB等实验室指标，对患者发生END的风险进行综合判断。对于联合预测提示高风险的患者，可加强血压、血糖等基础指标的调控，密切监测神经功能变化，及时调整抗血小板、改善循环等治疗方案，以降低END发生风险。

综上，基于MRI的HVS、WMH体积及ADC值均与AIS患者END存在关联，三者分别从脑血流动力学状态、慢性脑小血管病累积负荷、急性缺血性细胞损伤3个不同病理层面反映脑组织的病变特征，形成病理机制上的互补性，联合检测可提升对AIS患者END的预测效能，为临床开展AIS患者END的风险分层、早期识别高风险人群并制定个体化干预策略提供具体的影像学参考依据。但本研究为单中心回顾性研究，纳入的END例数相对有限，虽完成样本量估算，但未开展专门的统计效能分析，小样本下联合预测模型AUC值偏高，存在一定过拟合风险，研究结果的外推性受到一定限制。未来需通过多中心、大样本的前瞻性研究对本研究结果作进一步验证，同时可优化影像学联合预测模型，整合更多临床、实验室指标丰富预测体系，让AIS患者END的风险评估更贴合临床实践需求，进一步提升其在临床中的应用价值。

参考文献：

[1] Bogenschutz KM, Fisher DS, Wright GW. Acute ischemic stroke: a guideline-based overview of evaluation and management[J]. JAAPA, 2025, 38(5): 13-20.

[2] Martha SR, Pen AY, McGuire LS, et al. Lipidomics, acute ischemic stroke, symptoms, and outcomes: observational study protocol[J]. Nurs Res, 2023, 72(4): 326-33.

[3] 胡海洲, 李胜德, 倪 俊. 急性期液体容量负荷与穿支动脉粥样硬化病相关卒中临床结局分析: 多中心前瞻性队列研究[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2025, 25(5): 381-9.

[4] Tian T, Wang LJ, Xu JL, et al. Prediction of early neurological deterioration in acute ischemic stroke patients treated with intravenous thrombolysis[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2023, 43(12): 2049-59.

[5] Lei JJ, Peng YF, Li WB, et al. Stress hyperglycemia is associated with early neurologic deterioration in patients with acute ischemic stroke after intravenous thrombolysis without hemorrhagic transformation[J]. Diabetol Metab Syndr, 2024, 16(1): 285.

[6] Jiang ME, Li GM, He QM, et al. Multimodal imaging evaluation of early neurological deterioration following acute ischemic stroke[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(7): 4763-78.

[7] 施 斌, 陈 里. MRI扫描FLAIR序列HVS征对急性期脑梗死的诊断及预后评估价值探讨[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(8): 10-2.

[8] Zhao YF, Zhu H, Dai CF, et al. Predictive model for early neurological deterioration in acute ischemic stroke utilizing novel thrombotic biomarkers[J]. Brain Behav, 2025, 15(5): e70577.

[9] Coenen M, Biessels GJ, DeCarli C, et al. Spatial distributions of

white matter hyperintensities on brain MRI: a pooled analysis of individual participant data from 11 memory clinic cohorts[J]. NeuroImage Clin, 2023, 40: 103547.

[10] Calabrese E, Wu Y, Scheffler AW, et al. Correlating quantitative MRI-based apparent diffusion coefficient metrics with 24-month neurodevelopmental outcomes in neonates from the HEAL trial[J]. Radiology, 2023, 308(3): e223262.

[11] Gong PY, Liu YK, Gong YC, et al. The association of neutrophil to lymphocyte ratio, platelet to lymphocyte ratio, and lymphocyte to monocyte ratio with post-thrombolysis early neurological outcomes in patients with acute ischemic stroke[J]. J Neuroinflammation, 2021, 18(1): 51.

[12] 杨 晨, 万文辉. N-乙酰半胱氨酸在缺血性脑卒中的作用及机制[J]. 中山大学学报: 医学科学版, 2024, 45(2): 190-5.

[13] 马瑞楠, 张 东, 景新迎, 等. 急性缺血性脑卒中患者血小板和淋巴细胞比值与早期神经功能恶化的相关性分析[J]. 中风与神经疾病杂志, 2023, 40(8): 735-40.

[14] 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. 中国急性缺血性脑卒中诊治指南2018[J]. 中华神经科杂志, 2018, 51(9): 666-82.

[15] 毛永佳, 罗 鹏, 毛诗贤, 等. 急性缺血性脑卒中早期神经功能恶化预测模型构建及评价[J]. 现代预防医学, 2024, 51(1): 166-72.

[16] Zhao WB, Li SJ, Li CH, et al. Effects of tirofiban on neurological deterioration in patients with acute ischemic stroke: a randomized clinical trial[J]. JAMA Neurol, 2024, 81(6): 594-602.

[17] Wang J, Fu K, Wang ZQ, et al. MRI-based clinical-radiomics nomogram to predict early neurological deterioration in isolated acute pontine infarction: a two-center study in Northeast China[J]. BMC Neurol, 2024, 24(1): 39.

[18] Chou ML, Babamale AO, Walker TL, et al. Blood–brain crosstalk: the roles of neutrophils, platelets, and neutrophil extracellular traps in neuropathologies[J]. Trends Neurosci, 2023, 46(9): 764-79.

[19] Mehta V, Prabhakar R, Kumar R, et al. Fibrinogen as a predictor of early neurological deterioration and poor outcome in acute ischemic stroke[J]. J Assoc Physicians India, 2022, 70(4): 11-2.

[20] Nam KW, Kwon HM, Lee YS. Clinical significance of D-dimer levels during acute period in ischemic stroke[J]. Thromb J, 2023, 21(1): 55.

[21] 唐 晶, 李 环, 张 硕, 等. 急性缺血性脑卒中患者血清中同型半胱氨酸与炎症反应及氧化应激的关联性分析[J]. 吉林大学学报: 医学版, 2024, 50(3): 786-90.

[22] Li CX, Zhang XD. Progressive evaluation of ischemic occlusion in a macaque monkey with sudden exacerbation of infarction during acute stroke: a case report[J]. Vet Sci, 2025, 12(3): 231.

[23] Chen NH, Zhang YM, Jiang FP, et al. FLAIR vascular hyperintensity predicts early neurological deterioration in patients with acute ischemic stroke receiving endovascular thrombectomy[J]. Neurol Sci, 2022, 43(6): 3747-57.

[24] Mito R, Parker DM, Abbott DF, et al. White matter abnormalities characterize the acute stage of sports-related mild traumatic brain injury[J]. Brain Commun, 2022, 4(4): fcac208.

[25] Chung J, Park G, Ryu WS, et al. Distinct spatiotemporal patterns of white matter hyperintensity progression[J]. Nat Commun, 2025, 16: 9360.

[26] Zhao YX, Ning YY, Lei L, et al. Cerebral small vessel diseases and outcomes for acute ischemic stroke patients after endovascular therapy[J]. J Clin Med, 2022, 11(23): 6883.

[27] Liu H, Li TX, Ding YH, et al. Predictive accuracy of an ADC map for hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke patients after successful recanalization with endovascular therapy[J]. Ann Transl Med, 2022, 10(10): 591.

[28] Oge DD, Topcuoglu MA, Arsava EM. Apparent diffusion coefficient signature of ischemic tissue predicts neurological progression in isolated pontine infarcts[J]. Eur Stroke J, 2022, 7(1): 66-70.

[29] 苏芳慧, 杨清成, 郭艳平. 头颈血管超声预测脑小血管病重度脑白质病变的价值[J]. 中国超声医学杂志, 2025, 41(7): 724-8.

[30] Feng X, Taiwakuli M, Du JY, et al. Clinical and imaging risk factors for early neurological deterioration and long-term neurological disability in patients with single subcortical small infarction[J]. BMC Neurol, 2025, 25: 66.

[31] Pan YT, Tsai YH, Lee JD, et al. Evaluation of clinical relevance and underlying pathology for hemodynamic compromise in acute small subcortical infarction using MRI-based neuroimaging markers[J]. Biomed J, 2023, 46(2): 100529.

（编辑:林 萍）