

论 著

基于三维高分辨磁共振血管壁成像的影像组学模型评估大脑中动脉粥样硬化斑块的易损性*

闫婧晰¹ 吴 江^{2,*}

1.山西医科大学医学影像学院

(山西太原 030001)

2.山西省心血管病医院磁共振室

(山西太原 030027)

【摘要】目的 探究基于3D HRMR-VWI的影像组学模型评估大脑中动脉高危斑块易损性的价值。**方法** 回顾性分析358例大脑中动脉粥样硬化患者的临床和影像资料。根据临床症状与影像检查,将所有患者分为症状组和无症状组。按7:3的比例随机分训练集和测试集。使用ITK-SNAP软件在HRMR-VWI多序列中勾画感兴趣区,PyRadiomics软件包提取放射组学特征。构建传统影像特征模型、HRMR-VWI多序列模型、组合模型,并在测试集中验证各模型。采用受试者工作特征曲线、校准曲线及决策曲线评估各模型对斑块易损性的诊断效能。**结果** 共纳入194名患者,斑块内出血和斑块增强程度与症状性斑块独立相关。训练集与测试集中,组合模型的曲线下面积(AUC)最高,分别达到0.898和0.885,各模型之间差异无统计学意义($P>0.05$)。校准和决策曲线分析表明,组合模型具有更好的效能。**结论** 结合传统影像特征和平扫+增强的组合模型可较好地识别高危斑块,对识别大脑中动脉粥样硬化患者的易损斑块具有一定价值。

【关键词】 高分辨磁共振血管壁成像;
动脉粥样硬化斑块; 大脑中动脉;
缺血性脑卒中; 影像组学

【中图分类号】 R445.2

【文献标识码】 A

【基金项目】 山西省高等学校科技创新项目(2022L208)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.02.006

Three-dimensional High-Resolution Magnetic Resonance Vessel Wall Imaging-based Radiomics Model for Assessing Middle Cerebral Artery Atherosclerotic Plaque Vulnerability*

YAN Jing-xi¹, WU Jiang^{2,*}.

1.College of Medical Imaging, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

2.Department of Magnetic Resonance Imaging, Shanxi Cardiovascular Hospital, Taiyuan 030027, Shanxi Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the value of radiomics models based on three-dimensional high-resolution magnetic resonance vessel wall imaging (3D HRMRVWI) for assessing high-risk plaque vulnerability in the middle cerebral artery. **Methods** Clinical and imaging data of 358 patients with middle cerebral artery atherosclerosis were retrospectively analyzed. All patients were divided into symptomatic and asymptomatic groups based on clinical symptoms and imaging examinations. They were randomly divided into training and test sets in the ratio of 7:3. Regions of interest were depicted in HRMR-VWI multiple sequences using ITK-SNAP software, and radiomics features were extracted using PyRadiomics software package. Construct conventional image feature model, HRMR-VWI multi-sequence models and combined model, and validate each model in the test set. The diagnostic efficacy of each model for plaque vulnerability in the training and test sets was evaluated using receiver operating characteristic curve, calibration curves, and decision curves. **Results** A total of 194 patients were included. Intraplaque hemorrhage and degree of plaque enhancement were independently associated with symptomatic middle cerebral artery plaques. The area under the curve (AUC) of the combined model was the highest in the training and test sets, reaching 0.898 and 0.885, respectively, and the differences between the models were not statistically significant ($P>0.05$). Calibration and decision curve analysis showed that the combined model had better efficacy. **Conclusion** The combined model combining 3D T1WI pre-and post-contrast with conventional imaging features can better identify high-risk plaques, which is valuable for identifying vulnerable plaques in patients with middle cerebral atherosclerosis.

Keywords: High-resolution Magnetic Resonance Vessel Wall imaging; Atherosclerotic Plaque; Middle Cerebral Artery; Ischemic Stroke, Radiomics

缺血性脑卒中(ischemic stroke, IS)是临床最常见的脑血管疾病,起病急、进展快、病情凶险。在亚洲国家,其主要发病机制为大脑中动脉粥样硬化^[1]。斑块形成可导致管壁硬化重构、管腔狭窄或闭塞,斑块破裂及继发血栓形成会进一步阻碍血流,引起相应脑组织缺血,从而导致中枢神经系统功能障碍^[2]。因此,早期识别高危动脉斑块并准确预测患者发生急性缺血性脑卒中,对指导临床干预和改善预后具有重要意义。

高分辨磁共振血管壁成像(high resolution magnetic resonance imaging vascular wall imaging, HRMR-VWI)能清晰显示管壁结构,是目前诊断颅内动脉粥样硬化的重要无创手段^[3-4]。斑块内出血、斑块强化及血管壁重构模式等影像特征可作为预测脑血管事件的有效指标,但由于技术局限性和对斑块成分判断的主观性,颅内动脉粥样硬化斑块的准确评估仍面临挑战^[5-6]。影像组学通过提取和分析图像中的高通量特征,可全面反映病变的组织学和生物学信息,已广泛应用于肿瘤疾病的诊断与预后评估^[7-9],近年来也逐渐应用于颅内动脉粥样硬化疾病的评估,展现出较大潜力^[10-12]。

因此,本研究旨在基于HRMR-VWI,结合传统影像特征与影像组学特征,建立预测大脑中动脉粥样硬化斑块易损性的模型,以期对缺血性脑卒中的预防与治疗提供新思路。

1 资料与方法

1.1 患者 回顾性分析2021年9月至2023年12月在山西省心血管病医院同时接受高分辨磁共振血管壁成像与头颅弥散加权成像检查的358例大脑中动脉粥样硬化患者。根据检查前2周内是否出现临床症状(短暂性脑缺血发作或前循环缺血性脑卒中)及弥散有无高信号,将患者分为有症状组与无症状组^[13-14]。收集年龄、性别及动脉粥样硬化危险因素等临床资料。排除同侧颈内动脉狭窄 $>50\%$ 、非动脉粥样硬化性血管病变、心源性栓塞、图像质量差及MRI/钆对比剂禁忌症患者,最终194名患者纳入研究。按7:3比例随机分为训练集($n=135$)与测试集($n=59$)。本研究经医院伦理委员会批准(审批号:2023xxg003),免签知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 磁共振成像 本研究中,所有患者均使用德国西门子公司Skyra 3.0T磁共振扫描仪,

【第一作者】闫婧晰,女,在读研究生,主要研究方向:心脑血管病影像。E-mail: 15333511598@163.com

【通讯作者】吴 江,女,主任医师,主要研究方向:心脑血管病影像。E-mail: wujiang1024@sina.com

32通道头颈联合高分辨专用线圈, 仰卧位, 头先进。应用以下序列获得图像: (1)轴位DWI(TR 4200ms, TE 94ms, 层厚6mm, b=0/1000 s/mm²); (2)3D TOF MRA(TR 20ms, TE 3.5ms, 层厚0.6mm); (3)3D T1 HRMR-VWI平扫及增强(TR 900ms, TE 15ms, 层厚0.63mm), 增强扫描采用钆布醇(0.1 mmol/kg)注射后5分钟进行。

1.2.2 图像分析与分割 将原始图像导入西门子后处理工作站(Syngo;Siemens Healthineers)。斑块特征如下: 斑块内出血(Intraplaque Hemorrhage, IPH)、斑块强化程度及斑块所在位置最小管腔面积(Minimum Lumen Area, MLA)。IPH定义为T1WI显示病灶的信号强度 \geq 相邻肌肉信号的150%。斑块强化程度以垂体为参照分为3级: 无强化(0级)、低于垂体强化(1级)、与垂体强化相当(2级)^[13]。在增强前后图像上手动勾勒出血管内腔和外壁边界, 以测量斑块所在位置MLA。所有定量及定性指标由两名医生测量后取平均值, 有分歧时则由另一名资深主任医师重新评估并协商讨论达成共识。

使用ITK-SNAP(3.8.0)软件进行斑块分割, 由一名影像医生在3D T1WI增强前后图像逐层勾画ROI。由于大脑中动脉管径细、管壁薄, ROI区域较小, 且扫描中斑块可能轻微移位, 因此在特征评估后立即完成勾画。随机抽取30例患者由另一名医生重复分析, 用于评估组内一致性(Interclass correlation coefficient, ICC)。

病灶的分割在ITK-SANP(3.8.0)软件中进行。由一名影像医生分别在3D T1WI增强前后图像上对斑块的边缘进行逐层勾画, 获

得感兴趣区域(Region of Interest, ROI)。大脑中动脉管径细小、管壁较薄等解剖特点使得整体斑块的ROI区域很小。随着长时间的扫描和钆剂刺激作用, 斑块位置会略微变化, 因此初步评估斑块特征后立即完成各序列的ROI勾画。一段时间后, 再从所有研究人群中随机抽取30名患者, 由另一名医生再次分析斑块, 评估组内一致性(Interclass correlation coefficient, ICC)。

1.2.3 影像组学特征提取、选择及模型构建 本研究使用Python中的Pyradiomics包进行影像组学特征提取。首先, 对3D T1WI平扫和增强图像分别进行Z-score标准化, 使图像灰度值符合标准正态分布。随后, 选取两次测量ICC>0.8的特征以确保稳定性, 最终从平扫和增强图像中各提取1316个特征。进一步对单因素分析中具有统计学意义的特征进行多因素逻辑回归分析, 筛选出在多因素分析中仍具显著性的特征。在此基础上, 采用最小冗余最大相关(MRMR)方法进行特征降维, 并结合最小绝对收缩和选择算子回归(Lasso)进行特征选择, 通过交叉验证确定最佳正则化参数 λ , 保留系数非零的特征作为最终特征集。根据筛选后的特征及其系数, 分别计算平扫和增强的影像组学评分(Radscore), 计算公式为: $Radscore = Intercept + \sum_{i=1}^n coef_i \times feature_i$ 。具体特征见(表1)。最后, 采用逻辑回归方法分别构建以下模型: 3D T1WI平扫模型、3D T1WI增强模型、3D T1WI平扫+增强模型, 以及联合传统影像特征的组合模型。

表1 3D T1WI和3D T1WI增强序列影像组学特征及其系数

	特征名称	系数
3D T1WI序列(n=9)	gradient_glcm_InverseVariance	-0.10996739
	lbp_3D_m1_firstorder_10Percentile	0.02408863
	lbp_3D_m1_firstorder_Kurtosis	0.04911647
	logarithm_glszm_SmallAreaLowGrayLevelEmphasis	0.00810668
	square_glszm_LargeAreaLowGrayLevelEmphasis	0.00697893
	square_glszm_SizeZoneNonUniformity	-0.16040414
	wavelet_LHL_gldm_LargeDependenceLowGrayLevelEmphasis	0.03971171
	wavelet_LHH_glcm_MCC	-0.06947607
	wavelet_HLH_glszm_SmallAreaEmphasis	0.01518545
3D T1WI增强序列(n=6)	square_glcm_Idmn	-0.02829052
	wavelet_LHH_gldm_LargeDependenceLowGrayLevelEmphasis	0.03305869
	wavelet_LHH_glszm_ZoneEntropy	-0.08309180
	wavelet_HLL_glcm_InverseVariance	0.02015934
	wavelet_HLH_gldm_LargeDependenceLowGrayLevelEmphasis	0.03660216
	wavelet_HHH_glrIm_LongRunHighGrayLevelEmphasis	0.12790926

1.3 统计学分析 所有统计分析均使用Python statamodels(0.13.2)和IBM SPSS Statistics 27.0进行。符合正态分布的计量资料以均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示, 组间定量变量采用t检验或Mann-Whitney U检验; 计数资料以频数(n)、百分率(%)表示, 分类变量采用卡方检验, $P < 0.05$ 有统计学意义。在单因素分析中具有统计显著性的变量进一步在多因素回归分析中分析。Logistic回归计算优势比(odds ratio, OR)和95%可信区间(confidence intervals, CI)。使用ROC曲线和AUC评估各模型预测症状性斑块的效能。采用Hosmer-Lemeshow检验比较各模型的拟合度, 同时绘制决策曲线来评估各模型的临床效益。

2 结果

2.1 临床资料及影像特征分析 本次研究中一共纳入了194例患者, 有111名症状性斑块患者, 83名无症状性斑块患者。表1比较了症状组和无症状组之间的临床因素和影像学特征。纳入的111个症状性斑块组中, 高血压史93例, 高血脂史24例, 糖尿病史41例, 吸烟史56例, 饮酒史46例, 冠心病史15例, 脑卒中史28例, 斑块内出血43例, 斑块没有明显强化的只有8例。单因素分析时糖尿病、斑块内出血及斑块增强程度因素均有统计学意义($P < 0.001$, 表1)。进一步进行多因素logistic回归分析, 斑块内出血(OR=1.180, 95%CI: 1.051~1.324, $P < 0.05$)和斑块增强程度

(OR=1.135, 95%CI: 1.057~1.219, $P < 0.05$)具有统计学意义, 是症状性斑块的独立危险因素。具体见(表2)。

2.2 各影像组学模型性能评估 本研究最终从3D T1WI平扫及增强图像中分别筛选出9个与6个最具预测价值的影像组学特征(表1)。平扫与增强的影像组学评分(Radscore)之间存在显著差异。在训练集中, 基于传统特征(斑块内出血与斑块强化)的模型、平扫模型、增强模型及平扫+增强联合模型的预测AUC值分别为0.632、0.750、0.798和0.843; 在测试集中, 对应模型的AUC值分别为0.615、0.729、0.789和0.815。进一步构建的联合模型(融合传统特征与平扫+增强影像组学特征)表现出最优的诊断效能。在训练集中, 其AUC为0.898, 准确率0.814, 敏感性0.824, 特异性0.800, F1分数0.836; 在测试集中, AUC为0.885, 准确率0.770, 敏感性0.792, 特异性0.741, F1分数0.797。模型的其他性能指标详见表3。组合模型的诊断效能显著优于其他单一模型($P > 0.05$) (图1)。为便于临床应用, 基于该组合模型构建了列线图, 可直观评估症状性大脑中动脉斑块的脑卒中风险(图2)。校准曲线显示, 模型在训练集与测试集中的预测值与实际观察值均吻合良好, 偏移较小, 表明其具有可靠的校准度(图3)。决策曲线分析进一步显示, 该组合模型在较宽的风险阈值范围内均能提供更高的临床净收益, 临床应用价值优于其他模型(图4)。

表2 大脑中动脉斑块的临床和影像学特征

	单因素分析			多因素logistics分析		
	总数(%)	症状组	无症状组	P值	OR(95%CI)	P值
年龄	58.42±9.95	57.85±9.84	59.19±10.11	0.353	/	/
性别	0.936	/	/			
男	128(66%)	74	54			
女	66(34%)	37	29			
高血压	160(82.5%)	93	67	0.716	/	/
高血脂	37(19.1%)	24	13	0.389	/	/
糖尿病	58(29.9%)	41	17	<0.001	1.093(1.009,1.220)	0.184
吸烟	98(50.5%)	56	42	0.613	/	/
饮酒	81(41.8%)	46	37	0.804	/	/
冠心病史	26(13.4%)	15	11	0.150	/	/
脑卒中史	45(23.2%)	28	17	0.547	/	/
斑块内出血	54(27.8%)	43	11	<0.001	1.180(1.051,1.324)	0.019
最小管腔面积(cm ²)	0.0074±0.0048	0.0073±0.0047	0.0075±0.0048	0.057	/	/
斑块增强程度						
0	28(14.4%)	8	20	<0.001	1.135(1.057,1.219)	0.004
1	60(31.0%)	27	33			
2	106(54.6%)	76	30			

表3 各模型在训练集和测试集的预测效能

模型	AUC	敏感性	特异性	准确性	F1分数	阳性预测值	阴性预测值
训练集(n=135)							
传统影像特征模型	0.632	0.441	0.776	0.559	0.536	0.682	0.489
3D T1WI平扫模型	0.750	0.961	0.207	0.637	0.751	0.617	0.800
3D T1WI增强模型	0.798	0.961	0.483	0.756	0.818	0.712	0.903
平扫+增强模型	0.843	0.974	0.155	0.622	0.746	0.605	0.818
组合模型	0.898	0.824	0.800	0.814	0.836	0.848	0.769
测试集(n=59)							
传统影像特征模型	0.615	0.390	0.720	0.556	0.500	0.698	0.486
3D T1WI平扫模型	0.729	0.971	0.160	0.627	0.750	0.611	0.800
3D T1WI增强模型	0.789	0.853	0.360	0.644	0.734	0.644	0.643
平扫+增强模型	0.815	0.971	0.280	0.678	0.776	0.647	0.875
组合模型	0.885	0.792	0.741	0.770	0.797	0.803	0.729

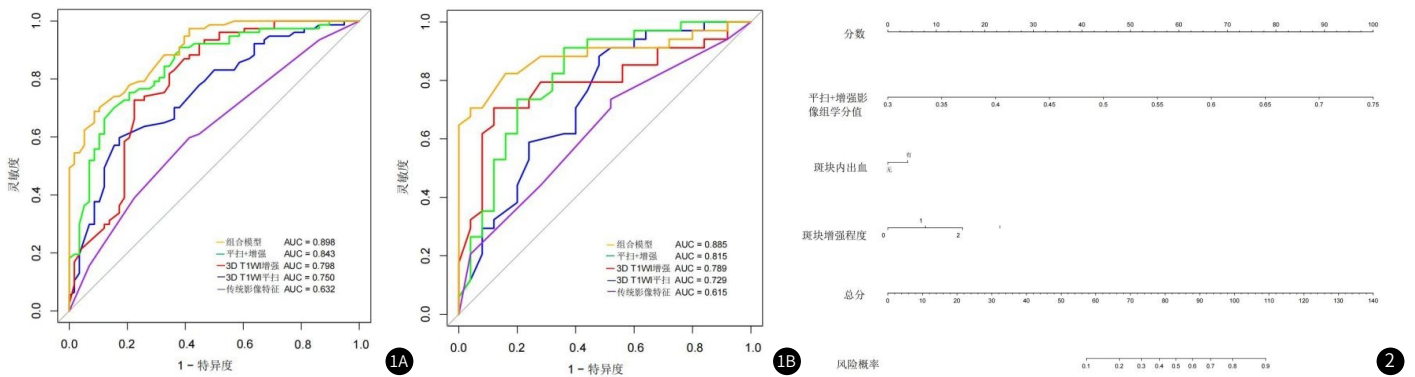


图1 训练集(图1A)及验证集(图1B)中各模型的受试者操作特征曲线图。
图2 结合斑块内出血、斑块增强程度及3D TIWI平扫及增强序列特征建立的组合模型的列线图识别有症状的斑块。

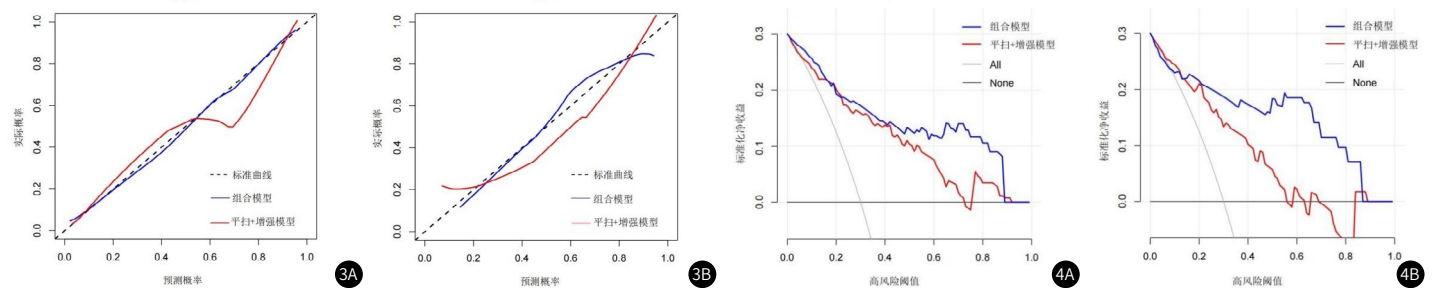


图3 组合模型及平扫+增强模型在训练集(3A)和测试集(3B)中的校准曲线图,校准曲线越接近标准曲线,模型的校准程度越高,图中可见组合模型的曲线偏移较小。
图4 组合模型及平扫+增强模型在训练集(4A)和测试集(4B)中的决策曲线分析图,A11表示假设所有患者都有症状性斑块, None表示假设所有患者都没有症状性斑块,图中所示组合模型呈现出优势。

3 讨论

本研究采用高分辨磁共振血管壁成像技术详细地观察脑卒中患者的大脑中动脉斑块的微小变化,发现斑块内出血(IPH)和斑块增强程度是大脑中动脉斑块引起脑卒中症状的独立危险因素,这与既往研究结果相一致。Yang等人的研究证实,斑块对比增强和IPH与下游缺血事件显著相关^[16];贾啟龙等人指出,IPH在有症状的动脉粥样硬化性狭窄患者中的发生率远高于无症状者^[17];Min等人则发现HR-MRI所显示的IPH与颅内动脉狭窄的进展密切相关,狭窄进展患者的IPH发生率显著更高^[18]。此外,相较于颈动脉和冠状动脉,颅内动脉斑块的强化现象被认为具有更重要的临床意义^[19]。Sun等人的研究进一步指出,斑块强化程度随时间呈动态变化,采用多相对比增强HR-VWI技术并在造影剂注射后延迟9分钟进行图像采集,能够最大化斑块的强化效果,从而更有效地区分责任斑块与非责任斑块^[20]。

传统影像学评估在很大程度上依赖于医师的主观视觉判断,存在一定的局限性。为了克服这一不足,影像组学技术应运而生,它能够大量客观、定量且不依赖于观察者的图像特征数据。作为该领域标准化应用的重要探索,首项基于3D HRMRI的影像组学结合机器学习的研究表明,所构建的模型能够有效区分症状性与无症状性颅内动脉斑块,且融合了影像组学特征与传统影像特征的组合模型,其诊断性能显著优于单一的传统模型^[21]。本研究亦遵循了相似的思路,将筛选出的独立危险因素(IPH与斑块强化)与3D T1WI平扫及增强序列提取的影像组学特征相结合,构建了组合预测模型。结果显示,该组合模型对于症状性斑块的预测效能(AUC达到0.885)优于单独的平扫模型或增强模型。同时,本研究所构建的各模型均表现出较高的敏感性,这或许反映了在缺血性脑卒中中易损斑块的风险评估中,临床实践倾向于采取更为积极的预防策略,因而对检测的灵敏度提出了更高要求。

近年来,影像组学在颅内动脉粥样硬化斑块评估中的应用不断深化。例如,Tang等人开发并验证了一种融合了临床高危因素、斑块传统影像学特征及影像组学特征的列线图模型,该模型被证明是预测症状性颅内动脉粥样硬化患者卒中复发的可靠个性化工具^[22]。另一项利用7T超高场强磁共振的研究则更深入地分析了斑块的影像组学特征差异,发现“罪犯斑块”在增强前后图像中,其“短期运行强调”和“运行长度不均匀性”等纹理特征可能提示IPH的存在。这些特征量化了图像中同质体系区域的分布规律与异质性,共同刻画了斑块强化模式的细微变化与粗糙程度。该研究还观察到,“罪犯斑块”在增强后的“灰度尺寸区域矩阵”参数值较高,这通常意味着斑块内部成分更加不均质,而这种不均质性可能与斑块的易损性及破裂风险增加有关^[23]。因此,研究认为,同一患者体内的症状性斑块与非症状性斑块相比,可能具有独特的影像组学特征。上述研究提及的多个特征参数在本研究亦被提取并用于建模,然而,本研究尚未系统性地比较和深入挖掘增强前后这些关键参数值的动态变化及其临床意义。未来的研究可以在此基础上,进一步分析不同影像组学特征参数的演变规律,从而实现颅内动脉粥样硬化斑块更精细、更准确的风险分层。

本研究也有以下的局限性。首先,这是一项针对有限患者的单中心回顾性研究。分组的参考标准未经病理证实,因此,在进行症状性斑块分组时只能依据临床表现及影像特征,会造成一定的选择偏差。其次,因颅内动脉斑块整体偏小,而正常的大脑中动脉血管壁非常薄,本研究中手动分割ROI可能导致主观误差,影响影像组学分析的准确性。最后,影像组学模型中存在一定的过拟合现象,需要更精细的数据预处理方法,提高模型的泛化能力,使影像组学模型发挥出最大的价值,为医学诊断和治疗提供更准确的辅助。

综上所述,基于3D HRMR-VWI的影像组学分析,为揭示大脑中动脉粥样硬化易损斑块蕴含的深层信息提供了有力工具。将斑块内出血、斑块强化的传统影像学特征,与3D T1WI平扫及增强序列提取的定量影像组学特征相结合,能够构建出效能优异的组合预测模型,从而为缺血性脑卒中的早期预警、个体化干预及改善患者预后提供重要的参考依据。

参考文献

- [1] Banerjee C, Chimowitz MI. Stroke Caused by Atherosclerosis of the Major Intracranial Arteries [J]. *Circ Res*, 2017, 120(3): 502-513.
- [2] Zhao Y, Zhang X, Chen X, et al. Neuronal injuries in cerebral infarction and ischemic stroke: From mechanisms to treatment (Review) [J]. *Int J Mol Med*, 2022, 49(2): 15.
- [3] Ameli R, Eker O, Sigovan M, et al. Multifocal arterial wall contrast-enhancement in ischemic stroke: a mirror of systemic inflammatory response in acute stroke [J]. *Rev Neurol (Paris)*, 2020 Mar; 176(3): 194-199.
- [4] Guggenberger K, Krafft AJ, Ludwig U, et al. High-resolution compressed-sensing t1 black-blood mri: a new multipurpose sequence in vascular neuroimaging? [J]. *Clin Neuroradiol*, 2021 Mar; 31(1): 207-216.
- [5] Zhao JJ, Lu Y, Cui JY, et al. Characteristics of symptomatic plaque on high-resolution magnetic resonance imaging and its relationship with the occurrence and recurrence of ischemic stroke [J]. *Neurol Sci*, 2021, 42(9): 3605-3613.
- [6] 荆彦平, 黄敏, 吴连强, 等. 头颈动脉高分辨MRI在斑块性质中的评估价值 [J]. *影像研究与医学应用*, 2022, 6(20): 131-133.
- [7] Warkentin MT, Al-Sawaihey H, Lam S, et al. Radiomics analysis to predict pulmonary nodule malignancy using machine learning approaches [J]. *Thorax*, 2024 Mar 15; 79(4): 307-315.
- [8] Fan H, Luo Y, Gu F, et al. Artificial intelligence-based MRI radiomics and radiogenomics in glioma [J]. *Cancer Imaging*, 2024, 24(1): 36.
- [9] 胡金玥, 白志明, 王刚, 等. 影像组学在前列腺癌诊治中的应用现状及展望 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(12): 175-178.
- [10] 王玥, 侯晓雯, 陈会生, 等. 基于颅内斑块影像组学联合传统标志物预测缺血性脑卒中复发风险 [J]. *磁共振成像*, 2023, 14(8): 1-9.
- [11] Shi Z, Li J, Zhao M, et al. Quantitative histogram analysis on intracranial atherosclerotic plaques: a high-resolution magnetic resonance imaging study [J]. *Stroke*, 2020 Jul; 51(7): 2161-2169.
- [12] 张归玲, 方纪成, 王振熊, 等. 三维高分辨率MR血管壁成像鉴别症状性大脑中动脉粥样硬化责任斑块的影像组学研究 [J]. *中华放射学杂志*, 2023, 57(1): 27-33.
- [13] Azizyan A, Sanossian N, Mogensen MA, et al. Fluid-attenuated inversion recovery vascular hyperintensities: an important imaging marker for cerebrovascular disease [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011 Nov-Dec; 32(10): 1771-5.
- [14] Zhao X, Hippe DS, Li R, et al. Prevalence and characteristics of carotid artery high-risk atherosclerotic plaques in chinese patients with cerebrovascular symptoms: a Chinese atherosclerosis risk evaluation II study [J]. *J Am Heart Assoc*, 2017 Aug 14; 6(8): e005831.
- [15] Qiao Y, Zeiler SR, Mirbagheri S, et al. Intracranial plaque enhancement in patients with cerebrovascular events on high-spatial-resolution MR images [J]. *Radiology*, 2014 May; 271(2): 534-42.
- [16] Yang R, Yuan J, Chen X, et al. Vessel wall magnetic resonance imaging of symptomatic middle cerebral artery atherosclerosis: a systematic review and meta-analysis [J]. *Clin Imaging*, 2022 Oct; 90: 90-96.
- [17] 贾啟龙, 刘志飞, 李亮杰. 症状性颅内动脉狭窄患者HR-MRI特征与卒中风险的关系 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22(09): 29-31.
- [18] Baek MS, Lee KH, Cho SY, et al. Changes of atherosclerotic plaque in cerebral artery stenosis according to high-resolution MR imaging [J]. *Tomography*, 2022, 8(4): 1690-1701.
- [19] Yang WJ, Abrigo J, Soo YO, et al. Regression of plaque enhancement within symptomatic middle cerebral artery atherosclerosis: a high-resolution MRI study [J]. *Front Neurol*, 2020 Jul 28; 11: 755.
- [20] Sun B, Wang L, Li X, et al. Delayed enhancement of intracranial atherosclerotic plaque can better differentiate culprit lesions: a multiphase contrast-enhanced vessel wall MRI study [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2024, 45(3): 262-270.
- [21] Li H, Liu J, Dong Z, et al. Identification of high-risk intracranial plaques with 3D high-resolution magnetic resonance imaging-based radiomics and machine learning [J]. *J Neurol*, 2022, 269(12): 6494-6503.
- [22] Tang M, Gao J, Ma N, et al. Radiomics nomogram for predicting stroke recurrence in symptomatic intracranial atherosclerotic stenosis [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 851353.
- [23] Sanchez S, Veeturi S, Patel T, et al. 7T-high resolution MRI-derived radiomic analysis for the identification of symptomatic intracranial atherosclerotic plaques [J]. *Interv Neuroradiol*, 2024 Aug 30: 15910199241275722.

(收稿日期: 2024-11-21)

(校对编辑: 韩敏求)