

doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2020.05.021

View this article at: <http://dx.doi.org/10.3978/j.issn.2095-6959.2020.05.021>

## 四维 CT 血管成像在微小动脉瘤破裂风险因素分析中的应用价值

张雪辉, 左云海, 季涛

(青岛市市立医院本部放射科, 山东 青岛 266011)

**[摘要]** 目的: 探究四维CT血管成像(four-dimensional CT angiography, 4D-CTA)在颅内长径<5 mm的动脉瘤破裂风险因素分析中的应用价值。方法: 选取2015年1月至2018年12月于青岛市市立医院连续行心电控4D-CTA检查的颅内动脉瘤236患者作为研究对象, 依据动脉瘤是否破裂分为破裂组(144例)和未破裂组(92例), 单因素分析两组患者的临床资料和瘤颈比(aspect ratio, AR)、动脉瘤的大小、动脉瘤的瘤高与载瘤动脉直径之比(size ratio, SR)、入射夹角、异常搏动点, logistic回归分析颅内长径<5 mm的动脉瘤破裂风险因素, 并采用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线绘制预测模型。结果: 单因素分析结果显示家族史、血管分叉处、出现异常搏动点、AR、SR以及入射夹角在破裂组和未破裂组间差异有统计学意义( $P<0.05$ ); logistic回归分析结果显示出现异常搏动点(OR: 8.498; 95%CI: 2.876~28.197)、AR(OR: 4.389; 95%CI: 1.129~18.298)、SR(OR: 4.718; 95%CI: 1.403~16.238)以及入射夹角(OR: 1.067; 95%CI: 1.028~1.879)均为颅内长径<5 mm的动脉瘤破裂的独立危险因素, 以此建立的预测模型ROC曲线下面积为0.744(95%CI: 0.701~0.795), 截断值为0.542时, 模型预测性能较好, 准确率为84.38%, 敏感度为88.76%, 特异度为82.17%, 阳性预测值为92.12%, 阴性预测值为80.28%。结论: 出现异常搏动点、高AR、高SR以及高入射夹角均提示颅内长径<5 mm的动脉瘤具有破裂的风险, 4D-CTA作为新的动态检查方法, 在发现微小动脉瘤破裂方面具有十分重要的意义。

**[关键词]** 颅内动脉瘤; 蛛网膜下腔出血; 危险因素

## Application value of four-dimensional CT angiography in risk factor analysis for rupture of microaneurysms

ZHANG Xuehui, ZUO Yunhai, JI Tao

(Department of Radiology, Qingdao Municipal Hospital Headquarters, Qingdao Shandong 266011, China)

**Abstract** **Objective:** to explore the application value of four-dimensional CT angiography (4D-CTA) in the analysis of risk factors of intracranial aneurysm rupture with length <5 mm. **Methods:** A total of 236 patients with intracranial aneurysms who underwent continuous cardiac electric control 4D-CTA examination in our hospital from January 2015 to December 2018 were selected as the research objects. According to whether the aneurysm ruptured, they were divided into ruptured group (144 cases) and unruptured group (92 cases). The clinical data, aspect ratio (AR),

收稿日期 (Date of reception): 2019-08-01

通信作者 (Corresponding author): 季涛, Email: 2370918791@qq.com

aneurysm size, ratio of aneurysm height to tumor-bearing artery diameter (SR), incidence angle, pulsation point of the two groups of patients were analyzed by single factor. Logistic regression was used to analyze the risk factors of intracranial aneurysm rupture with length <5 mm, and receiver operating characteristic curve (ROC) was used to draw the prediction model. **Results:** The results of single factor analysis showed that there were statistical differences in family history, vascular bifurcation, pulsating point, AR, SR and incidence angle between ruptured group and unruptured group ( $P<0.05$ ). Logistic regression analysis showed pulsating point (OR: 8.498; 95% CI: 2.876–28.197), AR (OR: 4.389; 95%CI: 1.129–18.298), SR (OR: 4.718; 95% CI: 1.403–16.238) and incidence angle (OR: 1.067; 95% CI: 1.028–1.879) were independent risk factors for intracranial aneurysm rupture with a long diameter <5 mm. The area under ROC curve of the prediction model established by this method was 0.744 (95% CI: 0.701–0.795). When the cutoff value was 0.542, the prediction performance of the model was good, the accuracy rate was 84.38%, the sensitivity was 88.76%, the specificity was 82.17%, the positive prediction value was 92.12%, and the negative prediction value was 80.28%. **Conclusion:** The occurrence of abnormal pulsating point, high AR, high SR, and high incidence angle suggested that aneurysms with intracranial length <5 mm are at risk of rupture. As a new dynamic examination method, 4D-CTA is of great significance in detecting rupture of microaneurysms.

**Keywords** intracranial aneurysm; subarachnoid hemorrhage; risk factor

颅内动脉瘤作为临床常见病, 其发病率在5%~10%, 而动脉瘤破裂是引起蛛网膜下腔出血的主要原因<sup>[1]</sup>。国内外学者<sup>[2-3]</sup>开展了包括动脉瘤自身特征、临床特征以及血流动力学等方面颅内动脉瘤破裂风险因素的研究, 但对于<5 mm动脉瘤破裂风险的结论尚存在较大争议。多数学者<sup>[4-5]</sup>认为动脉瘤越大, 其破裂风险就会越高, 但也有学者<sup>[6]</sup>认为小动脉瘤更容易破裂。研究<sup>[7]</sup>表明: 动脉瘤是形态相关性疾病, 瘤内血液与载瘤动脉内血液动力学一样, 随着动脉搏动处于一种相对运动状态, 因此其形态不固定, 既往形态学研究<sup>[8-9]</sup>多是采用三维CTA进行的静态数据研究, 而缺乏动态数据, 因此本研究采用四维CT血管成像(4-dimensional computed tomographic angiography, 4D-CTA), 从颅内动脉瘤动态变化角度分析<5 mm动脉瘤破裂的风险因素, 以期协助医生针对<5 mm动脉瘤破裂治疗作出正确决策。

## 1 对象与方法

### 1.1 对象

选取2015年1月至2018年12月于青岛市市立医院连续行心电门控4D-CTA检查的颅内动脉瘤患者作为研究对象。纳入标准: 1)长径<5 mm的颅内囊状动脉瘤者; 2)4D-CTA图像清晰, 符合诊断标准者; 3)动脉瘤包括破裂和未破裂动脉瘤者, 其中未破裂动脉瘤包括单发未破裂动脉瘤以及多发动

脉瘤中的未破裂动脉瘤者。排除标准: 1)伴随有其他脑血管畸形者; 2)继发性颅内动脉瘤者(如感染性动脉瘤、外伤性动脉瘤等); 3)动脉瘤形状奇特测量较为困难者; 4)夹层动脉瘤患者。本研究经青岛市立医院医学伦理委员会批准展开。

最终共纳入符合要求的236患者的236个动脉瘤, 其中男90例, 女146例, 年龄12~80( $55.67\pm 10.29$ )岁, 依据动脉瘤是否破裂分为破裂组和未破裂组, 其中破裂组共计144个动脉瘤, 包含20个颈内动脉瘤, 28个大脑中动脉瘤, 44个前交通动脉瘤, 36个后交通动脉瘤, 16个基底动脉瘤; 未破裂组共计92个动脉瘤, 包含16个颈内动脉瘤, 20个大脑中动脉瘤, 26个前交通动脉瘤, 22个后交通动脉瘤, 8个基底动脉瘤。

### 1.2 临床资料收集

对入选患者的性别、年龄、BMI、既往病史(糖尿病、高脂血症和高血压病)等进行收集, 并统计家族脑血管病史、患者吸烟和饮酒情况。糖尿病: 存在既往病史或者符合《中国2型糖尿病防治指南》中的诊断标准<sup>[10]</sup>。高脂血症: 存在既往病史或者符合中国成人血脂异常防治指南。高血压: 存在既往病史或者符合《中国高血压基层管理指南》<sup>[11]</sup>。吸烟: 日吸烟量 $\geq 1$ 支, 且持续时间>1年, 计算日均吸烟量(支/d)。饮酒: 男性>420 g/周, 女性>280 g/周, 持续时间>5年。周饮酒量=每周含酒精饮料饮用量 $\times$ 酒精含量 $\times 0.8$ 。

### 1.3 扫描方法<sup>[12]</sup>

采用飞利浦64 CT扫描仪进行扫描, 其中管电流110 mA, 管电压120 kV, 模拟冠状动脉CTA扫描模式, 即连接心电监控, 采用双筒注射器将40 mL非离子型对比剂碘-海醇(含碘量为300 mg/mL)和20 mL生理盐水通过肘静脉注射, 注射流速为4.5 mL/s, 待颅内动脉早期显影后, 采用手动触发, 持续容积扫描1个R-R间期, 结束后收集原始数据进行重建, 其中1个心动周期内得出时间间隔均为5%的20组数据包, 将数据包载入飞利浦64CT图像后处理工作站, 获得颅内动脉心动周期内20副图像和动脉图像, 每个动脉瘤所有径线值取自20副图像测量值的平均值。其中扫描剂量采用CT容积量指数(volume CT dose index, CTDIvol)、剂量长度乘积(dose-length product, DLP)以及有效剂量(effective dose, ED)表示, ED值根据国际放射剂量委员会规定, 由DLP与头部CT转换指数0.021的乘积取得<sup>[8]</sup>, 经计算, 本研究中CT扫描的CTDIvol为(11.5±2.0) mGy, DLP为(118±15) mGy·cm, ED为(0.3±0.1) mSv。

### 1.4 形态学指标和界定标准

图像由两位具有5年丰富经验的神经影像医师共同完成观察和测量, 二者测量平均值作为最终结果。瘤颈比(aspect ratio, AR): 动脉瘤的瘤颈长度是指动脉瘤与载瘤动脉相交处的两点间连线, 瘤体高度是指动脉瘤底部最高点与动脉瘤颈部中

点的连线(图1)。AR=瘤体高度/瘤颈长度。动脉瘤的大小: 取动脉瘤的最大宽度与瘤高两个数值中的最大者。动脉瘤的最大宽度定义为垂直于瘤高的、连接动脉瘤两侧壁的最大线段长度(图1)。

动脉瘤瘤体最大瘤深与近端载瘤动脉直径之比值(size ratio, SR)=最大瘤体直径/近端载瘤动脉直径。近端载瘤动脉直径是指与该动脉瘤相关的所有血管直径的平均值, 即(c1+c2+c3……cn)/n(图1)。最大瘤体直径为距离近端瘤颈口附近5 mm以内最大的载瘤动脉管径的直径。入射夹角: 动脉瘤瘤高度延长线与近端载瘤动脉夹角(图1)。动脉瘤的异常搏动点: 一个心动周期内20幅动态图中, 连续3幅及以上图像发现小泡状及小尖状凸起, 且出现在动脉瘤的同一位置, 判定此凸起为异常搏动点(图2)。

### 1.5 统计学处理

采用SPSS 16.0软件进行数据分析。计量资料首先采用方差齐性和正态分布检验, 符合正态分布和方差齐性的数据采用均数±标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示, 两组间比较采用独立样本t检验; 计数资料用百分比表示, 两组间比较采用 $\chi^2$ 检验。在单变量分析的基础上筛选出两组间有统计学意义的变量, 再采用多变量logistic回归分析, 用前进模式, 以 $\alpha=0.05$ 为检验水准, 计算优势比(odds ratio, OR)和95%置信区间(confidence interval, CI),  $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

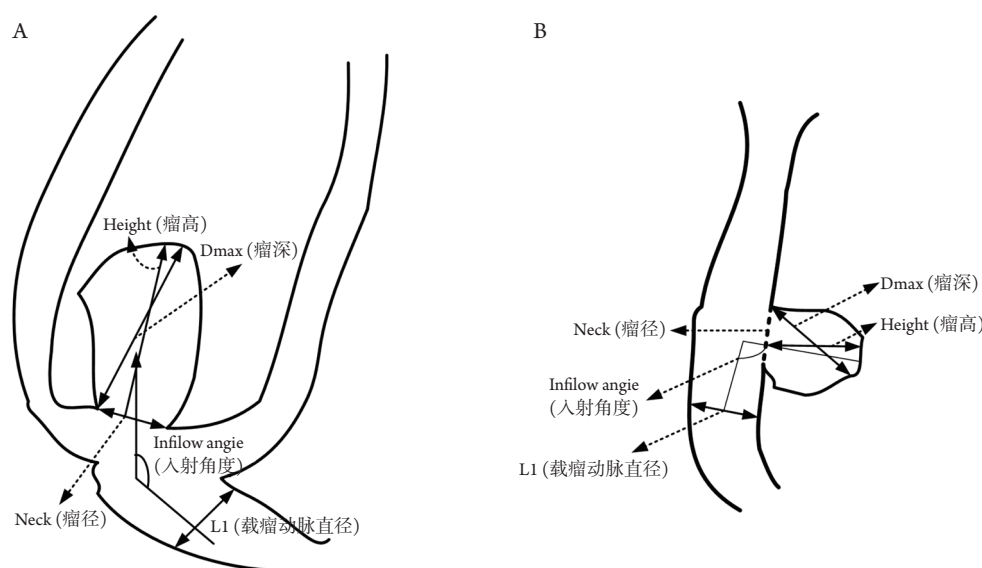


图1 顶壁动脉瘤(A)和侧壁动脉瘤(B)测量示意图

Figure 1 Schematic diagram of measurement of top wall aneurysm (A) and side wall aneurysm (B)

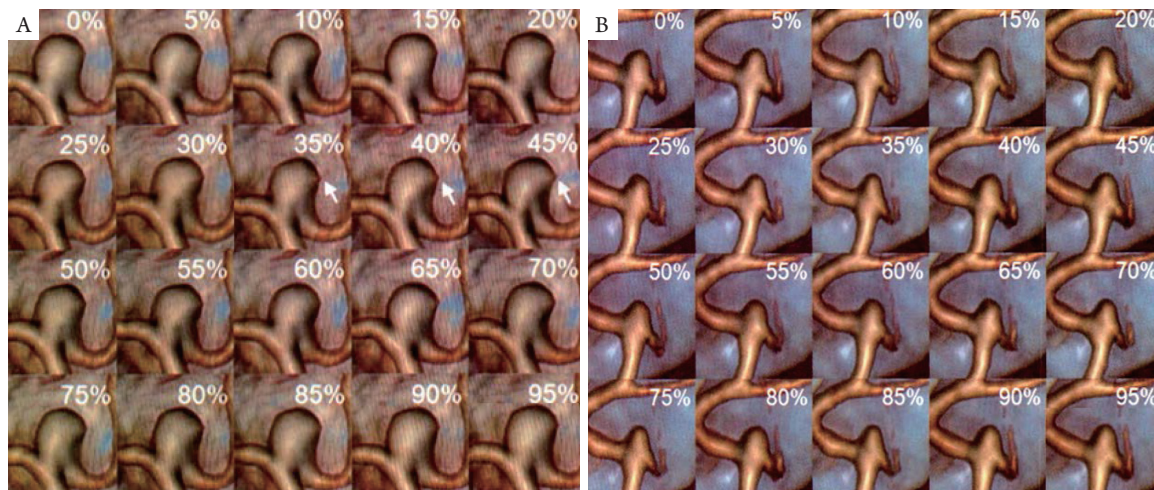


图2 典型病例4D-CTA图像

Figure 2 4D-CTA images of typical cases

(A)患者,男,48岁,左侧大脑中动脉分叉部未破裂动脉瘤(单发)4D-CTA图像,在35%、40%和45%3个期相可见瘤壁的小尖状突起,即搏动点; (B)患者,女,65岁,右侧大脑中分叉部未破裂动脉瘤4D-CTA图像,未见明显搏动点。

(A) Left middle cerebral artery bifurcation unbroken aneurysm (single) 4D-CTA image of a 48-year-old man. Small cusp protrusion of tumor wall, namely abnormal pulsating point, can be seen in 35%, 40% and 45% phases. (B) Right middle cerebral bifurcation unbroken aneurysm 4D-CTA image, without obvious abnormal pulsation point of a 65-year-old woman.

## 2 结果

### 2.1 破裂组和未破裂组小动脉瘤特征比较

单因素分析结果显示家族史、血管分叉处、出现异常搏动点、AR、SR以及入射夹角在破裂组和未破裂组间存在统计学差异( $P < 0.05$ ),而两组在年龄、性别比例、BMI、糖尿病、高血压、高血脂症、饮酒量、吸烟量、部位、大小、瘤径、瘤高方面差异无统计学意义( $P > 0.05$ ,表1,图3)。

### 2.2 Logistic 回归分析颅内长径 $< 5$ mm 的动脉瘤破裂风险因素

将单因素分析具有统计学意义的指标,即家

族史、血管分叉处、出现异常搏动点、AR、SR以及入射夹角作为自变量,以是否发生动脉瘤破裂作为因变量进行多因素logistic回归分析,结果显示出现异常搏动点、高AR、高SR以及高入射夹角为颅内长径 $< 5$  mm的动脉瘤的危险因素(表2)。

### 2.3 ROC 曲线分析预测模型

以logistic回归分析结果建立的方程绘制ROC曲线,曲线面积为0.744(95%CI 0.701~0.795),截断值为0.542时,模型预测性能较好,准确率为84.38%,敏感度为88.76%,特异度为82.17%,阳性预测值为92.12%,阴性预测值为80.28%(图4)。

表1 破裂组和未破裂组小动脉瘤特征比较

Table 1 Comparison of characteristics of small aneurysms in ruptured and unruptured groups

组别	n	年龄/岁	性别(男/女)/例	BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	家族史/例	糖尿病/例	高血压/例	高血脂症/例
破裂组	144	55.78 ± 9.87	60/84	24.56 ± 3.39	30	28	58	15
未破裂组	92	55.89 ± 10.46	30/62	24.62 ± 3.42	9	16	40	9
t/ $\chi^2$		0.082	1.952	0.132	4.970	0.156	0.237	0.025
P		0.935	0.162	0.895	0.026	0.693	0.627	0.875

续表 1

组别	每周饮酒量/g			每天吸烟量/支				部位/个				
	≥150	1~149	0	0	1~10	11~20	>20	后交通动脉	大脑中动脉	前交通动脉	颈内动脉	极低动脉
破裂组	14	100	30	93	14	28	9	20	28	44	36	16
未破裂组	8	70	14	61	9	16	6	16	20	26	22	8
t/χ <sup>2</sup>	1.357			0.159				1.045				
P	0.507			0.984				0.903				

组别	血管分叉处/例	出现异常搏动点/例	大小/mm	瘤径/mm	瘤高/mm	AR	SR	入射夹角/°
破裂组	104	124	3.4 ± 0.6	2.1 ± 0.5	3.5 ± 0.7	1.8 ± 0.3	1.8 ± 0.3	124.52 ± 20.18
未破裂组	40	30	3.3 ± 0.7	2.1 ± 0.5	3.4 ± 0.8	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.2	94.37 ± 19.24
t/χ <sup>2</sup>	19.499	48.125	1.169	0.000	1.012	14.103	11.283	11.397
P	<0.001	<0.001	0.243	1.000	0.313	<0.001	<0.001	<0.001

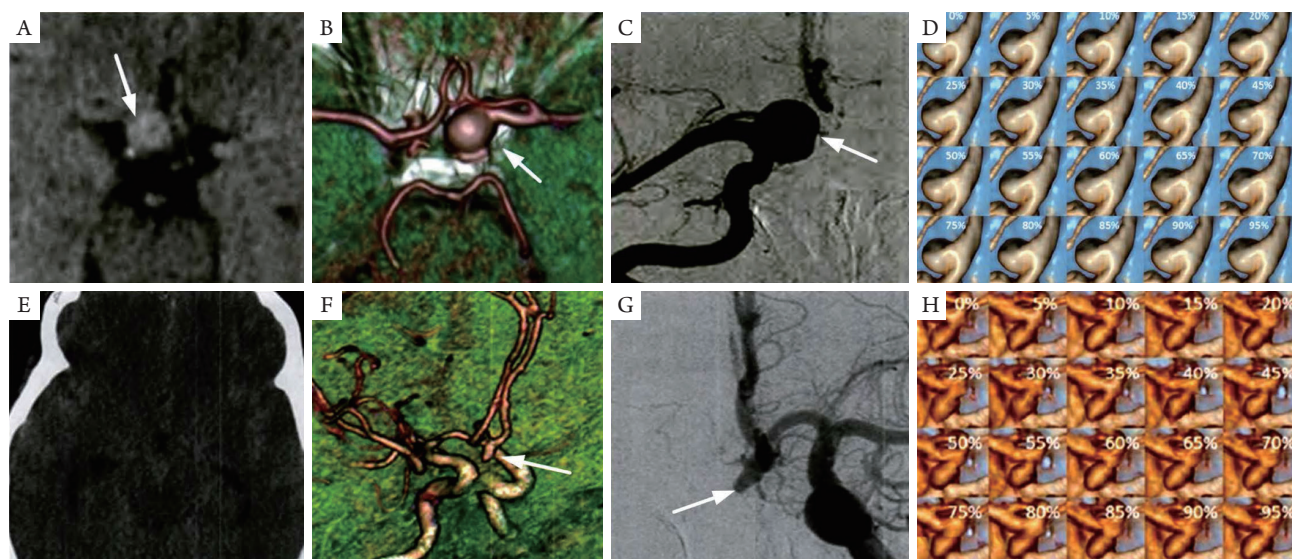


图3 典型病例

Figure 3 Typical cases

患者64岁, 诊断为右侧颈内动脉交通段动脉瘤未破裂: (A)CT扫描无出血(动脉瘤如箭头所示); (B)CTA发现右侧颈内动脉瘤(动脉瘤如箭头所示); (C)数字减影血管造影显示动脉瘤(动脉瘤如箭头所示); (D)4D-CTA图像显示肿瘤直径变化不大。患者65岁, 诊断为前交通动脉瘤破裂伴蛛网膜下腔出血: (E)CT扫描可见蛛网膜下腔出血; (F)CTA显示前交通动脉瘤(动脉瘤如箭头所示); (G)数字减影血管造影显示动脉瘤(动脉瘤如箭头所示); (H)4D-CTA图像显示肿瘤直径有较大变化。

A 64-year-old patient, diagnosis: right internal carotid artery communicating segment unbroken aneurysm, no hemorrhage on (A) CT plain scan (aneurysm indicated by arrow). (B) CTA found right internal carotid aneurysm (aneurysm indicated by arrow). (C) DSA showed aneurysm (aneurysm indicated by arrow). (D) 4D-CTA images showed small changes in tumor diameter. A 65-year-old patient, diagnosis: ruptured anterior communicating artery aneurysm with subarachnoid hemorrhage. (E) subarachnoid hemorrhage can be seen on plain byCT scan. (F) CTA showed anterior communicating artery aneurysm (aneurysm indicated by arrow). (G) DSA showed aneurysm (aneurysm indicated by arrow). (H) 4D-CTA images showed large changes in tumor diameter.

表2 Logistic回归分析颅内长径&lt;5 mm的动脉瘤破裂风险因素

Table 2 Logistic regression analysis of risk factors for rupture of intracranial aneurysms with length diameter &lt;5 mm

变量	$\beta$	SE	Wald $\chi^2$	P	OR	95%CI
常数	-7.892	1.449	20.019	<0.001	0.001	—
家族史	0.908	0.382	0.762	0.216	1.256	0.975~2.489
血管分叉处	0.884	0.379	1.007	0.058	1.378	0.909~5.045
出现异常搏动点	1.653	1.672	2.892	0.001	8.498	2.876~28.197
AR	1.436	0.456	1.498	0.032	4.389	1.129~18.298
SR	1.574	0.629	5.158	0.012	4.718	1.403~16.238
入射夹角	0.038	0.009	15.487	<0.001	1.067	1.028~1.879

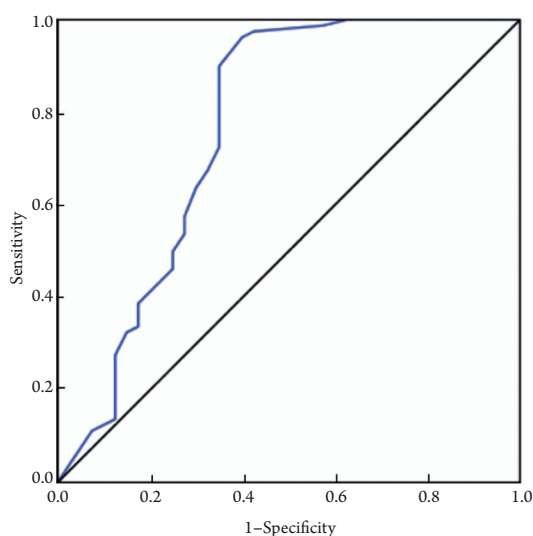


图4 颅内长径&lt;5 mm的动脉瘤破裂风险logistic回归预测模型的受试者工作特征曲线

Figure 4 Receiver operating characteristic curve of logistic regression prediction model for aneurysm rupture risk with intracranial length diameter &lt;5 mm

### 3 讨论

目前, 颅内动脉瘤发生发展、危险因素、形态学、破裂机制等在学术界存在不同的见解, 且缺乏经济有效能够预测动脉瘤破裂风险的方法, 研究<sup>[13]</sup>报道小动脉瘤在破裂动脉瘤中占到30%, 近期有研究<sup>[14-16]</sup>认为颅内动脉瘤形态学参数-AR, SR以及入射夹角能够很好的预测动脉瘤破裂, 但多是基于动脉瘤直径(>5 mm)较大的研究, 且是通过静态3D-CTA监测的。4D-CTA能够动态监测动脉瘤一个心动周期形态变化, 目前将其用于颅内长径<5 mm的动脉瘤监测的报道较

少, 更缺乏专门针对未破裂颅内长径<5 mm的动脉瘤风险预测的研究。

本研究回顾性分析236例于我院连续行心电门控4D-CTA检查的颅内长径<5 mm动脉瘤患者的临床资料, 采用单因素和多因素logistic回归分析结果显示出现异常搏动点、AR、SR以及入射夹角均为颅内长径<5 mm的动脉瘤破裂的独立危险因素。文献<sup>[17-18]</sup>报道动脉瘤壁炎症、退变性壁重塑以及非生理状态的血液动力学与动脉瘤破裂密切相关, 而其薄弱处在舒张期会出现局部凸起, 即为异常搏动点, 因此异常搏动点是反映动脉瘤一个心动周期内动脉瘤壁薄弱点的形态学指标, 其会在多种综合作用力下发生破裂, 本研究结果显示破裂组异常搏动点的出现明显要多于未破裂组, 且多因素分析其具有预测颅内长径<5 mm的动脉瘤出现破裂的价值。众所周知, 动脉瘤破裂之处为其最薄弱之处, 动脉瘤破裂后会出现小的血凝块附着, 尽管能够对破裂处形成临时补充, 但与其他部位相比, 仍然薄弱, 随着血液的充盈和舒张, 在此处便会出现异常搏动点, 而对于未形成异常搏动点的破裂动脉瘤可能是因为动脉瘤破裂后, 破裂处的血凝块较大, 或者瘤内形成血栓, 当血凝块对动脉瘤壁破裂处的压力与血液对破裂处的剪切力和压力相当时, 就不会形成异常搏动点。对于未破裂的颅内长径<5 mm的动脉瘤出现异常搏动点, 可能是动脉瘤壁尚未在血流各种动力学作用下形成局部薄弱之处, 一旦出现异常搏动点则预示颅内长径<5 mm的动脉瘤属于高破裂风险的动脉瘤, 需要及时处理。

有研究<sup>[19]</sup>报道破裂组AR值均数在2.7, 而未破裂组为1.8, 且高AR值与动脉瘤破裂呈线性相关。还有学者<sup>[20]</sup>通过构建颅内动脉瘤动物模型研

究发现低AR(<1.8)患者中可见稳定单一涡流, 而高AR(>2.2)可见多发涡流和低壁面切应力区域。本研究结果也显示破裂组和未破裂组AR值分别为 $1.8 \pm 0.3$ 和 $1.3 \pm 0.2$ , 且logistic回归分析结果显示OR=4.389, 95%CI 1.129~18.298, 两组差异具有统计学意义, 且AR是颅内长径<5 mm的动脉瘤破裂的独立危险因素。

SR作为反映颅内动脉瘤大小与周边血管关系的指标, 本研究也显示SR是颅内长径<5 mm的动脉瘤破裂风险的预测指标, 即SR越大, 破裂风险越大, 可能是血管压力相同情况下, 管径越小, 管壁压力就会越大。既往有研究<sup>[21]</sup>发现不同管径血管出现相同大小动脉瘤时, 载瘤管管径越小越容易破裂; 而日本一项前瞻性研究<sup>[22]</sup>结果显示: 直径<5 mm的动脉瘤破裂风险与大小、部位无关, 而与SR呈正相关。

不同入射夹角造成的血流动力学参数变化与动脉瘤生长和破裂密切相关, 有学者<sup>[23]</sup>通过分析颅内动脉瘤破裂危险因素与血流动力学关系, 发现入射夹角是动脉瘤破裂独立危险因素。研究<sup>[24]</sup>表明: 血流动力学模型发现不同的入射夹角的大小直接影响了动脉瘤壁切应力, 同时动脉瘤入射夹角越大更易形成更高的血流动能传达到动脉瘤的顶部, 被认为是导致动脉瘤破裂的血流动力学机制。本研究结果也显示破裂组和未破裂组入射夹角分别为 $124.52^\circ \pm 20.18^\circ$ 和 $94.37^\circ \pm 19.24^\circ$ , 且logistic回归分析结果显示OR=1.067, 95%CI 1.028~1.879, 两组差异具有统计学意义, 且入射夹角是颅内长径<5 mm的动脉瘤破裂的独立危险因素。

数学预测模型可重复、精确且能够排除人为影响, 本研究以logistic回归分析结果构建模型, ROC曲线分析结果显示截断值为0.542时, 模型预测性能较好, 准确率为84.38%, 敏感度为88.76%, 特异度为82.17%, 阳性预测值为92.12%, 阴性预测值为80.28%, 提示当截断值 $\geq 0.542$ 时, 颅内长径<5 mm的动脉瘤患者出现破裂的概率约为92.12%。

综上所述, 出现异常搏动点、高AR、高SR以及高入射夹角均提示颅内长径<5 mm的动脉瘤具有破裂的风险, 4D-CTA作为新的动态检查方法, 在发现未破裂动脉瘤方面具有十分重要的意义。当然, 本研究亦存在一定的不足之处, 譬如单中心数据, 且研究对象为破裂和未破裂动脉瘤患者, 因破裂后形态发生改变, 导致结果可能存在偏倚。下一步笔者将进行大样本、多中心的4D-CTA监测研究。

## 参考文献

1. 糜相明, 范高阳, 苏春海, 等. 中国颅内动脉瘤患者的单中心流行病学研究[J]. 河北医药, 2018, 40(24): 139-142.  
MI Xiangming, FAN Gaoyang, SU Chunhai, et al. Single-center epidemiological study on intracranial aneurysms in China[J]. Hebei Medicine, 2018, 40(24): 139-142.
2. Feng X, Wang L, Guo E, et al. Passive smoking is not associated with risk of intracranial aneurysm rupture in nonsmoking women[J]. World Neurosurg, 2017, 107: 716-723.
3. Kleinloog R, De MN, Verweij BH, et al. Risk factors for intracranial aneurysm rupture: a systematic review[J]. Neurosurgery, 2017, 82(4): 431-440.
4. Juvela S, Korja M. Intracranial aneurysm parameters for predicting a future subarachnoid hemorrhage: a long-term follow-up study[J]. Neurosurgery, 2017, 81(3): 432-440.
5. Hong JH, Bang JS, Jin-Heon C, et al. Protocol based real-time continuous electroencephalography for detecting vasospasm in subarachnoid hemorrhage[J]. J Korean Neurosurg Soc, 2016, 59(2): 154-157.
6. Juvela S, Porras M, Poussa K. Natural history of unruptured intracranial aneurysms: probability of and risk factors for aneurysm rupture[J]. J Neurosurg, 2008, 108(5): 1052-1060.
7. Hayakawa M, Tanaka T, Sadato A, et al. Detection of pulsation in unruptured cerebral aneurysms by ECG-Gated 3D-CT Angiography (4D-CTA) with 320-row area detector CT (ADCT) and follow-up evaluation results: assessment based on heart rate at the time of scanning[J]. Clin Neuroradiol, 2013, 24(2): 145-150.
8. 许涛, 杨子立, 陈闽峰, 等. 基于三维CTA血管拉直的腹主动脉瘤自动定位方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2013, 30(5): 4396-4400.  
XU Tao, YANG Zili, CHEN Minfeng, et al. automatic localization method of abdominal aortic aneurysm based on three-dimensional CTA vascular straightening [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2013, 30(5): 4396-4400.
9. 刘品霓, 李顶夫, 伍晓六, 等. CTA成像技术在主动脉瘤、夹层动脉瘤诊断中的应用[J]. 深圳中西医结合杂志, 2009, 19(4): 227-229.  
LIU Pinni, LI Dingfu, WU Xiaoliu, et al. Application of CTA imaging technology in diagnosis of aortic aneurysm and dissecting aneurysm[J]. Shenzhen Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, 2009, 19(4): 227-229.
10. 杨文英. 重视预防, 规范管理——2007年版《中国2型糖尿病防治指南》[J]. 中华内分泌代谢杂志, 2008, 24(2): 121-122.  
YANG Wenying. Pay Attention to Prevention and Standardize Management-2007 Edition of "Guidelines for Prevention and

- Treatment of Type 2 Diabetes in China"[J]. Chinese Journal of Endocrinology and Metabolism, 2008, 24(2): 121-122.
11. 隋辉, 王文. 《中国高血压基层管理指南》(2014年修订版)要点解读[J]. 临床荟萃, 2015, 30(7): 10-30.  
SUI Hui, WANG Wen. Interpretation of key points of guidelines for primary management of hypertension in China (2014 revision)[J]. Clinical Meta-analysis, 2015, 30(7): 10-30.
  12. Costello JE, Cecava ND, Tucker JE, et al. CT radiation dose: current controversies and dose reduction strategies[J]. Am J Roentgenology, 2013, 201(6): 1283-1290.
  13. Lai HP, Cheng KM, Yu SCH, et al. Size, location, and multiplicity of ruptured intracranial aneurysms in the Hong Kong Chinese population with subarachnoid haemorrhage[J]. Hong Kong Med J, 2009, 15(4): 262-266.
  14. Thinning W, Hayakawa M, Katada K, et al. CT angiography with electrocardiographically gated reconstruction for visualizing pulsation of intracranial aneurysms: identification of aneurysmal protuberance presumably associated[J]. Ajnr Am J Neuroradiol, 2005, 26(6): 1366-1369.
  15. 叶贤旺, 黄求理, 林元为, 等. 颅内动脉瘤心动周期内搏动与破裂相关性的320排CT血管造影研究[J]. 中华神经外科杂志, 2014, 30(1): 46-49.  
YE Xianwang, HUANG Qjuli, LIN Yuanwei, et al. 320-slice CT angiography study on the correlation between pulsation and rupture of intracranial aneurysm in cardiac cycle[J]. Chinese Journal of Neurosurgery, 2014, 30(1): 46-49.
  16. 陈景宇, 孟辉, 朱刚, 等. 鞍区肿瘤术前CT血管成像检查发现颅内未破裂动脉瘤(附6例报告)[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2009, 14(2): 66-67.  
CHEN Jingyu, MENG Hui, ZHU Gang, et al. Preoperative CT angiography of sellar tumors revealed unruptured intracranial aneurysms (with a report of 6 cases)[J]. Chinese Journal of Minimally Invasive Neurosurgery, 2009, 14(2): 66-67.
  17. Cebra J, Ollikainen E, Chung BJ, et al. Flow conditions in the intracranial aneurysm lumen are associated with inflammation and degenerative changes of the aneurysm wall[J]. Am J Neuroradiology, 2016, 38(1): 119-126.
  18. 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]. Am J Neuroradiology, 2013, 35(7): 1254-1262.
  19. Nadersepahi A, Casimiro M, Sen J, et al. Is aspect ratio a reliable predictor of intracranial aneurysm rupture[J]. Neurosurgery, 2004, 54(6): 1343-1347.
  20. Zeng Z, Durka MJ, Kallmes DF, et al. Can aspect ratio be used to categorize intra-aneurysmal hemodynamics—A study of elastase induced aneurysms in rabbit[J]. J Biomech, 2011, 44(16): 2809-2816.
  21. 刘超博, 黄煥斌, 汪锡华, 等. 颅内动脉瘤破裂风险和动脉瘤形态学参数的关系[J]. 中国临床神经外科杂志, 2018, 23(2): 81-84.  
LIU Chaobo, HUANG Huanbin, WANG Xihua, et al. Relationship between intracranial aneurysm rupture risk and aneurysm morphological parameters[J]. Chinese Journal of Clinical Neurosurgery, 2018, 23(2): 81-84.
  22. Kashiwazaki D, Kuroda S. Size ratio can highly predict rupture risk in intracranial small (<5 mm) aneurysms[J]. Stroke, 2013, 44(8): 2169-2173.
  23. Baharoglu MI, Schirmer CM, Hoit DA, et al. Aneurysm inflow-angle as a discriminant for rupture in sidewall cerebral aneurysms: morphometric and computational fluid dynamic analysis[J]. Stroke, 2010, 41(7): 1423-1430.
  24. Fan J, Wang Y, Liu J, et al. Morphological-hemodynamic characteristics of intracranial bifurcation mirror aneurysms[J]. World Neurosurg, 2015, 84(1): 114-120.

**本文引用:** 张雪辉, 左云海, 季涛. 四维CT血管成像在微小动脉瘤破裂风险因素分析中的应用价值[J]. 临床与病理杂志, 2020, 40(5): 1203-1210. doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2020.05.021

**Cite this article as:** ZHANG Xuehui, ZUO Yunhai, JI Tao. Application value of four-dimensional CT angiography in risk factor analysis for rupture of microaneurysms[J]. Journal of Clinical and Pathological Research, 2020, 40(5): 1203-1210. doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2020.05.021