

· 论 著 ·

基于 CTA 影像组学特征的前交通动脉瘤破裂的
预测模型的构建及验证

陈鹏飞 范文辉 梁 奕 王 剑

【摘要】目的 探讨基于 CTA 影像组学特征构建预测前交通动脉瘤破裂的模型的临床价值。**方法** 回顾性分析 2016~2023 年收治的 116 例前交通动脉瘤病人的病历资料,按照 8:2 的比例分配为训练集和测试集。收集入院头部 CTA 影像参数,应用 3D Slicer 软件提取影像组学特征,并计算影像组学评分(Rad score);多因素 logistic 回归模型分析动脉瘤破裂的危险因素并构建预测模型,应用 ROC 曲线评估模型的预测能力,并应用决策曲线评估模型的临床应用价值。**结果** 多因素 logistic 回归分析显示年龄($OR=0.944$; 95% CI 0.897~0.993; $P=0.025$)、瘤体长度与载瘤动脉管径的比值(SR; $OR=2.247$; 95% CI 1.214~4.15; $P=0.016$)和瘤高与颈宽的比值(AR; $OR=7.942$; 95% CI 1.47~42.925; $P=0.010$)为动脉瘤破裂的独立预测因素。Lasso 回归模型筛选出有意义的 4 个影像组学特征(Maximum 2D Diameter Column, Maximum 2D Diameter Row, Surface Volume Ratio, Elongation),经计算获得 Rad score。ROC 曲线分析显示,基于年龄、AR、SR 及 Rad score 构建的联合模型,训练集曲线下面积(AUC)为 0.889(95% CI 0.821~0.958),测试集为 0.921(95% CI 0.803~0.999)。校准图显示实际概率与预测概率之间具有良好的预测精度,决策曲线显示在阈值概率 37%~65% 范围内,联合模型净收益高于传统影像预测模型。**结论** CTA 影像组学特征联合传统影像学特征构建的联合模型对前交通动脉瘤破裂有较好的预测能力。

【关键词】 前交通动脉瘤;动脉瘤破裂;预测模型;CTA 影像组学

【文章编号】 1009-153X(2024)07-0385-06 **【文献标志码】** A **【中国图书资料分类号】** R 743.9

Construction and validation of a prediction model for rupture of anterior communicating artery aneurysms based on morphological characteristics of CTA radiomics

CHEN Peng-fei, FAN Wen-hui, LIANG Yi, WANG Jian. Department of Medical Imaging, General Hospital of the Yangtze River Shipping, Wuhan 430010, China

【Abstract】Objective To explore the clinical value of constructing a model for predicting the rupture of anterior communicating artery aneurysms based on CT angiography (CTA) radiomics features. **Methods** The medical records of 116 patients with anterior communicating artery aneurysms admitted from 2016 to 2023 were retrospectively analyzed and divided into a training set and a test set at a ratio of 8:2. Head CTA imaging parameters were collected, radiomics features were extracted using 3D Slicer software, and the radiomics score (Rad score) was calculated. A multivariate logistic regression model was used to analyze the risk factors for aneurysm rupture and construct a prediction model. The predictive ability of the model was evaluated using the ROC curve, and the clinical application value was evaluated using the decision curve. **Results** The multivariate logistic regression analysis showed that age ($OR=0.944$; 95% CI 0.897~0.993; $P=0.025$), the ratio of aneurysm length to parent artery diameter (SR; $OR=2.247$; 95% CI 1.214~4.15; $P=0.016$), and the ratio of aneurysm height to neck width (aspect ratio, AR; $OR=7.942$; 95% CI 1.47~42.925; $P=0.010$) were independent predictors of aneurysm rupture. Four significant radiomics features (Maximum 2D Diameter Column, Maximum 2D Diameter Row, Surface Volume Ratio, Elongation) were screened out by the Lasso regression model, and the Rad score was obtained through calculation. The ROC curve analysis showed that the area under the curve (AUC) of the combined model based on age, AR, SR, and Rad score was 0.889 (95% CI 0.821~0.958) in the training set and 0.921 (95% CI 0.803~0.999) in the test set. The calibration plot showed good predictive accuracy between the actual probability and the predicted probability. The decision curve showed that within the threshold probability range of 37%~65%, the net benefit of the combined model was higher than that of the traditional imaging prediction model. **Conclusion** The combined model constructed by combining CTA radiomics features with traditional imaging features has a good predictive ability for the rupture of anterior communicating artery aneurysms.

【Key words】 Anterior communicating artery aneurysm; Aneurysm rupture; Prediction model; CTA radiomics

doi:10.13798/j.issn.1009-153X.2024.07.001

基金项目:武汉市卫生健康委科研基金(WX21C32)

作者单位:430010 武汉,长江航运总医院医学影像科(陈鹏飞、范文辉、梁 奕、王 剑)

通信作者:范文辉,Email:498409297@qq.com

动脉瘤性蛛网膜下腔出血可能会造成预后不良,可导致残疾、死亡^[1]。大脑前交通动脉瘤约占颅内动脉瘤的 30%,破裂几率最高^[2]。目前,颅内动脉瘤破裂风险分级主要基于传统形态学特征。近年

来,影像组学特征预测颅内动脉瘤破裂的研究也受到关注^[3]。本文探讨基于 CTA 影像组学形态学特征构建的前交通动脉瘤破裂的预测模型的临床价值。

1 资料与方法

1.1 病例选择标准 纳入标准:术前影像学资料完整,包括 CT 平扫及 CTA 图像;DSA 或者手术确诊为前交通动脉瘤;蛛网膜下腔出血确定为前交通动脉瘤破裂所致。排除标准:影像学图像质量不佳,无法评估;蛛网膜下腔出血为创伤、高血压、脑淀粉样变性或其他原因引起;责任动脉瘤不位于前交通动脉。

1.2 一般资料 回顾性分析 2016~2023 年收治的 116 例大脑前交通动脉瘤的临床资料,其中男 68 例,女 48 例;平均年龄(59.21 ± 11.79)岁;合并高血压 74 例、糖尿病 12 例。

1.3 影像检查方法 运用东芝 320 排 CT 行头部低辐射剂量灌注扫描,使用宽体探测器,覆盖范围 16 cm,低管电压 100 kV,自动管电流调制技术,扫描层厚为 0.5 mm,使用双筒高压注射器注射碘对比剂 50 ml 和生理盐水 30 ml,注药后 5 s 开始扫描,获取 1 个平扫时相;注药后 11 s 后开始动脉期扫描,每隔 2 s 扫描一次,获取 13 个时相;注药后 40 s 后开始静脉期扫描,每隔 5 s 扫描一次,获取 5 个时相,最终得到 19 个时相的全脑 4D-CTA 容积数据,选择动脉峰值期图像进行后处理。

1.4 传统形态学特征测量 由 2 名高年资(具有 10 年以上工作经验)影像医师采用双盲法共同阅片,意见不一致时协商解决,2 名医师分别勾画 1 次,取平均值为结果。通过 Vitrea fx 工作站对 CTA 原始图像进行图像后处理,得到容积再现图像,并通过测量工具对动脉瘤进行测量,获得动脉瘤常规形态学数据^[4](图 1A),包括载瘤动脉直径、瘤体最大径、瘤体高度、动脉瘤体宽度、瘤颈宽度、长宽比、瘤体长度与载瘤动脉管径的比值(size ratio, SR)、瘤高与颈宽的比值(aspect ratio, AR)、入射角度、动脉瘤角。

1.5 病灶分割与特征提取 采用计算机辅助方法进行动脉瘤的病灶分割和特征提取。首先,使用 3D Slicer 软件,将包含 .dcm 格式的 CTA 原始图像的文件导入软件,以准备病灶分割和特征提取的数据基础。随后,手动勾画动脉瘤的感兴趣区域,以获取动脉瘤的影像组学形态学数据,包括 Elongation, Flatness, Least Axis Length, Major Axis Length, Maximum 2D Diameter Column, Maximum 2D Diameter Row, Maximum 2D Diameter Slice, Maximum 3D Diameter,

Mesh Volume, Minor Axis Length, Sphericity, Surface Area, Surface Volume Ratio, 这些特征将在后续的分析中被用于诊断和预测。

1.6 影像组学特征的筛选 为了确定最相关的特征并优化模型性能,进行了特征筛选。首先,将研究样本按照 8:2 的比例分配为训练集和测试集,以确保模型的验证和泛化性能。然后,使用 LASSO 回归分析和 5 折交叉验证来优化超参数 λ ,以确定最重要的特征并控制过拟合。选定的影像组学特征及其系数被线性组合以计算 Rad score,这将在后续的模式构建中发挥关键作用。

1.7 模型的构建与评估 在模型构建和评估阶段,采用以下步骤:首先,使用单因素 logistic 回归模型选择具有统计学意义的临床特征,再逐步回归确定最终纳入临床特征,影像组学标签计算 Rad score 后构建 logistic 回归模型,以及将临床特征和 Rad score 同时纳入构建 logistic 模型,从而构建传统形态学模型、影像组学标签模型以及两者结合的联合模型。为了评估不同模型的预测性能,使用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线,包括灵敏度、特异度和曲线下面积(area under the curve, AUC)等指标,以确保模型的可靠性和有效性。同时,还纳入了传统形态参数与影像组学特征,构建 Nomogram 模型,并使用校准曲线和决策曲线对模型进行进一步评价。训练集中五折交叉验证来评估模型的性能稳定性和泛化能力。

1.8 统计学分析 使用 SPSS 24.0 和 R 软件(版本 4.3.0)进行数据处理;正态分布定量资料使用 $\bar{x}\pm s$ 描述,采用独立样本 *t* 检验;非正态分布定量资料用中位数表示,采用 Mann-Whitney U 检验;定性资料采用 χ^2 检验;运用 Lasso 回归分析筛选出具有最大预测价值的特征,并构建相应的预测模型;使用 ROC 分析、校准曲线和决策曲线等方法来评估各种模型的诊断效能;检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 动脉瘤影像学特征 116 例中,破裂动脉瘤 70 例(60.34%),未破裂动脉瘤 46 例;瘤体最大径(4.62 ± 2.42)mm,动脉瘤高度(3.82 ± 1.93)mm,瘤颈宽度(4.19 ± 2.16)mm,动脉瘤宽度(3.409 ± 1.439)mm,动脉瘤角(73.76 ± 16.86)°,入射角度(122.73 ± 34.22)°,载瘤动脉直径(1.89 ± 0.57)mm,AR 值(1.25 ± 0.552),SR 值 2.30(1.41~3.81),长宽比(1.25 ± 0.423)。训练集及测试集病人的临床特征及影像学特征无统计学差异

($P>0.05$,表1)。

2.2 基于传统影像学特征构建的预测模型 2位影像医师提取数据的一致性良好(ICC 0.572~0.852; $P<0.01$)。多因素 logistic 回归分析显示年龄($OR=0.944$; 95% CI 0.897~0.993; $P=0.025$)、SR ($OR=2.247$; 95% CI 1.214~4.15; $P=0.016$)和 AR ($OR=7.942$; 95% CI 1.47~42.925; $P=0.010$)为独立预测因素。传统影像学模型的预测动脉瘤破裂的效能良

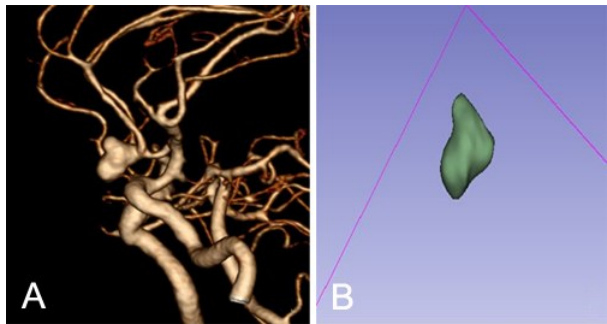


图1 3D Slice 软件分析前交通动脉瘤的影像组学特征
A. CTA VR像显示前交通动脉瘤;B. 3D Slice 软件提取动脉瘤的影像组学特征
Figure 1 Radiomics characteristics of an anterior communicating artery aneurysm analyzed by 3D Slice software
A: CTA VR image shows an anterior communicating artery aneurysm.
B: Radiomics characteristics of the aneurysm are extracted by 3D Slice software.

表1 前交通动脉瘤病人的临床特征及影像学特征				
Table 1 Clinical characteristics and imaging features of patients with anterior communicating artery aneurysms				
基线特征	训练集(n=93)	测试集(n=23)	统计值	P 值
年龄(岁)	58.43±11.81	62.39±11.45	$t=-1.449$	0.150
性别(男)	57(61.29%)	11(47.83%)	$\chi^2=0.879$	0.348
高血压(例)	60(64.52%)	14(60.87%)	$\chi^2=0.007$	0.933
糖尿病(例)	8(8.60%)	4(17.39%)	$\chi^2=0.734$	0.391
吸烟(例)	33(35.48%)	10(43.48%)	$\chi^2=0.221$	0.639
嗜酒(例)	6(6.45%)	4(17.39%)	$\chi^2=1.585$	0.208
基线舒张压(mmHg)	92.806±13.653	93.276±15.043	$t=-1.183$	0.239
基线收缩压(mmHg)	156.564±27.425	146.261±25.625	$t=1.634$	0.105
瘤体最大径线(mm)	4.477±2.311	5.221±2.826	$t=-1.321$	0.189
动脉瘤宽度(mm)	3.789±1.977	3.961±1.783	$t=-0.38$	0.705
动脉瘤高度(mm)	4.057±2.102	4.673±2.365	$t=-1.229$	0.222
瘤颈宽度(mm)	3.312±1.290	3.8±1.915	$t=-1.46$	0.147
动脉瘤角(°)	74.868±16.224	69.282±18.948	$t=1.429$	0.156
入射角度(°)	121.381±34.836	128.195±31.762	$t=-0.854$	0.395
载瘤动脉直径(mm)	1.918±0.58	1.778±0.561	$t=1.043$	0.299
AR	1.236±0.522	1.312±0.668	$t=-0.591$	0.556
SR	2.421±1.638	3.177±2.506	$t=-1.765$	0.080
长宽比	1.238±0.426	1.308±0.418	$t=-0.709$	0.480

注:AR. 瘤高与颈宽的比值;SR. 瘤体长度与载瘤动脉管径的比值

好:训练集 AUC=0.873(95% CI 0.802~0.943),测试集 AUC=0.889(95% CI 0.756~1.000)。见图2、表2。

2.3 基于影像组学特征构建的预测模型 Lasso 回归模型筛选出有意义的4个影像组学特征:Maximum 2D Diameter Column, Maximum 2D Diameter Row, Surface Volume Ratio, Elongation, 经线性拟合得到 Rad

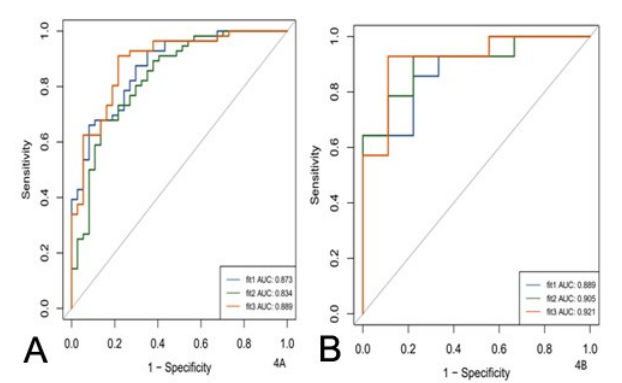


图2 ROC 曲线分析三种模型预测前交通动脉瘤破裂的效能
A. 训练集;B. 测试集;橙线. 联合模型;蓝线. 传统影像学模型;绿线. 影像组学模型
Figure 2 ROC curve analysis of the efficacy of three models in predicting rupture of anterior communicating artery aneurysms
A: Training set. B: Test set. Orange line: Combined model. Blue line: Traditional imaging model. Green line: Radiomics model.

score 的计算公式: $\text{Rad score} = 0.524 - 0.581 \times \text{Elongation} + 0.32 \times \text{Maximum 2D Diameter Row} - 0.656 \times \text{Surface Volume Ratio} + 0.232 \times \text{Maximum 2D Diameter Column}$ 。影像组学模型对动脉瘤破裂具有良好的预测效能: 训练集 AUC=0.834 (95% CI 0.748~0.920), 测试集 AUC=0.905 (95% CI 0.781~0.999)。见图 2、表 2。

2.4 联合模型 联合年龄、Rad score 和 AR、SR 构建的联合模型的诺模图见图 3。与影像组学模型相比, 联合模型预测效能得到提高 (图 2、表 2): 训练集 AUC=0.889 (95% CI 0.821~0.958), 测试集 AUC=0.921 (95% CI 0.803~0.999)。校准曲线显示, 联合模型预测结果的诊断符合率较高。Hosmer-Lemeshow

检验显示诺模图预测概率与真实动脉瘤破裂的拟合程度 P 值在训练集中为 0.347, 在测试集中为 0.382。校准图显示实际概率与预测概率之间具有良好的预测精度 (图 4)。决策曲线显示在阈值概率 37%~65% 范围内, 联合模型净收益高于其他两种预测模型 (图 4)。

3 讨论

目前, 研究显示动脉瘤常规形态学特征的一些参数, 如动脉瘤最大径、瘤体高度、AR、SR、动脉瘤角等, 与动脉瘤破裂相关^[5,6]。本研究也进一步证实了常规形态学特征在预测 AcomA 破裂中的价值。同时, 通过 LASSO 回归模型和多因素 logistic 回归模型

表 2 三种模型预测前交通动脉瘤破裂的效能
Table 2 Efficacy of three models in predicting rupture of anterior communicating artery aneurysms

效能指标	传统影像学模型		影像组学模型		联合模型	
	训练集	测试集	训练集	测试集	训练集	测试集
AUC	0.873	0.889	0.834	0.905	0.889	0.921
(95% CI)	(0.802~0.943)	(0.756~1.000)	(0.748~0.920)	(0.781~1.000)	(0.821~0.958)	(0.803~1.000)
准确率	0.763	0.783	0.753	0.87	0.86	0.913
敏感度	0.661	0.643	0.679	0.929	0.911	0.929
特异度	0.919	1.000	0.865	0.778	0.784	0.889
NPV	0.642	0.643	0.64	0.875	0.853	0.889
PPV	0.925	1.000	0.884	0.867	0.864	0.929

注: AUC. 曲线下面积; NPV. 阴性预测值; PPV. 阳性预测值

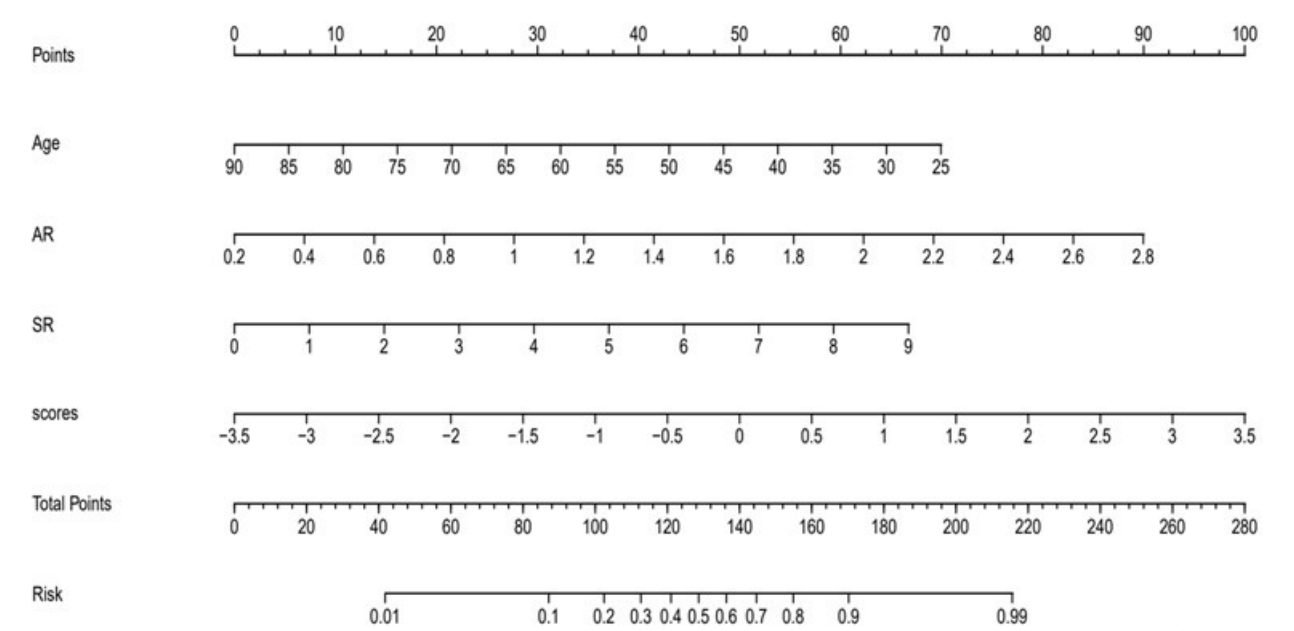


图 3 联合模型预测前交通动脉瘤破裂风险的 Nomogram 图

Figure 3 Nomogram of the combined model for predicting the rupture risk of anterior communicating artery aneurysms

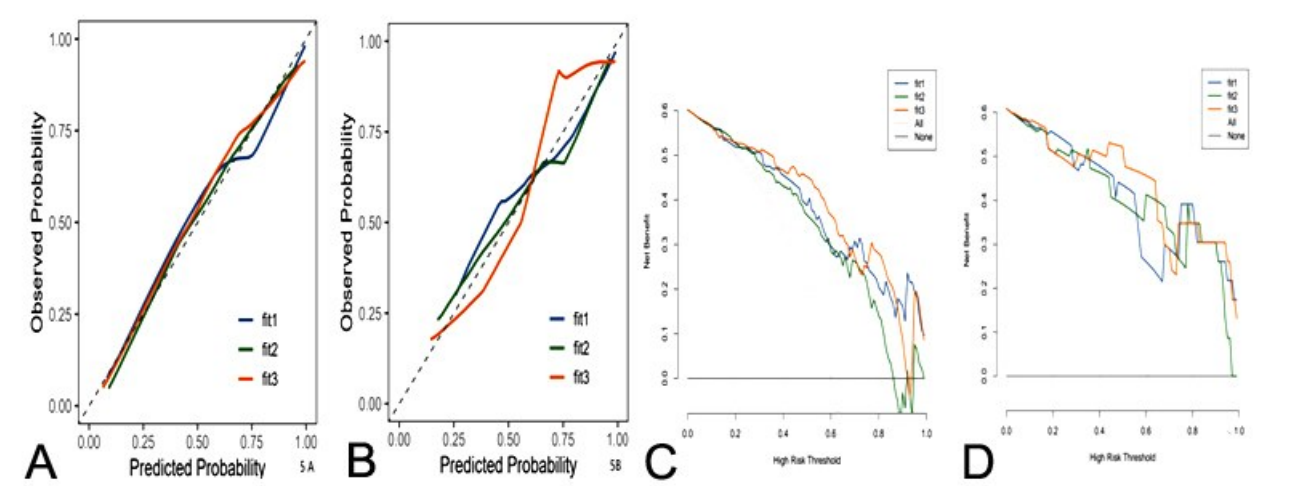


图4 校准曲线和决策曲线分析三种模型预测前交通动脉瘤破裂风险的临床价值
A、C. 训练集曲线;B、D. 测试集曲线;A、B. 校准曲线;C、D. 决策曲线;y轴表示净收益;x轴表示阈值概率;橙线. 联合模型;蓝线. 传统影像学模型;绿线. 影像组学模型

Figure 4 Clinical value of three models in predicting the rupture risk of anterior communicating artery aneurysms analyzed by calibration curve and decision curve
A and C: Training set curves. B and D: Test set curves. A and B: Calibration curves. C and D: Decision curves, the y-axis represents net benefit, the x-axis represents threshold probability. Orange line: Combined model. Blue line: Traditional imaging model. Green line: Radiomics model.

筛选出有意义的常规形态学特征,并构建了包括年龄、AR、SR 的预测模型,训练集 AUC 值为 0.873 (95% *CI* 0.802~0.943),测试集 AUC 值为 0.889(95% *CI* 0.756~0.999),能很好地预测 AcomA 的破裂。这提示年龄越低,AComA 破裂风险越大。Juvela 等^[7]研究也显示在相当长的随访期中观察到颅内动脉瘤的出血风险呈现下降趋势。同时,AR、SR 值越大,AComA 破裂风险也越大。目前,常规形态学测量方式应用较多,临床效果较好,然而常规形态学数据的测量是在二维投影图像中获取,不同测量者对动脉瘤的最佳的工作角度的选择有差异,同时测量时对径线及角度的选择不同也会引起数据不一致。

影像组学是从医学图像中提取高通量数据的新兴技术,影像组学计算是一个快速、自动化的过程,勾画出感兴趣的结构后,筛选出最有价值的特征并通过模型的构建可用于临床实践及研究^[8]。在动脉瘤破裂方面,有研究证实影像组学的形态学特征可用评估颅内动脉瘤的稳定性及破裂状态^[9]。本研究显示 Maximum 2D Diameter Column、Maximum 2D Diameter Row、Surface Volume Ratio 和 Elongation 的特征是 AcomA 破裂的独立危险因素,其中与动脉瘤大小相关的参数 Maximum 2D Diameter Column、Maximum 2D Diameter Row 数值越大,动脉瘤的破裂风险增加。同时,本研究显示 Elongation 与动脉瘤破裂有关。这与 Ludwig 等^[10]研究一致,他们证实影像

组学形态特征 Elongation ($P<0.0001$, AUC=0.71)和 Flatness($P<0.0001$, AUC=0.72)对动脉瘤的破裂有很好的预测价值。同时,我们的研究显示影像组学形态学特征及常规形态学联合模型训练集 AUC 为 0.889 (95% *CI* 0.821~0.958),测试集 AUC 为 0.921 (95% *CI* 0.803~0.999),在预测 AcomA 破裂方面稍强于传统形态学特征模型,这与 Lauric 研究^[11]结果基本一致。除了影像组学的形态特征,有研究显示影像组学纹理特征对预测动脉瘤破裂也有显著意义^[12],其中包括 GLCM Max Probability、GLCM MCC 两个变量,并且联合模型的 ROC 曲线的 AUC 为 0.879(95% *CI* 0.871~0.888)。动脉瘤纹理特征可能与不稳定动脉瘤形成的湍流有关,影像组学可能包含着动脉瘤的血流动力学方面的信息,而血流动力学的相关参数对动脉瘤破裂的也有显著影响^[13]。但由于动脉瘤感兴趣区的手动分割需要医生对动脉瘤的形态熟悉掌握,容易出现有选择偏差,一定程度阻碍了放射组学的临床应用,随着动脉瘤自动分割的发展,精准统一的分割将使影像组学对动脉瘤破裂的优势将更加明显^[14]。

本研究通过多因素回归分析建立结合年龄、AR、SR 和 Radscore 的诺模图,在验证集中,联合模型 AUC 为 0.921 (95% *CI* 0.803~0.999),敏感度、特异度、NPV、PPV 也较高。这表明诺模图模型具有较高的预测效能,同时对动脉瘤破裂具有较高的敏感度

及特异度,可以减少对动脉瘤破裂风险较低病人的不必要担忧及治疗。并且,在阈值概率 37%~65%范围内,联合模型净收益高于单独的传统形态学模型和影像组学模型,联合模型诊断效能得到进一步提升,说明影像组学形态学特征参数包含了动脉瘤的三维形态特征,可以获得常规形态学参数无法获取的信息,两者联合的预测模型的可靠性更高。

本研究也存在一些局限性。首先,本研究是回顾性研究,不可避免地存在潜在的选择偏差。其次,本研究属于单中心研究,未破裂动脉瘤的样本量相对较少,后期将增加样本量,对结果更进一步验证,为了消除选择的误差,本研究采用了交叉验证。

综上所述,影像组学相关形态学特征 Maximum 2D Diameter Column、Maximum 2D Diameter Row、Surface Volume Ratio 和 Elongation 对预测 AcomA 破裂的意义较大,结合传统形态学和影像组学特征的联合预测模型对 AcomA 破裂的预测能力最高,可以减少对动脉瘤破裂风险较低病人的不必要治疗。

【伦理学声明】:本研究遵循《赫尔辛基宣言》,所有病人和/或家属均签署知情同意书。本研究方案于 2021 年 3 月 8 日经长江航运总医院伦理委员会审批,批号为 L20210009。

【利益冲突声明】:所有作者不存在任何利益冲突。
【作者贡献声明】:陈鹏飞负责数据分析、文章撰写;范文辉负责论文审阅;梁奕、王剑负责数据采集、研究实施。

【参考文献】

[1] NIEUWKAMP DJ, SETZ LE, ALGRA A, *et al.* Changes in case fatality of aneurysmal subarachnoid haemorrhage over time, according to age, sex, and region: a meta-analysis [J]. *Lancet Neurol*, 2009, 8(7): 635-642.

[2] KORJA M, KIVISAARI R, REZAI JAHROMI B, *et al.* Size and location of ruptured intracranial aneurysms: consecutive series of 1993 hospital- admitted patients [J]. *J Neurosurg*, 2017, 127(4): 748-753.

[3] ALWALID O, LONG X, XIE M, *et al.* CT angiography- based radiomics for classification of intracranial aneurysm rupture [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 619864.

[4] Chinese Federation of Interventional and Therapeutic Neuroradiology (CFITN), Chinese Intracranial Aneurysm Project (CIAP) Study

Group. Expert consensus on imaging interpretation of intracranial aneurysms [J]. *Chin J Cerebrovasc Dis*, 2021, 18(7): 492-504.

中国医师协会神经介入专业委员会, 中国颅内动脉瘤计划研究组. 颅内动脉瘤影像学判读专家共识[J]. *中国脑血管病杂志*, 2021, 18(7): 492-504.

[5] TREMMEL M, DHAR S, LLEVY EI, *et al.* Influence of intracranial aneurysm-to-parent vessel size ratio on hemodynamics and implication for rupture: results from a virtual experimental study [J]. *Neurosurgery*, 2009, 64(4): 622-631.

[6] YANG WW, LIANG Y, FAN N, *et al.* The application of 4D-CT angiography in assessing the risk of rupture of small (≤ 5 mm) anterior communicating aneurysms [J]. *J Pract Radiol*, 2021, 37(3): 345-348.

杨威威, 梁奕, 凡娜, 等. 4D-CT 血管成像在 ≤ 5 mm 前交通动脉瘤评估破裂风险中的应用研究[J]. *实用放射学杂志*, 2021, 37(3): 345-348.

[7] JUVELA S, POUSSA K, LEHTO H, *et al.* Natural history of unruptured intracranial aneurysms: a long-term follow-up study [J]. *Stroke*, 2013, 44(9): 2414-2421.

[8] LAMBIN P, LEIJENAAR RTH, DEIST TM, *et al.* Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine [J]. *Nat Rev Clin Oncol*, 2017, 14(12): 749-762.

[9] LIU QL, JIANG P, JIANG YH, *et al.* Prediction of aneurysm stability using a machine learning model based on PyRadiomics-derived morphological features [J]. *Stroke*, 2019, 50(9): 2314-2321.

[10] LUDWIG CG, LAURIC A, MALEK JA, *et al.* Performance of radiomics derived morphological features for prediction of aneurysm rupture status [J]. *J Neurointerv Surg*, 2021, 13(8): 755-761.

[11] LAURIC A, LUDWIG CG, MALEK AM. Enhanced radiomics for prediction of rupture status in cerebral aneurysms [J]. *World Neurosurg*, 2022, 159: e8-e22.

[12] OU CB, CHONG W, DUAN CZ, *et al.* A preliminary investigation of radiomics differences between ruptured and unruptured intracranial aneurysms [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(5): 2716-2725.

[13] MENG H, TUTINO VM, XIANG J, *et al.* High WSS or low WSS: complex interactions of hemodynamics with intracranial aneurysm initiation, growth, and rupture: toward a unifying hypothesis [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2014, 35(7): 1254-1262.

[14] LIU PS, WANG H, ZHENG SL, *et al.* Parkinson's disease diagnosis using neostriatum radiomic features based on T₂-weighted magnetic resonance imaging [J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 248.

(2023-09-05 收稿, 2024-05-31 修回)