

## • 中枢神经影像学 •

# 基于常规 MRI 影像组学预测急性脑梗死出血性转化的价值

丁俊,陈基明,邵颖,丁治民,昌杰

**【摘要】** 目的:探讨基于常规 MRI 影像组学预测急性脑梗死出血性转化(HT)的价值。方法:回顾性分析我院 2017 年 1 月—2022 年 12 月 120 例急性脑梗死(HT 阳性 60 例,HT 阴性 60 例)的完整资料。所有患者均接受头颅常规 MRI 扫描,并随机将患者以 7:3 的比例分为训练组( $n=84$ )和验证组( $n=36$ )。运用软件勾画病灶 ROI 及提取纹理特征,利用最小冗余最大相关(mRMR)及最小绝对值收敛和选择算子(LASSO)回归分析筛选特征,构建影像组学模型。绘制受试者操作特征(ROC)曲线、应用决策曲线分析(DCA)评估模型的预测能力、临床应用价值。结果:临床模型、常规 MRI 模型、联合序列影像组学模型、个性化模型 1 及个性化模型 2 在训练组和验证组中曲线下面积(AUC)值分别为 0.72 (0.61~0.83) 和 0.68(0.50~0.86)、0.93(0.86~0.98) 和 0.93(0.79~0.99)、0.97(0.94~1.00) 和 0.97 (0.93~1.00)、0.96(0.92~1.00) 和 0.99(0.98~1.00)、0.98(0.95~1.00) 和 0.98(0.96~1.00)。DCA 表明个性化模型 2 患者临床受益好于个性化模型 1。结论:常规 MRI 模型、联合序列影像组学模型、个性化模型 1、个性化模型 2 均优于临床模型的诊断效能,均具有很高预测急性脑梗死出血性转化的价值。个性化模型 1、2 诊断效能相当,但个性化模型 2 患者临床受益好于个性化模型 1。

**【关键词】** 急性脑梗死; 影像组学; 出血性转化

**【中图分类号】** R445.2;R743.33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)07-0859-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.07.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**Value of radiomics based on conventional MRI in predicting hemorrhagic transformation in acute cerebral infarction** DING Jun, CHEN Ji-ming, SHAO Ying, et al. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Wannan Medical College (Yijishan Hospital), Anhui 241001, China

**【Abstract】** **Objective:** To investigate the value of radiomics based on conventional MRI in predicting hemorrhagic transformation (HT) in acute cerebral infarction. **Methods:** In this retrospective study, 120 patients with acute cerebral infarction from January 2017 to December 2022 in our hospital were enrolled and divided into HT positive group ( $n=60$ ) and HT negative group ( $n=60$ ). All patients underwent routine head MRI scan and were randomly assigned to the training group ( $n=84$ ) and the validation group ( $n=36$ ) in a 7:3 ratio. Lesion ROI was delineated and texture features were extracted using software. Minimum redundancy maximum relevance (mRMR) and least absolute shrinkage and selection operator (LASSO) regression analysis were used to screen features and establish radiomics signature. The performance and the clinical usefulness of the models was assessed by receiver operating characteristic (ROC) curve and decision curve analysis (DCA). **Results:** The area under curve (AUC) (95%CI) values of clinical model, conventional MRI model, combined sequential radiomics model, personalized model 1 and personalized model 2 in the training and validation groups were 0.72 (0.61~0.83) and 0.68 (0.50~0.86), 0.93 (0.86~0.98) and 0.93 (0.79~0.99), 0.97 (0.94~1.00) and 0.97 (0.93~1.00), 0.96 (0.92~1.00) and 0.99 (0.98~1.00), 0.98 (0.95~1.00) and 0.98 (0.96~1.00), respectively. DCA demonstrated that personalized model 2 was better than personalized model 1 for clinical benefits. **Conclusion:** Compared with clinical model, the conventional MRI model, combined sequential radiomics model, personalized model 1 and personalized model 2 have better diagnostic efficacy to

**作者单位:**241001 安徽芜湖,皖南医学院第一附属医院(弋矶山医院)放射科(丁俊、陈基明、邵颖、丁治民);241002 安徽芜湖,皖南医学院医学信息学院(昌杰)

**作者简介:**丁俊(1989—),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主治医师,主要从事中枢神经系统影像学诊断工作。

**通讯作者:**陈基明,E-mail:yjsyyycjm@126.com

**基金项目:**安徽省卫生健康科研项目(AHWJ2022b044);安徽省自然科学基金面上项目(2108085MF205)

predict hemorrhagic transformation in acute cerebral infarction. Although personalized model 1 and 2 have similar diagnostic performance, personalized model 2 has better clinical benefits.

**【Key words】** Acute cerebral infarction; Radiomics; Hemorrhagic transformation

急性脑梗死是一种高致残率、高致死率的疾病，预后往往不良<sup>[1]</sup>。急性脑梗死后由于缺血脑组织血脑屏障(blood-brain barrier, BBB)的破坏，血流再灌注损伤导致继发性出血，称为脑梗死出血性转化(hemorrhagic transformation, HT)。HT 可以发生于急性脑梗死患者的自然转归过程的任一阶段，也可以出现于卒中治疗之后<sup>[2-3]</sup>。目前其发病率为 38%~71%，其中 0.6%~20% 为症状性<sup>[4]</sup>。HT 的发生对治疗方案的选择及患者预后有重要影响，这迫使临床医生不得不早期对患者治疗后再出血进行风险预测，从而提高血管内治疗的安全性及改善患者预后<sup>[5-6]</sup>。HT 通常借助临床症状及影像特征来评估和诊断，然而临床症状的判断具有主观性、准确性不高<sup>[7-8]</sup>；常规影像表现尚不能实现及时预测<sup>[9-10]</sup>，因而找到 HT 的敏感预测指标愈发重要。近年来影像组学的迅猛发展为 HT 的预测提供了新的思路，其通过挖掘、筛选急性脑梗死图像中诸多定量特征的信息<sup>[11-12]</sup>，建立分类器来辅助判断是否出现 HT，实现精准诊断及预测<sup>[13]</sup>。笔者旨在基于常规 MRI 图像的组学特征构建预测急性脑梗死 HT 模型，并比较临床模型、常规 MRI 模型、联合序列影像组学模型和个性化模型预测效能，探讨影像组学预测急性脑梗死 HT 的价值。

## 材料与方法

### 1.一般资料

回顾性分析本院 2017 年 1 月—2022 年 12 月的 120 例急性脑梗死患者的病例资料。纳入标准：①发病在 6 h 以内，符合中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2018 标准<sup>[14]</sup>并进行标准治疗；②治疗前 CT 平扫证实未出现脑出血；③符合 2019 中国急性脑梗死后出血转化诊治共识中出血性脑梗死的诊断标准<sup>[15]</sup>；④美国国立卫生院神经功能缺损量表(NIHSS)评分 ≥5 (NIHSS<5 分的轻微损伤很少有 HT)；⑤均为边界清晰的单病灶，且病灶最大径 >1.0 cm；⑥凝血功能正常。排除标准：①影响观察及测量的图像；②既往有脑卒中病史者；③脑血管畸形患者；④存在外伤或手术史、孕妇、哺乳期患者；⑤严重代谢紊乱、肿瘤等患者。根据入院两周内复查颅脑 MRI 是否发生 HT 分为 HT 阳性组(n=60)与 HT 阴性组(n=60)；随机将患者按 7:3 的比例分为训练组 84 例(HT 阳性 42 例, HT 阴性 42 例)和验证组 36 例(HT 阳性 18 例, HT 阴性 18 例)。经医院科研与新技术伦理委员会批准，免除受试者知

情同意。

### 2.检查方法

采用 GE Signa HDxt3.0T 磁共振仪，8 通道头颅线圈。患者取仰卧位，采用横轴面扫描。扫描序列及参数： $T_1$  WI: TR 2000 ms, TE 24 ms, 层厚 6.0 mm, 层间距 2 mm, 视野(FOV) 240 mm × 240 mm, 矩阵 288 × 288； $T_2$  WI: TR 9000 ms, TE 170 ms, 层厚 6.0 mm, 层间距 2 mm, FOV 240 mm × 240 mm, 矩阵 288 × 288；扩散加权像(DWI) 单次激发 SE-EPI: b 值 1000 s/mm<sup>2</sup>, TR 4800 ms, TE 74.5 ms, 层厚 6 mm, 层间距 2 mm, FOV 240 mm × 240 mm, 矩阵 160 × 160。

### 3.图像分析

由两位 MRI 诊断医师(具有 15 年以上工作经验)共同阅片，意见不一致时协商讨论解决。观察并分析脑梗死的部位、形态、大小、信号特征及周围有无水肿等。在  $T_1$  WI 图像上测量脑梗死最大径。分别于横轴面  $T_1$  WI、 $T_2$  WI 及 ADC 图像上勾画 ROI 测量各序列信号强度及 ADC 值，同时于正常脑干白质区域勾画另一 ROI，所有 ROI 形状、大小保持一致( $\geq 10 \text{ mm}^2$ )，每位医师测量 3 次，取平均值。然后计算  $T_1$  WI、 $T_2$  WI 上病灶与正常脑干白质区域信号比值(RT<sub>1</sub>、RT<sub>2</sub>)。

### 4.提取、筛选纹理特征及建立影像组学标签

将  $T_1$  WI、 $T_2$  WI 和 DWI 图像导入 ITK-SNAP(3.6.0 版本)软件，分别由两位放射科医师(具有 5 年和 15 年以上工作经验)参考  $T_1$  WI(HT 阳性)、DWI(HT 阴性)图像，沿病变边缘手动逐层勾画 ROI 并融合成三维图像，使用 AK(GE:3.2.0 版)软件提取纹理特征。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)评价两位医师提取特征的一致性，保存一致性较好(ICC ≥ 0.75)的特征，然后运用最小冗余最大相关(minimum redundancy maximum relevance, mRMR)特征选择及最小绝对值收敛和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)回归筛选出最优特征，构建影像组学标签，并依据权重计算标签得分(radiology score, rad-score)，在验证组上进行验证。

### 5.统计分析

统计分析采用 SPSS 18.0 软件和 R 软件(版本 3.5.2)。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验进行正态性检验，符合正态分布的用  $\bar{x} \pm s$  表示，偏态分布采用中位数 M 表示，计数资料采用频数表示。分类变量采用

$\chi^2$  检验或 Fisher 检验, 连续性变量采用独立样本  $t$  检验(正态分布且方差齐性)或者 Mann-Whiney U 检验(偏态分布或方差不齐)。采用 ICC 评价提取纹理特征的一致性。采用 mRMR 法选择纹理特征, 然后经 LASSO 回归进一步精简纹理特征构建影像组学标签, 根据特征权重计算每个患者的得分。采用单因素和多因素 logistic 回归分析, 并使用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)进行共线性检测, 构建预测模型, 并根据最小赤池信息标准(minimal Akaike's information criterion, AIC)选择最佳的模型参数, 绘制校正曲线来评价模型的拟合优度, 并用 Hosmer-Lemeshow 检验评价校准曲线的一致性( $P > 0.05$  表示拟合优度较好), 计算受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under curve, AUC)评价模型的诊断准确性, AUC 为 0.7~0.8 代表具有一定的鉴别能力, AUC>0.8 表示具有非常好的鉴别能力; 采用 DeLong 检验比较多个模型 AUC; 采用决策曲线分析(decision curve analysis, DCA)评价模型的临床应用价值及效益。以  $P < 0.05$

为差异具有统计学意义。

## 结 果

### 1. 训练组和验证组的临床资料

在训练组和验证组中, HT 阳性与 HT 阴性间年龄、性别、空腹血糖、舒张压、饮酒史、吸烟史差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ), 血清总胆固醇差异有统计学意义( $P < 0.05$ ), 甘油三酯在训练组差异有统计学意义( $P < 0.05$ ), 收缩压在验证组差异有统计学意义( $P < 0.05$ ), 见表 1。

### 2. 训练组和验证组的常规 MRI 特征

在训练组和验证组中, HT 阳性与 HT 阴性间外周水肿、 $RT_1$  差异均有统计学意义( $P < 0.05$ ), 脑梗死部位、 $RT_2$  及 ADC 差异均无统计学意义( $P > 0.05$ ), 最大径仅在训练组有统计学意义( $P < 0.05$ ), 见表 2。

### 3. 根据临床资料及常规 MRI 特征分别建立模型

对训练组中临床资料及常规 MRI 特征变量进行单因素和多因素 logistic 回归分析建立预测模型, 血清总胆固醇、甘油三酯为临床模型独立预测因子; 最大

表 1 HT 阳性和 HT 阴性患者在训练组和验证组中的临床资料

变量	训练组(n=84)		$t/\chi^2$	P 值	验证组(n=36)		t 值	P 值
	HT 阴性 (n=42)	HT 阳性 (n=42)			HT 阴性 (n=18)	HT 阳性 (n=18)		
性别/例			0.207	0.649			—	0.505
男	28	26			8	11		
女	14	16			10	7		
年龄/岁	65.7±11.1	69.3±9.85	-1.559	0.123	68.7±11.7	65.0±14.3	0.840	0.407
空腹血糖/mmol/L	6.44±3.54	7.23±3.89	-0.975	0.332	5.80±2.17	6.55±2.50	-0.956	0.346
血清总胆固醇/mmol/L	4.43±0.98	3.84±0.79	3.042	0.003	4.35±0.94	3.68±0.64	2.482	0.018
甘油三酯/mmol/L	2.17±1.15	1.57±0.72	2.858	0.005	1.78±1.13	1.39±0.49	1.354	0.185
收缩压/mmHg	152.9±29.7	145.8±23.9	1.207	0.231	160.3±30.7	135.7±20.3	2.840	0.008
舒张压/mmHg	82.2±16.4	82.1±10.4	0.032	0.975	85.9±12.9	83.4±11.5	0.615	0.543
饮酒史/例			0.105	0.746			—	0.177
有	5	6			5	1		
无	37	36			13	17		
吸烟史/例			1.120	0.290			—	1.000
有	3	6			4	3		
无	39	36			14	15		

注: — 为 Fisher 检验。

表 2 HT 阳性和 HT 阴性患者在训练组和验证组中的常规 MRI 特征

变量	训练组(n=84)		$t/\chi^2$	P 值	验证组(n=36)		t 值	P 值
	HT 阴性 (n=42)	HT 阳性 (n=42)			HT 阴性 (n=18)	HT 阳性 (n=18)		
部位/例			0.431	0.512			—	0.738
基底节区	18	21			9	11		
非基底节区	24	21			9	7		
最大径/cm	1.94±0.78	2.59±0.83	-3.708	0.001	2.17±1.26	2.04±0.54	0.398	0.693
外周水肿/例			51.692	0.001			—	0.001
有	0	32			0	14		
无	42	10			18	4		
$RT_1$	0.974±0.158	1.195±0.244	-4.942	0.001	1.018±0.483	1.402±0.441	-2.490	0.018
$RT_2$	1.224±0.287	1.204±0.273	0.336	0.738	1.214±0.280	1.148±0.319	0.657	0.515
$ADC/\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$	0.522±0.062	0.548±0.081	-1.612	0.111	0.547±0.084	0.532±0.066	0.609	0.547

注:  $RT_1$  为  $T_1$  WI 信号强度比值;  $RT_2$  为  $T_2$  WI 信号强度比值; — 为 Fisher 检验。

径、外周水肿、 $RT_1$  为常规 MRI 模型独立预测因子；ROC 曲线显示常规 MRI 模型鉴别能力明显优于临床模型，经 DeLong 检验差异有统计学意义 ( $Z = 3.507$ ,  $P = 0.001$ )，见图 3、表 3。

#### 4. 影像组学特征提取的一致性

两位医师提取纹理特征的一致性较好 (ICC 为 0.863~0.977)，以高年资医师提取的特征进行影像组学分析。

#### 5. 提取纹理特征及建立影像组学标签

AK 软件从 3 个序列 ( $T_1$  WI、 $T_2$  WI 和 DWI) 联合提取 3132 个纹理特征，经 mRMR 特征选择及 LASSO 回归降维后(图 1a、b)，通过 10 折交叉验证对惩罚参数进行调整，从训练集中选择系数为非零特征，最后得到 6 个最相关纹理特征(4 个 DWI 纹理特征和 2 个  $T_1$  WI 纹理特征)，2 个  $T_1$  WI 纹理特征权重均较大(图 2)，建立影像组学标签，根据各个特征所对应加权系数乘积的线性组合得到每位患者的影像组学标签得分，联合序列影像组学模型在训练组和验证组进行 ROC 曲线分析 AUC 均为 0.97(图 3a、b, 表 3)，与常规 MRI 模型预测效能相当，经 DeLong 检验差异没有统计学意义 ( $Z = 1.342$ ,  $P = 0.180$ )。

#### 6. 建立个性化模型

将临床+影像定量特征、临床+影像定量特征+联合序列影像组学标签分别结合建立个性化模型 1、2，血清总胆固醇、外周水肿和  $RT_1$  是个性化模型 1 独

立预测因子， $RT_1$  和联合序列影像组学标签是个性化模型 2 独立预测因子，并对模型绘制列线图。校正曲线显示模型具有良好的校正性能(图 4a、d), Hosmer-Lemeshow 检验表明个性化模型 1、2 在两组拟合效果均较好(模型 1:  $\chi^2 = 4.164$ 、0.001,  $P = 0.842$ 、1.000；模型 2:  $\chi^2 = 8.543$ 、11.637,  $P = 0.382$ 、0.168)。ROC 曲线分析显示个性化模型 1、2 在训练组和验证组中具有很好的预测效能(AUC 分别为模型 1: 0.96、0.99, 模型 2: 0.98、0.98)，见图 3a、b, 表 3，经 DeLong 检验个性化模型 1、2 间差异没有统计学意义 ( $Z = 1.226$ ,  $P$  值 = 0.224)。经 DCA 评价显示阈值在 0.22~0.98 范围内个性化模型 2 临床受益优于个性化模型 1(图 5)。生成的列线图实现模型能可视化个性化预测急性脑梗死 HT(图 6)，根据  $RT_1$  和影像组学标签两个指标值对应的得分，汇总得到总得分，总得分越高，患者发生急性脑梗死 HT 的可能性越高。

## 讨 论

急性脑梗死 HT 是一个极其复杂的病理学过程，与许多内外危险因素相关。本研究中，笔者从临床、常规 MRI 及影像组学不同层面，纳入多种急性脑梗死 HT 相关因素，构建了临床模型、常规 MRI 模型、联合序列影像组学模型、个性化模型，探讨 MRI 影像组学预测急性脑梗死 HT 的价值。

笔者发现血清总胆固醇在两组 HT 阳性与 HT

表 3 训练组和验证组中不同模型的预测效能

模型	训练组						验证组					
	AUC(95%CI)	准确率	特异度	敏感度	PPV	NPV	AUC(95%CI)	准确率	特异度	敏感度	PPV	NPV
临床模型	0.72(0.61~0.83)	0.64	0.66	0.63	0.60	0.64	0.68(0.50~0.86)	0.56	0.56	0.55	0.67	0.67
常规 MRI 模型	0.93(0.86~0.98)	0.89	0.98	0.81	0.97	0.82	0.93(0.79~0.99)	0.89	1.00	0.78	1.00	0.82
联合序列影像组学模型	0.97(0.94~1.00)	0.92	0.90	0.93	0.93	0.91	0.97(0.93~1.00)	0.92	1.00	0.83	0.89	0.89
个性化模型 1	0.96(0.92~1.00)	0.90	0.91	0.89	0.91	0.89	0.99(0.98~1.00)	0.97	1.00	0.94	1.00	0.93
个性化模型 2	0.98(0.95~1.00)	0.93	0.91	0.95	0.93	0.91	0.98(0.96~1.00)	0.94	1.00	0.90	0.94	0.89

注：AUC 为曲线下面积，CI 为置信区间，PPV 为阳性预测值，NPV 为阴性预测值。

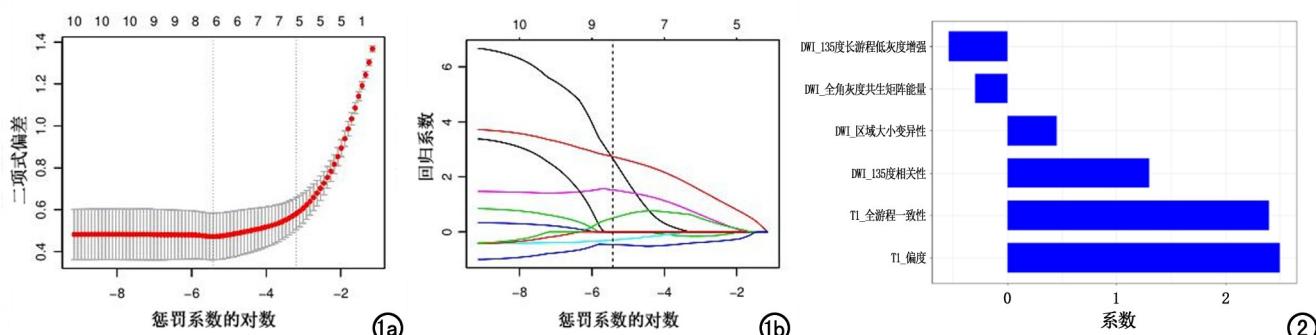


图 1 a)10 折交叉验证图，左、右两条虚线分别表示最佳 Lambda 取值时  $\log(\Lambda)$  对应的偏差值和最佳 Lambda 对数函数值，顶端坐标为对应特征数；b)回归系数分布图，调整 Lambda 取值时 LASSO 筛选的非零系数特征图，虚线为使用十折交叉运算的 Lambda 值绘制，每条曲线代表每一个自变量的变化轨迹，此时共筛选出 6 个非零系数特征。 图 2 联合序列影像组学模型的最优特征及系数。

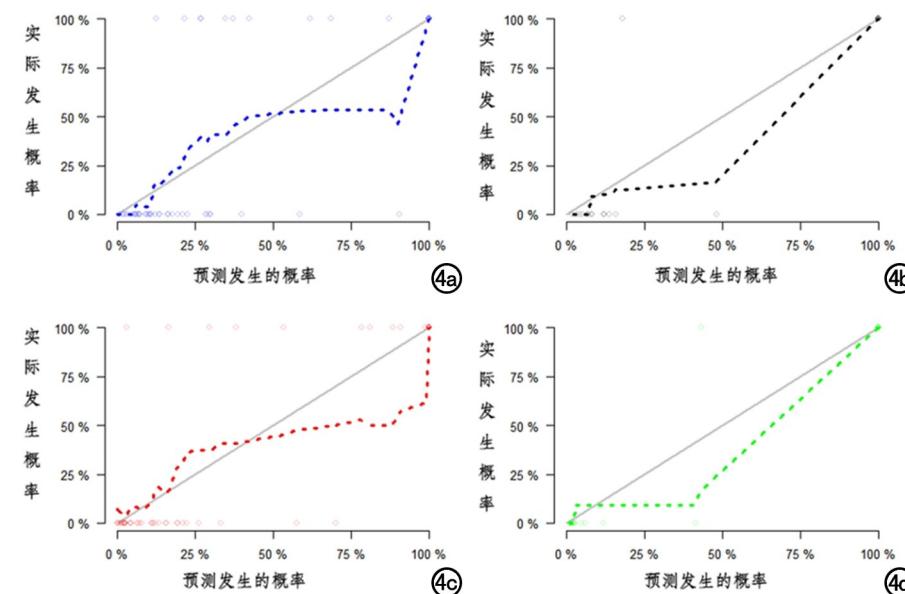
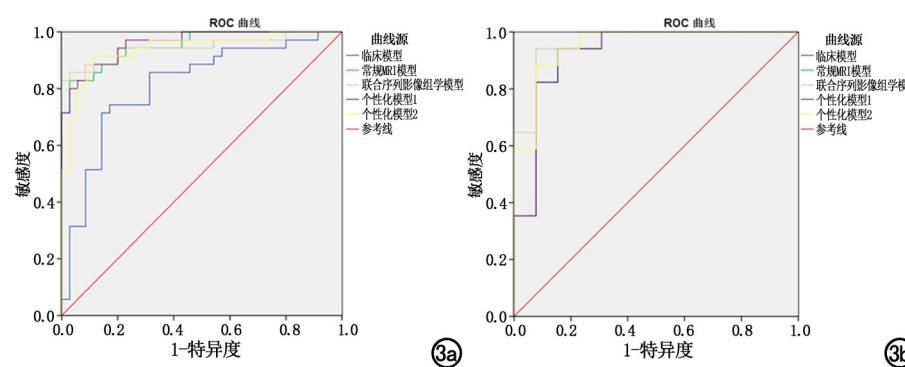


图 3 各预测模型 ROC 曲线。a)训练组;b)验证组。  
1、2 校正曲线。a)训练组模型 1;b)训练组模型 2;c)验证组模型 1;d)验证组模型 2。

阴性组间差异均有统计学意义,为临床模型独立预测因子。有研究提出低总胆固醇水平增加 HT 的风险<sup>[16-18]</sup>,脂质水平降低可致血管内皮细胞膜通透性升高,有毒物质的大量进入,血管结构不稳定易导致血液外渗。陈风学等<sup>[19]</sup>研究认为虽然血清总胆固醇差异没有统计学意义,但是发现低水平低密度脂蛋白胆固醇会增加 HT 的发生概率。本研究甘油三酯在训练组差异有统计学意义,说明 HT 与甘油三酯水平有关,研究发现血脂水平与脑梗死患者 HT 风险成负相关<sup>[20]</sup>。甘油三酯是细胞膜脂质的主要构成成分,维持细胞膜完整性及流动性。低甘油三酯水平可通过破坏脑组织小血管壁完整性增加 HT 风险。本研究构建的临床预测模型具有一

定的效能,训练组和验证组 AUC 分别为 0.72 和 0.68。

本研究中,常规 MRI 多种特征与急性脑梗死 HT 有关。首先急性脑梗死最大径在训练组差异有统计学意义,这与多数研究结果一致<sup>[18-19]</sup>。其次常规 MRI 的 T<sub>1</sub>WI、T<sub>2</sub>WI 和 DWI 信号特征定量研究显示 RT<sub>1</sub> 在两组 HT 阳性与 HT 阴性组间差异均有统计学意义,RT<sub>2</sub> 及 ADC 值差异没有统计学意义。Nguyen 等<sup>[20-22]</sup>研究发现低灌注的严重程度和梗死核心的体积是 HT 的重要预测因素,ADC 值与灌注不足的严重程度相关,ADC 值从周围向梗死核心依次下降,呈洋葱样分布。最后发现梗死灶周围水肿在两组 HT 阳性与 HT 阴性组间差异均有统计学意义。HT 发生的一个重要原因是缺血区域 BBB 的破坏、渗透性增加,引发细胞毒性或血管源性水肿<sup>[23-25]</sup>。BBB 完整性的降低可以促进水和血浆来源的分子进入间质组织,引发周围水肿的形成。本研究构建的常规 MRI 预测模型具有很高的预测效能,训练组和验证组 AUC 分别为 0.93 和 0.93。

影像组学通过高通量数据分析可达病变的病理层面、分子水平,挖掘病灶内部异质性信息,对病变的诊断变得愈发准确、快捷,评价更为

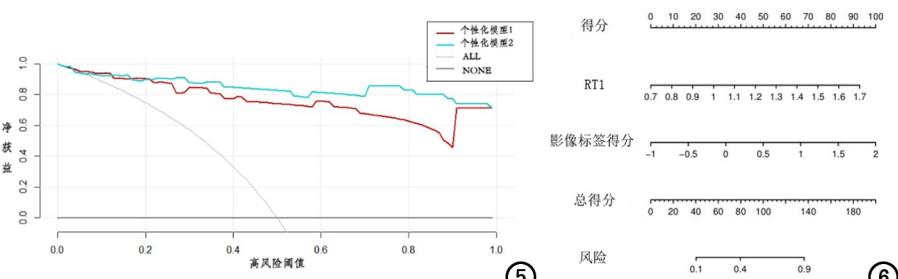


图 5 个性化模型 1、2 决策曲线。在阈值从 0.22~0.98 的范围内,个性化模型 2 显示临床受益优于个性化模型 1。None 表示所有 HT 阴性组患者,All 表示所有 HT 阳性组患者。  
图 6 个性化模型 2 列线图。由 RT1 和影像组学标签 2 个变量组成的列线图,每个变量对应在模型中的得分,每个变量的得分相加得到总得分,总得分越高代表着患者急性脑梗死 HT 的可能性越大。

⑤ ⑥

客观<sup>[26-27]</sup>。缪丽琼等<sup>[28]</sup>基于 DWI 和 PWI 图像筛选特征,结果显示,在训练集、测试集中的 AUC 可达 0.984、0.921。笔者从常规 MRI 的 T<sub>1</sub>WI、T<sub>2</sub>WI 和 DWI 提取纹理特征建立影像组学模型,结果发现联合序列影像组学模型在训练组和验证组均具有很高的预测效能,AUC 分别为 0.97 和 0.97,与常规 MRI 模型预测效能相当。本研究虽与缪丽琼等<sup>[28]</sup>研究的 AUC 值大小相仿,但笔者着力在常规 MRI 图像组学特征的挖掘,未纳入多模态特征的学习。

由于急性脑梗死 HT 病理学过程与相关危险因素复杂,故单一临床及影像学预测指标或变量难以准确预测。鉴于此,将临床、影像定量特征,临床、影像定量特征及联合序列影像组学标签分别结合建立个性化模型 1、2。结果显示个性化模型在训练组和验证组均具有很高的预测效能,模型 1 的 AUC 分别为 0.96 和 0.99,模型 2 的 AUC 分别为 0.98 和 0.98,经 DeLong 检验个性化模型 1、2 差异没有统计学意义。侧面反映组学特征贡献价值较小,这可能是由于组学特征只反映脑梗死内部特征,不能反映病灶周围脑组织水肿等相关特征,说明组学分析仍然有很多局限性。但是在组学特征的加持下,DCA 显示阈值在(0.22~0.98)范围内个性化模型 2 患者临床受益好于个性化模型 1。

本研究构建预测急性脑梗死 HT 的列线图,使得临床医师可以在早期通过简单评分实现个体化的预测。

本研究的局限性:①为回顾性研究,难免存在选择偏倚,尚需前瞻性研究进一步验证;②NIHSS 评分为脑卒中严重程度的评价指标,结果显示,NIHSS 评分是 HT 的独立危险因素<sup>[29]</sup>,本研究纳入的患者 NIHSS 评分均≥5,NIHSS 评分较低的轻微脑梗死患者 HT 需要更多的研究;③抗凝、溶血栓药物与 HT 密切相关,由于入选患者均进行标准抗凝、溶血栓治疗,故未纳入研究;④手动勾画 ROI 易受个人主观影响;⑤未进行多中心的外部验证。

总之,常规 MRI 模型、联合序列影像组学模型及个性化模型 1、2 均优于临床模型的诊断效能,均具有很高预测急性脑梗死 HT 的价值;个性化模型 1、2 诊断效能相当,但个性化模型 2 患者临床受益优于个性化模型 1。

## 参考文献:

- [1] Bejot Y, Duloquin G, Graber M, et al. Current characteristics and early functional outcome of older stroke patients: a population-based study (Dijon Stroke Registry) [J]. Age Ageing, 2021, 50 (3): 898-905.
- [2] Cheng X, Liu L, Li L, et al. Significance of CHADS-VAS on the severity and hemorrhagic transformation in patients with non-valvular atrial fibrillation-induced acute ischemic stroke [J]. Intern Emerg Med, 2021, 16(5): 1155-1163.
- [3] Lee M, Kim Y, Oh MS, et al. Cerebral small vessel disease burden and futile reperfusion after endovascular treatment for patients with acute ischemic stroke [J]. Cerebrovasc Dis, 2023, 52(4): 427-434.
- [4] Elsaid N, Mustafa W, Saied A. Radiological predictors of hemorrhagic transformation after acute ischemic stroke: An evidence-based analysis [J]. Neuroradiol J, 2020, 33(2): 118-133.
- [5] Otsu Y, Namekawa M, Toriyabe M, et al. Strategies to prevent hemorrhagic transformation after reperfusion therapies for acute ischemic stroke: A literature review [J]. J Neurol Sci, 2020, 419: 117217.
- [6] Ancelet C, Neveü S, Venditti L, et al. Pre-treatment risk markers for hemorrhagic transformation in posterior circulation acute ischemic stroke treated with reperfusion therapy [J]. J Neurol, 2023, 270(11): 5493-5501.
- [7] Marsh EB, Llinas RH, Schneider AL, et al. Predicting hemorrhagic transformation of acute ischemic stroke: prospective validation of the HeRS score [J]. Medicine (Baltimore), 2016, 95(2): e2430.
- [8] 蔡乾昆, 林若庭, 林化松, 等. 五种风险量表对急性脑梗死患者静脉溶栓后症状性脑出血及不良转归预测的比较 [J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2017, 19(9): 906-909.
- [9] Bivard A, Kleinig T, Churilov L, et al. Permeability measures predict hemorrhagic transformation after ischemic stroke [J]. Ann Neurol, 2020, 88(3): 466-476.
- [10] Suh CH, Jung SC, Cho SJ, et al. Perfusion CT for prediction of hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. Eur Radiol, 2019, 29(8): 4077-4087.
- [11] Xu Q, Zhu Y, Zhang X, et al. Clinical features and FLAIR radiomics nomogram for predicting functional outcomes after thrombolysis in ischaemic stroke [J]. Front Neurosci, 2023, 17: 1063391.
- [12] Xie Gang, Li Ting, Ren Yitao, et al. Radiomics-based infarct features on CT predict hemorrhagic transformation in patients with acute ischemic stroke [J]. Front Neurosci, 2022, 16: 1002717.
- [13] Ren Huanhuan, Song Haojie, Wang Jingjie, et al. A clinical-radiomics model based on noncontrast computed tomography to predict hemorrhagic transformation after stroke by machine learning: a multicenter study [J]. Insights Imaging, 2023, 14: 52.
- [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. 中国缺血性脑卒中诊治指南 2018 [J]. 中华神经科杂志, 2018, 51(9): 666-682.
- [15] 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. 中国急性脑梗死后出血转化诊治共识 2019 [J]. 中国神经科杂志, 2019, 52(4): 252-265.
- [16] Lin SF, Chao AC, Hu HH, et al. Low cholesterol levels increase symptomatic intracranial hemorrhage rates after intravenous thrombolysis: A multicenter cohort validation study [J]. J Atheroscler Thromb, 2019, 26(6): 513-527.
- [17] Yang N, Lin M, Wang BG, et al. Low level of low-density lipoprotein cholesterol is related with increased hemorrhagic transformation after acute ischemic cerebral infarction [J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2016, 20(4): 673-678.
- [18] 李珂, 贾建军, 王振福, 等. 血脂水平对大面积脑梗死患者出血性

- 转化的影响[J].中华老年心脑血管病杂志,2016,18(3):240-242.
- [19] 陈风学.急性脑梗死后非溶栓患者出血转化的多因素 Logistic 回归分析[J].临床急诊杂志,2016,17(2):118-120.
- [20] Nguyen TNP, Lefevre J, Kanagaratnam L, et al. ADC measurement relevance to predict hemorrhage transformation after mechanical thrombectomy[J]. J Neurol Sci, 2022, 441: 120370.
- [21] Xu Y, Li X, Wu D, et al. Machine learning-based model for prediction of hemorrhage transformation in acute ischemic stroke after alteplase[J]. Front Neurol, 2022, 13: 897903.
- [22] Suh CH, Jung SC, Cho SJ, et al. MRI for prediction of hemorrhagic transformation in acute ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. Acta Radiol, 2020, 61(7): 964-972.
- [23] Jiang L, Zhou L, Yong W, et al. A deep learning-based model for prediction of hemorrhagic transformation after stroke[J]. Brain Pathol, 2023, 33(2): e13023.
- [24] El Nawar R, Yeung J, Labreuche J, et al. MRI-based predictors of hemorrhagic transformation in patients with stroke treated by intravenous thrombolysis[J]. Front Neurol, 2019, 10: 897.
- [25] Caparros F, Kuchcinski G, Drelon A, et al. Use of MRI to predict symptomatic haemorrhagic transformation after thrombolysis for cerebral ischaemia[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 2020, 91(4): 402-410.
- [26] 刘小芳, 汪清华, 杨洪安, 等. 基于多序列 MRI 影像组学评分及临床参数预测肝细胞癌微血管浸润的 nomogram 模型研究[J]. 放射学实践, 2023, 38(8): 1018-1025.
- [27] 刘祎, 文戈, 董天发, 等. 基于 MRI 影像组学预测宫颈癌 Ki-67 表达水平[J]. 放射学实践, 2023, 38(11): 1436-1441.
- [28] 缪丽琼, 彭明洋, 王同兴, 等. 基于 MRI 影像组学和机器学习预测急性脑卒中出血转化的研究[J]. 磁共振成像, 2022, 13(3): 18-21, 75.
- [29] Costru-Tasnic E, Gavriliuc M, Manole E. Serum biomarkers to predict hemorrhagic transformation and ischemic stroke outcomes in a prospective cohort study[J]. J Med Life, 2023, 16(6): 908-914.

(收稿日期:2023-06-27 修回日期:2023-12-31)

## 欢迎订阅 2025 年《放射学实践》

《放射学实践》是由国家教育部主管,华中科技大学同济医学院主办,与德国合办的全国性影像学学术期刊,创刊至今已 40 周年。遵照同行评议、价值导向、等效应用原则,国内各大学会、协会、组织机构通过科技工作者推荐、专家评议、结果公示等规定程序,《放射学实践》杂志入选中国科协发布 10 大领域《我国高质量科技期刊分级目录》业内认可的较高水平期刊。《放射学实践》杂志再次入选 2020 年版北京大学和北京高校图书馆期刊工作研究会共同主持的国家社会科学基金项目“学术期刊评价及文献计量学研究”研究成果——《中国核心期刊要目总览》。

本刊坚持服务广大医学影像医务人员的办刊方向,关注国内外影像医学的新进展、新动态,全面介绍 X 线、CT、磁共振、介入放射及放射治疗、超声诊断、核医学、影像技术学等医学影像方面的新知识、新成果,受到广大影像医师的普遍喜爱。

本刊为中国科学引文数据库(CSCD)核心库来源期刊、《中文核心期刊要目总览》收录期刊、中国科技核心期刊、中国高质量科技期刊分级目录临床医学领域医学影像学期刊,并在中国学术期刊分区中位列 Q1 区。

主要栏目:论著、继续教育园地、专家荐稿、研究生展版、图文讲座、本刊特稿、实验研究、传染病影像学、影像技术学、外刊摘要、学术动态、请您诊断、病例报道、知名产品介绍、信息窗等。

本刊为月刊,每册 25 元,全年定价 300 元。

**国内统一刊号:** ISSN 1000-0313/CN 42-1208/R      **邮政代号:** 38-122

**电话:** (027)69378385

E-mail: fsxsjzz@163.com      网址: <http://www.fsxsj.net>

**编辑部地址:** 430199 武汉市蔡甸区中法新城同济医院专家社区别墅 C 栋