

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2026.04.007

医学影像物理

## CTA形态学-影像组学特征对颅内动脉瘤破裂及预后的预测模型

卢晨阳,张轴

十堰市太和医院医学影像中心,湖北十堰442000

**【摘要】目的:**研究CTA形态学-影像组学特征对颅内动脉瘤破裂及预后的预测模型。**方法:**采取回顾性研究,研究对象为2021年1月~2024年8月进行治疗的颅内动脉瘤患者100例,发生颅内动脉瘤破裂者31例,在随访28 d内死亡25例。分别对患者的一般资料以及影像学资料进行分析,采用Logistics分析造成颅内动脉瘤破裂以及死亡的危险因素。采用ROC曲线对以上模型的验证能力进行分析。**结果:**破裂组以及非破裂组、生存组以及死亡组患者的年龄、体质量指数、动脉瘤个数、动脉瘤最长直径、动脉瘤体颈比、动脉瘤宽度、动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值、瘤体垂直高度、SurfaceArea、SurfaceVolumeRatio、Maxium2DDiameterSlice、Maximum2DDiameterColumn、Maximun2DDiameterRow、饮酒史、吸烟史、高血压史之间的差异存在统计学意义( $P<0.05$ ),是造成颅内动脉瘤破裂以及死亡的危险因素。**结论:**CTA形态学-影像组学特征对颅内动脉瘤破裂及预后的预测效果较好,可以作为临床早期判定不良预后的重要依据。

**【关键词】**CT血管造影;形态学;影像组学;颅内动脉瘤;动脉瘤破裂

**【中图分类号】**R816.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2026)04-0467-06

### Prediction model for intracranial aneurysm rupture and prognosis based on morphological and imaging features on CT angiography

LU Chenyang, ZHANG Zhou

Medical Imaging Center, Taihe Hospital of Shiyan City, Shiyan 442000, China

**Abstract: Objective** To explore the prediction model for intracranial aneurysm rupture and prognosis based on the morphological and imaging features derived from CT angiography. **Methods** A retrospective study was performed on 100 patients with intracranial aneurysms treated between January 2021 and August 2024. Of these, 31 had intracranial aneurysm ruptures, and 25 died within 28 days of follow-up. The general data and imaging data of patients were analyzed. Logistics regression was adopted to identify the risk factors for intracranial aneurysm rupture and mortality, and ROC curve was used to evaluate the predictive performance of the model. **Results** Statistically significant differences were observed between the ruptured and non-ruptured groups, as well as between the survivor and non-survivor groups, in the following factors: age, body mass index, number of aneurysms, longest diameter of aneurysms, body-neck ratio of aneurysms, aneurysm width, ratio of aneurysm body width to neck width, aneurysm vertical height, SurfaceArea, SurfaceVolumeRatio, Maxium2DDiameterSlice, Maximum2DDiameterColumn, Maximun2DDiameterRow, drinking history, smoking history, and hypertension history (all  $P<0.05$ ). These factors were identified as risk factors for intracranial aneurysm rupture and mortality. **Conclusion** The morphological and imaging features on CT angiography demonstrate favorable predictive performance for intracranial aneurysm rupture and prognosis, and can serve as an important reference for the early prediction of poor prognosis.

**Keywords:** CT angiography; morphology; imaging omics; intracranial aneurysm; aneurysm rupture

**【收稿日期】**2025-11-21

**【基金项目】**湖北省自然科学基金青年项目(2022CFB853)

**【作者简介】**卢晨阳,技师,研究方向:头、腹部医学影像技术,E-mail:  
lu774631@163.com

**【通信作者】**张轴,主管技师,研究方向:头、腹部医学影像技术,E-mail:  
12973683@qq.com

### 前言

颅内动脉瘤破裂通常表现为突发的剧烈头痛、意识障碍甚至昏迷,若未能及时诊断和治疗,可导致高致死率和严重的神经功能损害<sup>[1]</sup>。颅内动脉瘤破裂后最常见的并发症是蛛网膜下腔出血,约占所有

脑出血的25%~30%<sup>[2]</sup>。根据流行病学数据,颅内动脉瘤的年破裂率为0.5%~2%<sup>[3]</sup>,但这一比例在动脉瘤大小、位置以及患者年龄、性别等因素的影响下有所不同。破裂后的早期处理和预后评估是改善生存率和减少神经功能损伤的关键。将CTA形态学特征与影像组学分析相结合,在颅内动脉瘤方面具有广阔应用前景。通过整合两者所提供的多维信息,可以建立更加完整和准确的模型评估动脉瘤是否易于发生或已经发生了破裂,并进一步预测患者的治疗效果及预后情况<sup>[4-5]</sup>。本研究主要通过CTA形态学-影像组学特征对颅内动脉瘤破裂及预后的预测模型构建,以为临床诊断提供新思路。

## 1 资料与方法

### 1.1 基本资料

本研究采取回顾性研究,研究对象为2021年1月~2024年8月接受治疗的颅内动脉瘤患者100例,其中男性45例,女性55例,年龄65~75岁,平均年龄(68.02±1.3)岁,体质量指数为(25.04±1.38) kg/m<sup>2</sup>。其中,有31例患者发生了颅内动脉瘤破裂,在28 d内的随访数据记录中,有25例患者发生死亡。本研究经本院医学伦理委员会批准,审批号:2024-01068。

患者入选标准:①经CTA确诊为颅内动脉瘤,符合诊断标准<sup>[6]</sup>;②接受手术或介入治疗,CTA影像学资料完整。排除标准:①合并血管畸形患者;②既往存在颅内动脉瘤破裂患者;③合并恶性肿瘤患者;④

合并严重脏器功能损伤患者;⑤CTA影像质量不足以进行影像组学分析者。

### 1.2 研究方法

所有纳入研究的患者均已完成CTA检查(图1)。在获取患者的影像学数据后,分别对患者的动脉瘤个数、动脉瘤最长直径、动脉瘤体颈比、动脉瘤宽度、动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值、瘤体垂直高度、瘤体直径、瘤颈宽度进行测量。随后使用Software技术对患者的血管形态进行重建,分别对局部血管的Compactness1、Compactness2、SurfaceArea、SurfaceVolumeRatio、球度、SphericalDisproportion、Maxium2DDiameterSlice、Maximum2D-DiameterColumn、Maximum2DDiameterRow、Elogation以及Flatness之间的差异进行分析。本研究中,Compactness1主要对球体的紧密程度进行测量,Maximum2DDiameterRow为矢状平面中网格顶点表面之间的最大成对欧几里得距离,Compactness2为球体的紧密程度的度量,Maximum2DDiameterColumn为冠状平面中网格顶点表面之间的最大成对欧几里得距离,SurfaceArea为瘤体的总面积,Maxium2DDiameterSlice为轴向平面中曲面网格顶点之间的最大成对欧几里得距离,SurfaceVolumeRatio为表面积与体积的比率,Maximum3DDiameter为曲面网格顶点之间的最大成对欧几里得距离,Elogation(伸长率)为形状中两个最大主成分之间的关系,SphericalDisproportion为具有相同体积的球体表面积,Flatness(平坦度)为形状中最大和最小主成分之间的关系。

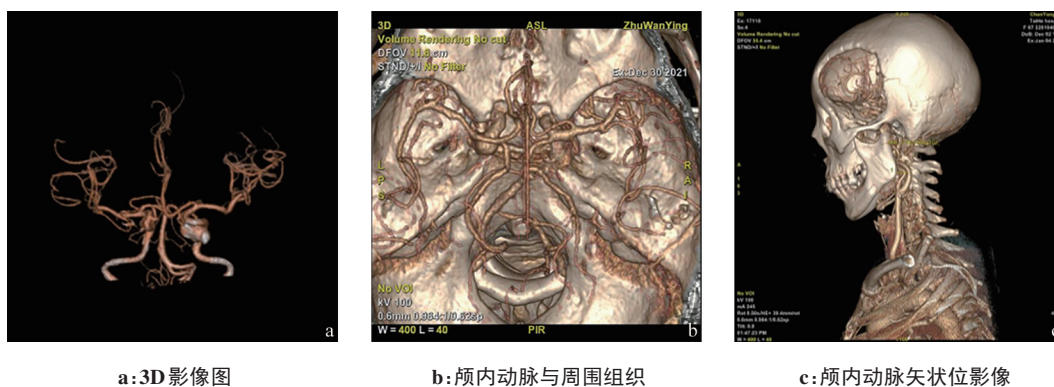


图1 颅内动脉瘤CT图像

Figure 1 CT images of intracranial aneurysm

### 1.3 观察指标

1.3.1 一般资料 包括性别、年龄、体质量指数、饮酒史、吸烟史、高血压史等。分析影像学资料,包括动脉瘤个数、动脉瘤最长直径、动脉瘤体颈比、动脉瘤宽度、动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值、瘤体垂直高度、瘤体直径、瘤颈宽度等。

1.3.2 颅内动脉瘤破裂以及死亡的单因素以及多因素分析 分别对患者的一般资料以及影像学资料进行分析,采用Logistics分析造成颅内动脉瘤破裂以及死亡的危险因素。

1.3.3 ROC曲线分析 采用ROC曲线对以上模型的验证能力进行分析。

## 1.4 统计学方法

使用SPSS 26.0软件进行数据分析,符合正态分布的计量数据用均数±标准差表示,采用独立样本 $t$ 检验,计数资料以 $[n(\%)]$ 表示,采用卡方检验及连续性校正卡方检验。 $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 颅内动脉瘤破裂以及死亡的单因素分析

破裂组以及非破裂组、生存组以及死亡组患者的年龄、体质量指数、动脉瘤个数、动脉瘤最长直径、动脉瘤瘤体颈比、动脉瘤宽度、动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值、瘤体垂直高度、SurfaceArea、SurfaceVolumeRatio、Maxium2DDiameterSlice、Maximum2DDiameterColumn、Maximun2DDiameterRow、饮酒史、吸烟史、高血压史之间的差异存在统计学意义( $P<0.05$ ),见表1和表2。

表1 颅内动脉瘤破裂单因素分析

Table 1 Univariate analysis for intracranial aneurysm rupture

因素	破裂组( $n=31$ )	非破裂组( $n=69$ )	$\chi^2/t$ 值	$P$ 值
性别(例,男/女)	10/21	35/34	2.947	0.086
年龄/岁	71.29±1.18	66.55±1.35	19.548	<0.01
体质量指数/kg·m <sup>2</sup>	25.72±1.33	24.73±1.40	3.386	0.001
饮酒史(是/否)	25/6	19/50	24.485	<0.01
吸烟史(是/否)	19/12	12/57	19.271	<0.01
高血压史(是/否)	19/12	15/54	14.911	<0.01
动脉瘤个数/个	2.38±0.21	1.62±0.36	10.930	<0.01
动脉瘤最长直径/mm	6.52±1.31	4.25±1.29	8.100	<0.01
动脉瘤体颈比	1.74±0.28	1.28±0.21	9.105	<0.01
动脉瘤宽度/mm	5.75±1.16	4.26±0.40	9.529	<0.01
动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值	1.64±0.33	1.45±0.35	2.554	0.012
瘤体垂直高度/mm	10.78±1.29	9.88±1.30	3.209	0.002
瘤体直径/mm	9.94±1.14	9.97±1.21	0.117	0.907
瘤颈宽度/mm	3.56±0.29	3.51±0.33	0.727	0.469
Comactness1	0.03±0.02	0.03±0.01	0.001	0.999
Compactness2	0.51±0.16	0.55±0.27	0.765	0.446
SurfaceArea	164.13±10.22	84.23±10.23	36.133	<0.01
SurfaceVolumeRatio	2.12±0.29	1.54±0.24	9.731	<0.01
球度	0.81±0.19	0.83±0.25	0.397	0.693
SphericalDisproportion	1.24±0.38	1.25±0.37	0.124	0.902
Maxium2DDiameterSlice	7.60±1.29	5.08±1.23	9.334	<0.01
Maximum2DDiameterColumn	7.76±1.14	6.38±1.38	4.868	<0.01
Maximun2DDiameterRow	7.36±0.86	5.42±1.41	7.080	<0.01
Elogation	0.74±0.21	0.76±0.27	0.365	0.716
Flatness	0.60±0.14	0.61±0.27	0.194	0.846

### 2.2 颅内动脉瘤破裂以及死亡的多因素分析

较高的年龄、体质量指数、动脉瘤个数、动脉瘤最长直径、动脉瘤体颈比、动脉瘤宽度、动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值、瘤体垂直高度、SurfaceArea、SurfaceVolumeRatio、Maxium2DDiameterSlice、Maximum2D-

DiameterColumn、Maximun2DDiameterRow、合并饮酒史、吸烟史、高血压史均是造成颅内动脉瘤破裂以及死亡的危险因素,通过模型构建,颅内动脉瘤破裂=13.365+年龄×1.112+体质量指数×1.148+饮酒史×1.168+吸烟史×1.202+高血压史×1.089+动脉瘤个数×

表2 颅内动脉瘤死亡单因素分析

Table 2 Univariate analysis for intracranial aneurysm-related mortality

因素	死亡组(n=25)	生存组(n=6)	$\chi^2/t$ 值	P值
性别(例,男/女)	7/18	3/3	0.301	0.583
年龄/岁	73.11±1.21	63.70±1.04	17.506	<0.01
体质量指数/kg·m <sup>-2</sup>	25.99±1.31	24.59±1.39	2.326	0.027
饮酒史(是/否)	22/3	2/4	5.440	0.020
吸烟史(是/否)	19/6	1/5	5.075	0.024
高血压史(是/否)	19/6	1/5	5.075	0.024
动脉瘤个数/个	2.49±0.23	1.92±0.12	5.829	<0.01
动脉瘤最长直径/mm	7.21±1.38	3.64±1.03	5.921	<0.01
动脉瘤体颈比	1.99±0.30	0.69±0.21	9.981	<0.01
动脉瘤宽度/mm	5.99±1.17	4.75±1.10	2.355	0.026
动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值	1.99±0.40	0.18±0.02	10.939	<0.01
瘤体垂直高度/mm	11.21±1.33	8.98±1.10	3.793	0.001
瘤体直径/mm	9.95±1.13	9.89±1.17	0.174	0.863
瘤颈宽度/mm	3.55±0.25	3.60±0.44	0.377	0.709
Comactness1	0.03±0.01	0.03±0.02	0.001	0.999
Compactness2	0.51±0.18	0.49±0.10	0.260	0.790
SurfaceArea	166.13±10.28	155.81±9.97	2.220	0.034
SurfaceVolumeRatio	2.28±0.27	1.45±0.38	6.254	<0.01
球度	0.82±0.21	0.76±0.10	0.675	0.505
SphericalDisproportion	1.25±0.40	1.19±0.30	0.343	0.734
Maxium2DDiameterSlice	7.90±1.38	6.37±0.91	2.567	0.016
Maximum2DDiameterColumn	7.98±1.21	6.84±0.84	2.172	0.038
Maximun2DDiameterRow	7.91±0.91	5.07±0.67	7.153	<0.01
Elogation	0.73±0.22	0.77±0.36	0.352	0.727
Flatness	0.59±0.13	0.63±0.19	0.619	0.541

1.088+动脉瘤最长直径×1.206+动脉瘤体颈比×1.194+动脉瘤宽度×1.019+动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值×1.199+瘤体垂直高度×1.093+SurfaceArea×1.095+SurfaceVolumeRatio×1.009+Maxium2D-DiameterSlice×1.151+Maximum2DDiameterColumn×1.181+Maximun2D-DiameterRow×1.196。颅内动脉瘤死亡=13.062+年龄×1.049+体质量指数×1.06+饮酒史×1.168+吸烟史×1.109+高血压史×1.081+动脉瘤个数×1.076+动脉瘤

最长直径×1.152+动脉瘤体颈比×1.086+动脉瘤宽度×1.057+动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值×1.047+瘤体垂直高度×1.12+SurfaceArea×1.182+SurfaceVolumeRatio×1.192+Maxium2DDiameterSlice×1.162+Maximum2D-DiameterColumn×1.004+Maximun2DDiameterRow×1.163。

### 2.3 ROC 曲线分析

通过ROC曲线分析,以上模型对于颅内动脉瘤破裂以及死亡的预测效能较高,见表3。

表3 ROC曲线分析

Table 3 ROC curve analysis

结局	真阳性/例	假阳性/例	真阴性/例	假阴性/例	准确率/%	灵敏度/%	特异度/%	阳性预测值/%	阴性预测值/%	标准误	AUC	AUC(95% CI)
破裂	28	37	32	3	60.00	90.32	46.38	43.07	91.43	11.231	0.771	0.762-0.864
死亡	22	35	40	3	62.00	88.00	53.33	38.60	93.02	4.342	0.852	0.810-0.977

### 3 讨论

研究表明动脉瘤大小是预测其破裂风险的重要指标之一。一般来说,直径大于10 mm的动脉瘤更容易发生破裂<sup>[7-8]</sup>。此外,动脉瘤形态也与其稳定性密切相关,如不规则形态、长轴与周围血管角度小于90°等因素可能增加动脉瘤的脆弱性和出血风险。同时,壁厚度较薄或存在局部纤维弱化等情况也提示动脉壁易受损,并有可能导致出血事件<sup>[9-10]</sup>。在颅内动脉瘤方面,影像组学可通过分析CTA图像中的灰度值、纹理特征、三维结构等信息寻找与动脉瘤稳定性和患者预后相关联的影像指标<sup>[11-12]</sup>。将CTA形态学特征与影像组学分析相结合,在颅内动脉瘤方面具有广阔应用前景<sup>[13-14]</sup>。

本研究通过单因素和多因素分析,结果显示较高的年龄、体质量指数、动脉瘤个数、动脉瘤最长直径、动脉瘤体颈比、动脉瘤宽度、动脉瘤瘤体宽度与瘤颈宽度比值、瘤体垂直高度、SurfaceArea、SurfaceVolumeRatio、Maxium2DDiameterSlice、Maximum2D-DiameterColumn、Maximun2D-DiameterRow以及合并饮酒史、吸烟史、高血压史等因素是影响颅内动脉瘤破裂及死亡的显著危险因素。随着年龄的增长,血管内皮损伤及动脉硬化逐渐加剧<sup>[15]</sup>。动脉瘤的形成与破裂与血管的老化密切相关<sup>[16]</sup>。高体质量指数往往与肥胖、代谢综合征、高血压、糖尿病等多种疾病相关,而这些疾病又是动脉瘤破裂的重要危险因素<sup>[17-18]</sup>。单个动脉瘤的破裂风险相对较低,但若患者存在多发性动脉瘤,则破裂的风险明显增加。体颈比越大,表明动脉瘤的瘤体相对于瘤颈更为膨胀,这意味着血流对动脉瘤的压力可能更大,导致破裂的风险增加<sup>[19]</sup>。体颈比超过2.0的动脉瘤破裂的概率较高。瘤体宽度与瘤颈宽度比值增大时,表明动脉瘤的结构更加脆弱,破裂的风险也随之增加<sup>[20]</sup>。该比值大于2.5时,动脉瘤破裂的可能性较高<sup>[21]</sup>。瘤体垂直高度较大时,动脉瘤的结构可能更加不稳定,受到血流冲击的力量较强,增加了破裂的几率。垂直高度较大的动脉瘤通常伴随有较大的血流冲击力和更高的血压波动,这些因素都加剧了动脉瘤破裂的风险<sup>[22]</sup>。SurfaceArea、SurfaceVolumeRatio是评估动脉瘤破裂风险的两个重要指标。较大的表面积意味着动脉瘤在相同体积下受到的血流冲击较大,增加了破裂的风险<sup>[23-24]</sup>。表面积与体积比值较高则通常意味着动脉瘤形态不规则,结构较为薄弱,容易在血流压力作用下破裂<sup>[25]</sup>。动脉瘤的最大二维直径与其破裂风险密切相关。通过不同的切片和平面进行测量,可以更准确地评估动脉瘤的形态和大小,为临床医生提

供重要的信息。通过以上模型分析,其对于患者的不良预后以及破裂的预测效能较好。

综上所述,CTA形态学-影像组学特征对颅内动脉瘤破裂及预后的预测效果较好,可以作为临床早期判定不良预后的重要依据。

### 【参考文献】

- [1] Celikoglu E, Eksi MS, Bastaci F, et al. Risk factors for intracranial aneurysm rupture: a clinical case series and systematic review of the literature[J]. Turk Neurosurg, 2024, 34(4): 624-639.
- [2] 唐海双,王硕,刘清源.基于中国人群不稳定颅内动脉瘤的标志物和风险分层模型[J].科学通报,2024,69(36):5195-5196. Tang HS, Wang S, Liu QY. Biomarkers and risk stratification model for unstable intracranial aneurysms based on Chinese population[J]. Science Bulletin, 2024, 69(36): 5195-5196.
- [3] Wermer MJ, van der Schaaf IC, Algra A, et al. Risk of rupture of unruptured intracranial aneurysms in relation to patient and aneurysm characteristics: an updated Meta-analysis[J]. Stroke, 2007, 38(4): 1404-1410.
- [4] Fujimura S, Yanagisawa T, Kudo G, et al. Development and validation of a prediction model for intracranial aneurysm rupture Risk[J]. JAMA Netw Open, 2025, 8(12): e2550772.
- [5] 陈鹏飞,范文辉,梁奕,等.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[J].中国临床神经外科杂志,2024,29(7):385-390. Chen PF, Fan WH, Liang Y, et al. Construction and validation of a prediction model for rupture of anterior communicating artery aneurysms based on CTA radiomics features[J]. Chinese Journal of Clinical Neurosurgery, 2024, 29(7): 385-390.
- [6] 王硕,赵继宗,赵兵,等.中国未破裂颅内动脉瘤临床管理指南(2024版)[J].中华医学杂志,2024,104(21):1918-1939. Wang S, Zhao JZ, Zhao B, et al. Chinese guideline for clinical management of unruptured intracranial aneurysms (2024 edition)[J]. National Medical Journal of China, 2024, 104(21): 1918-1939.
- [7] Long H, Che W, Yang C, et al. Identification of key risk factors for rupture in small intracranial aneurysms: a multicenter study[J]. World Neurosurg, 2025, 194: 123552.
- [8] 熊凡凡,徐志华,茅国群,等.基于AneurDoc软件的CT血管造影颅内前循环动脉瘤形态学参数分析及破裂影响因素研究[J].浙江医学,2025,47(18):1968-1974. Xiong FF, Xu ZH, Mao GQ, et al. Morphological parameter analysis and rupture influencing factors of intracranial anterior circulation aneurysms based on AneurDoc software using CT angiography[J]. Zhejiang Medical Journal, 2025, 47(18): 1968-1974.
- [9] 季金璿,郭锋,赵秀豪,等.颈内动脉后交通段动脉瘤破裂风险预测模型的构建与评估[J].中华神经外科杂志,2024,40(10):1011-1017. Ji JC, Guo F, Zhao XH, et al. Construction and evaluation of a risk prediction model for rupture of posterior communicating artery aneurysms of internal carotid artery [J]. Chinese Journal of Neurosurgery, 2024, 40(10): 1011-1017.
- [10] 陈姿,张伟,卢文彪.单发未破裂颅内动脉瘤出现破裂相关症状风险的预测模型构建[J].中国医学计算机成像杂志,2025,31(4):460-465. Chen Z, Zhang W, Lu WB. Construction of a prediction model for rupture-related symptom risk in solitary unruptured intracranial aneurysms[J]. Chinese Journal of Medical Computer Imaging, 2025, 31(4): 460-465.
- [11] Niemann A, Behme D, Larsen N, et al. Deep learning-based semantic vessel graph extraction for intracranial aneurysm rupture risk management[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2023, 18(3): 517-525.
- [12] Choi JH, Sobisch J, Kim M, et al. Prediction of intracranial aneurysm rupture from computed tomography angiography using an automated artificial intelligence framework[J]. Comput Biol Med, 2025, 197(Pt A): 110965.
- [13] 王琦璿,陈艾琪,谭诗琪,等.基于CTA影像组学在预测动脉瘤破裂风险中的价值[J].中国CT和MRI杂志,2024,22(3):16-18. Wang YF, Chen AQ, Tan SQ, et al. Value of CTA-based radiomics in

- predicting aneurysm rupture risk[J]. Chinese Journal of CT and MRI, 2024, 22(3): 16-18.
- [14] Li R, Zhou P, Chen X, et al. Construction and evaluation of multiple radiomics models for identifying the instability of intracranial aneurysms based on CTA[J]. Front Neurol, 2022, 13: 876238.
- [15] Morel S, Hostettler IC, Spinner GR, et al. Intracranial aneurysm classifier using phenotypic factors: an international pooled analysis[J]. J Pers Med, 2022, 12(9).
- [16] Wang S, Geng J, Wang Y, et al. Risk factors of unruptured intracranial aneurysms instability in the elderly[J]. Acta Neurochir (Wien), 2024, 166(1): 35.
- [17] 漆平强, 曾义军, 彭伟, 等. 基于 Logistic 回归分析的颅内动脉瘤破裂危险因素筛查及预测模型建立[J]. 临床神经外科杂志, 2024, 21(6): 673-677.  
Qi PQ, Zeng YJ, Peng W, et al. Screening of risk factors for intracranial aneurysm rupture and establishment of a prediction model based on logistic regression analysis [J]. Journal of Clinical Neurosurgery, 2024, 21(6): 673-677.
- [18] 黄建宁, 周少旦, 叶禹彤, 等. 机器学习方法构建基于 CT 血管成像预测颅内动脉瘤破裂模型的研究[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2024, 22(10): 32-34.  
Huang JN, Zhou SD, Ye YT, et al. Machine learning method to construct a model for predicting intracranial aneurysm rupture based on CT angiography[J]. Chinese Journal of CT and MRI, 2024, 22(10): 32-34.
- [19] Hu SQ, Chen RD, Xu WD, et al. Risk factors for the rupture of mirror middle cerebral artery aneurysm using computer-assisted semiautomated measurement and hemodynamic analysis[J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2022, 31(12): 106841.
- [20] 李腾飞, 杨杨, 范璐瑶, 等. 基于形态学和血流动力学的颅内动脉瘤破裂危险因素分析与评估[J]. 医用生物力学, 2024, 39(S01): 615.  
Li TF, Yang Y, Fan LY, et al. Analysis and evaluation of risk factors for intracranial aneurysm rupture based on morphology and hemodynamics [J]. Journal of Medical Biomechanics, 2024, 39(S01): 615.
- [21] 胡坤江, 刘田田, 陈邦辉, 等. 基于四维血流 MRI 的血流动力学与形态学特征对不稳定囊状颅内动脉瘤诊断的价值[J]. 实用放射学杂志, 2025, 41(9): 1437-1440.  
Hu KJ, Liu TT, Chen BH, et al. Value of hemodynamic and morphological features based on four-dimensional flow MRI for diagnosing unstable saccular intracranial aneurysms[J]. Journal of Practical Radiology, 2025, 41(9): 1437-1440.
- [22] Kamphuis MJ, van der Kamp LT, van Eijk RPA, et al. 3D quantified morphologic predictors of intracranial aneurysm instability: a longitudinal study[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2025, 46(10): 2041-2048.
- [23] 谢洪伟, 漆平强, 王代桦, 等. 血清白介素-15、白介素-17A 水平与孤立性未破裂颅内动脉瘤破裂风险的相关性研究[J]. 中国医刊, 2025, 60(3): 287-292.  
Xie HW, Qi PQ, Wang DH, et al. Correlation between serum interleukin-15 and interleukin-17A levels and rupture risk of solitary unruptured intracranial aneurysms[J]. Chinese Journal of Medicine, 2025, 60(3): 287-292.
- [24] 崔小鹏, 赵岩, 靳育静, 等. 基于几何形态学与血流动力学特征分析单发中小型颅内动脉瘤破裂的影响因素[J]. 中华神经外科杂志, 2025, 41(9): 908-917.  
Cui XP, Zhao Y, Jin YJ, et al. Analysis of influencing factors for rupture of solitary small and medium-sized intracranial aneurysms based on geometric morphology and hemodynamic characteristics [J]. Chinese Journal of Neurosurgery, 2025, 41(9): 908-917.
- [25] 王倩, 石士奎. 颅内动脉瘤形态学特征及 CTA 在破裂风险评估中的应用价值研究[J]. CT 理论与应用研究, 2024, 33(4): 503-510.  
Wang Q, Shi SK. Morphological characteristics of intracranial aneurysms and the application value of CTA in rupture risk assessment [J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(4): 503-510.

(编辑:黄开颜)