

影像学评估颅内动脉瘤破裂风险的研究进展

周洁, 向波*

重庆医科大学附属永川医院放射科, 重庆

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月15日

摘要

颅内动脉瘤是蛛网膜下腔出血的首要病因, 其破裂致死致残率高, 是临床核心挑战。随着影像技术进步不断上升, 未破裂动脉瘤检出率增加。因此精准识别高危未破裂动脉瘤是当前临床决策的核心挑战。颅内动脉瘤破裂风险的影像学评估正从传统形态学向多维度、定量化、智能化方向深入融合。传统CTA、MRA、DSA等结构成像是形态学评估的基础, 而高分辨率血管壁成像、计算流体动力学、4D血流磁共振等新兴技术, 实现了对动脉瘤壁病理状态和血流动力学的直接可视化与量化评估。在此基础上, 人工智能与影像学组通过整合多模态信息, 展现出构建个体化预测模型的巨大潜力。尽管当前体系面临技术标准不一、研究偏倚及临床转化瓶颈等挑战, 但未来通过建立标准化多中心数据库、推动多模态信息临床整合并拓展新兴评估维度, 有望最终实现精准识别高危动脉瘤, 优化临床决策。

关键词

颅内动脉瘤, 影像学, 破裂风险, 脑血管疾病

Research Progress on Radiology to Assess the Rupture Risk of Intracranial Aneurysms

Jie Zhou, Bo Xiang*

Department of Radiology, The Affiliated Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: April 13, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

Intracranial aneurysms (IAs) are primary cause of subarachnoid hemorrhage (SAH), with high rates of mortality and disability upon rupture, posing a significant clinical burden. Advances in imaging technology have led to a significant increase in the detection of unruptured intracranial aneurysms (UIAs). Consequently, accurately distinguishing high-risk UIAs that require intervention from stable

*通讯作者。

ones has become a central challenge in clinical management. The imaging assessment of IAs rupture risk is evolving from traditional morphological evaluation towards a multi-dimensional, quantitative, and intelligent paradigm. While conventional structural imaging (CTA, MRA and DSA) remains the cornerstone, emerging techniques like high-resolution vessel wall imaging (HR-VWI), computational fluid dynamics (CFD), and 4D flow MRI enable direct visualization and quantification of aneurysm wall pathology and hemodynamic stresses. Building on this, artificial intelligence (AI) and radiomics demonstrate great potential for constructing individualized risk prediction models by integrating these multimodal data. Despite current challenges-including lack of standardization, study biases, and translational hurdles-future efforts focused on establishing standardized multi-center databases, integrating multimodal data into clinical workflows, and exploring novel assessment dimensions are expected to enable precise identification of high-risk aneurysms and optimize clinical decision-making.

Keywords

Intracranial Aneurysm, Radiology, Rupture Risk, Cerebrovascular Disease

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

颅内动脉瘤(intracranial aneurysms, IAs)为发生在颅内动脉管壁上局限性病理性扩张引起的异常膨出,是引起蛛网膜下腔出血(subarachnoid hemorrhage, SAH)的首要病因[1] [2]。在脑血管意外中,仅次于脑血栓和高血压脑出血,位居第三。IAs 在全球的发病率为 3%~5%,在中国为 7%,在高危人群中超过 19%,IAs 破裂的风险为 0.7%~1.9%,每年的破裂率为 1.4%,5 年破裂风险为 3.4%,IAs 导致的 SAH 有很高的发病率和死亡率[3] [4]。随着脑健康筛查的普及和高分辨率磁共振血管壁成像(high-resolution vessel wall imaging, HR-VWI)、CT 血管成像(computed tomography angiography, CTA)等影像技术的应用,未破裂颅内动脉瘤的检出率显著提高[3],超一半的患者由于及时发现治疗,终身未发生破裂[5]。尽管未破裂颅内动脉瘤的年破裂风险低,但一旦发生破裂,其致死率、致残率高,并且大多数患者仍遗留明显的神经功能障碍,这给家庭和社会造成了沉重的负担[3] [4],严重影响了患者的生活质量。因此,如何在海量检出的未破裂动脉瘤中,精准识别出具有高破裂风险的个体,避免不必要的干预及相关的治疗风险,同时不错过对真正高危动脉瘤的治疗时机,成为神经外科、神经介入及影像科医生面临的核心临床挑战[3] [4]。本综述旨在系统梳理和总结近年来多模态影像学在评估颅内动脉瘤破裂风险中的最新研究进展。包括传统形态学参数的深化应用、基于血流动力学和血管壁成像的机制探索,以及人工智能整合多模态信息的未来方向,以期明确当前技术的效能、局限性与发展趋势,为临床精准决策与未来研究提供参考。

2. 颅内动脉瘤的影像学检查方法

常规结构成像包括 CTA、磁共振血管成像(magnetic resonance angiography, MRA)、数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA),是基础和最广泛应用于评估颅内动脉瘤的方法,其中 CTA 和 MRA 是主要的无创筛查和诊断工具[3],而 DSA 则是诊断的“金标准”[6]。CTA 是目前临床上诊断和筛查颅内动脉瘤的一线无创检查方法。它通过静脉注射碘对比剂,利用螺旋 CT 快速薄层扫描,并进行三维重建,可清晰显示颅内血管及其病变[7]。其优势在于检查时间短,普适性高,支持多种三维重建图像后

处理技术,如容积再现、最大密度投影、多平面重建等,便于从任意角度观察动脉瘤形态[8]。MRA是一种无辐射、无创的血管成像技术,尤其适用于筛查和随访。临床上常规使用的三维时间飞跃法 MRA (three-dimensional time-of-flight, 3D-TOF)无需注射对比剂,利用流动血液的流入增强效应成像[9],具有较高敏感性和准确性,但其依赖于血流状态,血流湍流或低血流时成像效果可能减弱。对比增强 MRA (contrast-enhanced MRA, CE-MRA)注射钆对比剂,可提高血管信噪比和空间分辨率,对大血管和血流缓慢区域显示更佳。DSA 通过股动脉穿刺置管,将导管选择性地插入颈内动脉或椎动脉,注射对比剂的同时进行快速 X 线摄影,并通过“减影”技术去除骨骼和软组织影像,获得纯血管图像。3D 旋转 DSA 可提供三维立体图像[10]。其优势在于能最清晰地显示动脉瘤的形态、瘤颈、与穿支血管的关系,观察血流动力学情况,可实现诊疗一体化,诊断的同时可立即进行血管内介入治疗,是制定介入或手术治疗方案的最终依据。其局限性在于有创性、有辐射,主要用于确诊和术前评估,不适用于常规筛查。

功能性与血流动力学成像包括 HR-VWI、计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)、4D 血流磁共振成像(4D Flow MRI),超越了传统管腔结构,直接或间接评估了动脉瘤壁和作用于动脉瘤壁的血流动力学,是高级风险分层的关键。HR-VWI 采用高场强、小视野、薄层、黑血等技术,抑制血流信号,突出显示血管壁结构,注射钆对比剂后可识别壁间血肿或血栓,评估动脉瘤壁强化,辅助判断动脉瘤的“活动性”[11][12]。4D Flow MRI 是一种新兴的磁共振技术,可以在三维空间内随心脏周期量化血流速度,无需建模即可提供血流方向、速度等参数的可视化数据,是研究动脉瘤血流动力学的重要无创工具[13]。CFD 并非直接的影像检查,而是一种基于 CTA 或 MRA 的高级仿真分析技术[14]。通过计算机数值模拟,重建动脉瘤内的血流状态,计算人眼无法直接观测的关键血流动力学参数,如壁面剪切力、振荡剪切指数、相对滞留时间等[9]。

颅内动脉瘤的影像学检查旨在实现两大核心目标:精确诊断和风险评估。随着技术的发展,检查方法已从单纯的血管形态学评估,扩展到动脉瘤壁、血流动力学及生物学特性的多参数、多模态的综合分析[15]。

3. 影像学评估颅内动脉破裂风险的研究进展

3.1. 常规影像学评估颅内动脉瘤破裂风险

颅内动脉瘤的形态学定量评估是破裂风险评估的基石,其参数体系已从基础的“一维尺寸”发展为涵盖“二维复合比”和“三维空间参数”的多维系统[16]。在基础二维测量方面,动脉瘤大小(最大径)是最早被确认的风险因素,大型队列研究证实其为关键预测因子[3]。但其局限性在于无法解释小型动脉瘤(如 ≤ 5 mm)同样存在破裂风险,而一些较大动脉瘤却能长期保持稳定的“动脉瘤悖论”现象[4][6]。在复合形态比值方面,纵横比(aspect ratio, AR)和尺寸比(size ratio, SR)因能更好反映动脉瘤体与载瘤动脉的几何关系,被广泛认为是比单纯动脉瘤最大径更具鉴别效能的预测指标[17][18]。程箫等[18]利用 LASSO 回归筛选变量,发现 AR 值和 SR 值是颅内小动脉瘤破裂的独立危险因素。熊付伟等[7]的研究进一步证实,基于 CTA 和 MRA,瘤最大径、AR、瘤颈宽度与载瘤血管横截面直径比均是动脉瘤破裂的独立影响因素。动脉瘤形态不规则、存在子囊也被多项研究证实是破裂的高危因素[19]-[21]。刘亚飞等[20]提出修正后 c-SR 的概念,指出动脉瘤破裂后载瘤动脉痉挛可能使术前测量的 SR 值失真,术后测量的 c-SR 值更能反映破裂前的真实状态,这提示了在回顾性研究中需谨慎解读形态学数据。在三维空间参数方面,随着三维重建技术普及,研究开始量化动脉瘤体积、表面积、最大截面积等复杂几何特征[21]。然而,测量的标准化与可重复性是核心挑战。Attil Saemann 等[22]发现,使用 3D VR 进行测量的评估者间信度显著高于传统 2D/3D DSA,为更精准、可重复的形态评估提供了方法,也揭示了测量方法主观变异大的问题。在风险预测模型构建方面,研究者们尝试整合多个形态学指标及临床因素。程箫等[18]利用 LASSO-

logistic 回归构建的预测模型, 纳入了后循环区动脉瘤、AR 值、动脉瘤角度及子囊存在等独立风险因素。林锦川等[23]结合 CTA 形态学参数(动脉瘤形态、长宽比、面积比)和血清生物标志物(miR-301a)构建了列线图预测模型。综上所述, 基于 CTA、MRA、DSA 的形态学评估体系已较为成熟, 衍生参数(如 AR、SR)提供了比单一参数更优的预测效能。然而, 该领域仍面临显著局限: 1) 测量缺乏标准化, 不同中心、不同评估者间的测量结果存在差异, 影响结论的可比性[22]; 2) 回顾性研究的固有偏倚, 如破裂后血管形态改变可能影响参数的准确性[20]; 3) 形态学参数多为静态指标, 难以完全反映动脉瘤在血流冲击下的动态力学行为及其生物学演进过程。

3.2. 高分辨率血管壁成像评估颅内动脉瘤破裂风险

高分辨率血管壁成像超越传统仅评估动脉瘤“管腔”形态的局限, 实现对动脉瘤“管壁”本身病理生理状态的可视化与定量评估。传统影像学指标的局限性在于其间接性, 而血管壁特征被认为是驱动动脉瘤发生、进展和破裂的直接生物学基础, 如炎症、新生血管、血栓、纤维帽等。目前对血管壁特征的影像学界定, 已形成了以高分辨率磁共振血管壁成像为代表的先进成像技术视角, 重点关注动脉瘤壁强化、壁面强化模式及动脉瘤壁搏动等维度[24]。在血管壁成像方面, 血管壁生物学状态的直接成像评估主要依托 HR-VWI, HR-VWI 利用延迟扫描技术, 使钆对比剂在动脉瘤壁内富含新生血管和炎症细胞的区域滞留, 从而在 T1 加权像上呈现动脉瘤壁强化(aneurysm wall enhancement, AWE) [11] [12]。AWE 反映了动脉瘤壁的炎症细胞浸润、新生血管形成等不稳定病理改变, 结合定量强化比值分析, 能够无创、直接、客观地评估动脉瘤壁的炎症和病理状态[13]。叶庆跃等[25]的研究对比了 HR-VWI 与 CTA, 发现 HR-VWI 预测破裂风险的灵敏度、特异性等优于 CTA。然而, AWE 的临床判读标准尚未统一, 其定性(有无、模式)和半定量(强化率)评估并存, 缺乏公认的、用于指导临床干预决策的量化阈值[19], 这限制了其作为独立决策依据的普适性。

3.3. 血流动力学评估颅内动脉瘤破裂风险

在血流动力学研究方面, CFD 通过求解血流控制方程, 在患者特异性三维血管模型上模拟和量化动脉瘤内的血流环境, 其核心是评估血流对血管壁产生的力学作用[26] [27]。CFD 分析能够提供常规影像无法直接获得的血流速度、压力、壁面剪切力等参数的空间与时间分布, 从而从生物力学角度理解动脉瘤的生长、重塑和潜在破裂机制[28] [29]。研究表明, CFD 模拟被广泛应用于量化动脉瘤内的血流环境, 关键参数包括壁面剪切力、振荡剪切指数、相对滞留时间等[30]-[40], 不稳定的血流模式、子囊对局部血流的不良影响与破裂风险相关。Bozorgpour 等[14]通过分析已知转归的动脉瘤案例, 发现最终破裂的动脉瘤表现出低时间平均壁面剪切力、高振荡剪切指数的血流动力学特征。Li Song 等[27]和 Zhiqiang Cai 等[31]的研究均指出, 子囊区域会出现壁面剪切力降低、振荡剪切指数(OSI)升高的不良血流模式, 增加了局部破裂风险。姬若诗等[40]发现, 合并动脉粥样硬化的动脉瘤, 其 OSI 增高, 而时间平均壁面剪切力降低, 这些改变与破裂风险增加相关。血流动力学分析本身也受到多种复杂因素影响, 包括模拟保真度、血液粘度、心率、载瘤动脉的几何复杂性[41]等。Jana Korte 等[30]的研究指出, 高保真度的直接数值模拟才能捕捉到与破裂风险相关的高频血流波动。除了基于影像重建的 CFD, 4D Flow MRI 等技术能够无创、直接地测量体内的三维时间分辨血流速度场。4D-CTA 能够评估动脉瘤在心动周期中的动态不规则搏动。存在不规则搏动的动脉瘤, 其大小、OSI 和相对滞留时间在心动周期内的变化更显著[13], 提示其内部血流动力学更不稳定。动脉瘤的稳定性不仅取决于其自身形态, 也受与载瘤动脉及邻近血管解剖关系的影响。上游血管的复杂几何形态会显著影响动脉瘤内的血流模拟结果, 忽略这些因素可能导致 CFD 分析不准确[31]。这意味着, 完整的形态学评估应超越动脉瘤本身, 需考虑其所在的局部血管树结构。然而, 目

前专门针对“动脉瘤-载瘤血管复合体”的标准化评估方案仍较为缺乏。综上所述, CFD及新型血流成像技术为理解动脉瘤破裂机制提供了强大工具, 但其临床转化面临挑战, 包括技术复杂性高、分析流程和结果判读缺乏统一标准、成本较高等[15]。例如: 缺乏前瞻性验证: 多数研究为回顾性病例对照设计, 需要大规模前瞻性队列研究来验证特定血流动力学参数的预测价值[28]。技术复杂性与标准化不足: CFD模拟的结果受边界条件设置、血液本构模型选择、网格划分等多种因素影响, 缺乏统一的操作规范[30]。未来的前景在于简化工作流程、推动技术标准化, 并开展多中心合作, 将其转化为可辅助临床决策的量化工具。

3.4. 影像组学评估颅内动脉瘤破裂风险

针对如何高效、客观地整合前述多维度形态、血流及临床信息, 并实现个体化精准预测, 人工智能与影像组学提供了革命性的技术路径[42]-[46]。影像组学通过从医学图像中高容量提取大量人眼难以识别的能够量化颅内动脉瘤异质性与结构复杂性的定量特征(如纹理、形状、小波特征), 用于构建机器学习预测模型[43][44]。这些特征的维度划分在以下几个方面: 从特征来源来看, 研究主要基于CTA、MRA或DSA图像提取特征。Sohrabi-Ashlaghi等[43]的一项涵盖4408名患者的Meta分析显示, 基于CTA的影像组学模型区分破裂与未破裂IAs的合并AUC达到0.86, 证明了其良好的诊断性能。从特征类别来看, 这些特征可划分为一阶统计特征(描述体素强度分布)、形状特征、纹理特征(描述体素空间关系)及高阶滤波特征等[45][46]。例如, 胡小龙等[46]的研究从动脉瘤影像中提取了伸长率、球形度、表面积体积比等形态学特征, 并利用LASSO回归筛选出6个最优特征用于建模。从融合导向来看, 当前的研究趋势是将影像组学特征与临床特征、形态学参数或血流动力学参数相结合, 构建多模态预测模型[47][48]。例如, 王琦璠等[44]将CTA形态学参数与临床因子、血液炎症指标结合进行分析; Hai Jin等[47]开发的多模态框架则整合了临床变量、影像组学纹理特征和深度学习衍生的形态学数据, 取得了优异的预测性能(AUC=0.896), 超越单一模态模型。对影像组学模型预测效能的影响因素研究, 主要集中于图像质量、特征选择方法、建模算法三大层面。图像质量层面, 去噪与图像增强技术是关键[47]。特征选择层面, 降维与筛选策略至关重要。由于提取的特征数量庞大(常超过1000个), 必须采用LASSO回归、最大相关最小冗余等算法筛选出最具预测力的特征子集, 以防止过拟合[46]。建模算法层面, 机器学习分类器的选择直接影响结果。当前研究尝试了支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、逻辑回归(LR)等多种算法[47][49]。例如, 在Ruixuan Zhang等[49]的Meta分析中, 基于AI算法预测IAs破裂风险的合并敏感性和特异性分别达到0.84和0.82, 汇总AUC为0.90。综上所述, 尽管影像组学模型展现出巨大潜力, 但其可解释性、跨中心泛化能力以及高质量公开数据集的缺乏, 仍是当前面临的主要挑战[48]。

3.5. 人工智能评估颅内动脉瘤破裂风险

人工智能(artificial intelligence, AI), 特别是深度学习(deep learning, DL), 是影像组学的自然延伸与升级。它能够自动从原始图像中学习分层特征, 完成从动脉瘤分割、特征提取到风险分类的端到端预测[50]。在深度学习与自动化方面, 颅内动脉瘤破裂风险评估研究侧重于开发全流程自动化的高精度预测框架, 并形成两条主要技术路径: 1) 基于深度学习的自动分割与形态分析路径, 利用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)等模型自动、精准地分割动脉瘤和载瘤血管, 并直接计算复杂的形态学参数[10][50]。2) 基于多模态数据融合的预测建模路径, 整合了影像、临床变量、血流动力学参数等多源异构数据。Muhammad Mohsin Khan等[42]的综述指出, 将AI与CFD模拟的患者特异性血流动力学数据相结合, 能够实现超越传统尺寸方法的、更全面的风险评估。研究表明, AI模型在风险预测中表现出高诊断准确性。Daniel H. Sahlein等[50]探讨了AI驱动的动脉瘤容积分析在临床管理中的应用价值。M. Rezaeitalshmahalleh

等[51]利用时间速度信息学方法分析 CFD 模拟得到的时序速度场, 结合机器学习, 对动脉瘤破裂状态的预测 AUC 高达 0.92。这些研究表明 AI 在整合多源信息和发掘深层模式方面具有巨大潜力。然而, 该领域在迈向临床广泛应用的道路上仍面临显著挑战。Muhammad Mohsin Khan [42]和胡斌[45]等均指出, AI 模型的“黑箱”特性导致的可解释性不足、在不同中心和数据上的泛化能力, 以及训练所需大规模高质量、标准化标注数据的匮乏, 是当前主要瓶颈。未来的研究需要构建多中心前瞻性数据库, 并致力于开发可解释性强、能够无缝整合到现有临床 workflows 中的 AI 辅助决策系统[42] [45], 为每位患者提供真正的个体化风险评分和治疗建议。

4. 讨论

在颅内动脉瘤破裂风险的评估中, 形态学、血流动力学和血管壁生物学特征并非独立存在, 而是同一疾病过程在不同维度的体现。PHASES、ELAPSS 等传统的风险评估模型虽然纳入了部分形态学和临床参数, 但其评分逻辑本质上是线性和叠加的, 未能充分揭示各模态参数之间复杂的相互作用及背后的统一病理生理机制。近年来, 随着多模态影像技术的进步, 研究者得以在同一批患者中同时获取多种类型的数据, 为深入探讨“形态 - 血流 - 血管壁”之间的动态关联并构建综合性评估框架提供了可能。

动脉瘤的几何构型是决定其内部血流环境的基础, 其几何构型决定血流动力学, 力学又重塑几何。不规则的形态特征, 特别是子囊的存在, 会诱发壁面剪切力降低、振荡剪切指数升高及血流滞留等不利的血流模式[27] [31]。高纵横比与尺寸比意味着动脉瘤体相对于载瘤动脉更为突出, 通过改变血流入射角与能量, 同样易导致瘤顶出现高速冲击射流与复杂涡流和滞留区, 形成低剪切、高振荡的血流特征, 这与最终破裂动脉瘤的血流特征一致[11] [14]。这种紊乱的血流环境可损伤内皮功能, 促进炎症细胞浸润和基质金属蛋白酶表达, 从而削弱局部瘤壁结构[14]。同时, 过低的时间平均壁面剪切力与过高的振荡剪切指数构成的异常力学环境, 是驱动动脉瘤壁炎症反应与退行性变的关键因素[28]。此环境激活内皮细胞, 促进促炎因子表达, 吸引巨噬细胞等炎症细胞浸润, 并抑制平滑肌细胞的修复功能, 这正是 HR-VWI 上所观察到的动脉瘤壁强化现象的病理基础[12]。此外, 动脉瘤的血流动力学不仅由其自身形态决定, 也受载瘤动脉及整个 Willis 环几何结构的显著影响, 脱离血管树背景的孤立动脉瘤血流分析可能产生偏差[41]。而瘤壁不规则搏动导致的血流动力学的瞬时波动与不稳定性, 可能加剧壁面结构的疲劳损伤, 与局部变薄、子囊形成及破裂风险密切相关[27]。

三者关系呈现协同性与异质性并存的特点。高危动脉瘤常表现出多模态风险的聚集, 即高危形态、有害血流模式与活动性管壁炎症共存[19]。然而, 并非所有形态不规则的动脉瘤均会破裂, 也并非所有破裂动脉瘤都具有典型的高危形态。这揭示了重要的个体异质性, 可能存在其他调节因素, 如受遗传、基础疾病、动脉粥样硬化等影响的个体血管壁的生物学耐受性差异, 可能导致对相同力学刺激的不同强度的炎症或修复反应[40]。动脉瘤本身是一个动态演变的病变, 例如, 子囊形成初期壁相对较厚、炎症活跃但尚未破裂, 而长期稳定的子囊可能已纤维化。因此, 单次静态影像评估可能无法完全捕获病变的活动状态, 连续随访以观察形态、血流或壁强化变化可能提供更动态的风险信息[13]。动脉瘤破裂常发生在子囊顶端等特定位置, 因此, 多模态信息的空间关联融合可以将低剪切力区域与局灶性强化的位置进行叠加, 有望实现比整体参数更精准的薄弱点定位[9]。

5. 小结与展望

颅内动脉瘤破裂风险的影像学评估正朝着多维度、量化、智能化的方向深度融合[7]。传统形态学、先进血流动力学、血管壁生物学成像以及 AI 预测模型相互补充, 共同构建更全面的评估体系。通过对文献的系统梳理, 当前体系仍存在核心挑战: 1) 技术与标准不统一: 测量、模拟、判读缺乏规范; 2) 研究

设计偏倚：多为回顾性单中心研究；3) 临床整合与转化瓶颈：如何将复杂多维信息转化为简洁的临床决策工具。基于当前研究现状与遗留的空白点，未来研究可从三方面深入：1) 着力推动多中心、前瞻性、标准化数据库的建立，为验证形态、血流、生物学标志物的预测效能及 AI 模型的泛化能力提供高质量循证依据；2) 加强多模态信息的临床可操作化整合，开发简洁、可解释的决策支持工具或分层路径，以解决临床转化的难题；3) 拓展新兴评估维度，如结合流体-结构耦合分析、分子影像或多组学信息，更全面地评估动脉瘤的力学与生物学稳定性[52]。

展望未来，建立标准化、多中心、包含完整临床随访和干预结局的颅内动脉瘤影像数据库，将极大地促进可重复、可比较的研究，加速可靠算法的开发和临床转化。例如，能否构建一个融合了关键形态学特征、不良血流动力学模式以及反映壁炎症的血管壁生物学标志的“形态-血流-血管壁”多维综合评分系统，其预测破裂风险的效能将优于目前临床广泛使用的、主要基于形态和临床特征的评分系统，实现对破裂风险更精准的个体化预测。为验证这一假设，可遵循以下路径构建与验证该评分系统：首先，需依托标准化的多中心前瞻性队列，利用人工智能工具自动化提取可重复的形态学与血流动力学参数，并建立血管壁强化的定量/半定量评估标准，形成标准化的多模态特征集。其次，采用 LASSO 回归、随机森林等先进的机器学习算法对该特征集进行筛选、加权与整合，开发出综合风险预测模型，并输出易于临床理解的个体化风险评分。最后，必须在独立的外部队列中对模型进行严格验证，评估其区分度、校准度及临床实用性。更重要的是，未来需要通过前瞻性干预研究，验证基于此评分界定的高危动脉瘤进行预防性干预，能否真正改善患者结局，从而完成从预测模型到临床决策支持工具的最终转化。综上所述，该假设是一项多层次系统工程，需要数据、技术、人才、平台和临床实践的全面支撑与深度融合。

参考文献

- [1] Lawton, M.T. and Vates, G.E. (2017) Subarachnoid Hemorrhage. *New England Journal of Medicine*, **377**, 257-266. <https://doi.org/10.1056/nejmcp1605827>
- [2] Claassen, J. and Park, S. (2022) Spontaneous Subarachnoid Haemorrhage. *The Lancet*, **400**, 846-862. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(22\)00938-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(22)00938-2)
- [3] Ishikawa, T. (2026) Detection and Treatment of Unruptured Intracranial Aneurysms. *Brain and Nerve*, **78**, 211-216.
- [4] Frączek, M.J., Krzyżewski, R.M., Kliś, K.M., Kwinta, B.M., Popiela, T.J. and Stachura, K. (2024) Unruptured Intracranial Aneurysms: Why Should We Focus on Small Aneurysms? A Comprehensive Update of Recent Findings. *Polish Journal of Radiology*, **89**, e13-e23. <https://doi.org/10.5114/pjr.2024.134424>
- [5] Wang, X., Feletti, A., Tanaka, R., Yamada, Y., Suyama, D., Kawase, T., et al. (2018) Adenosine-Induced Flow Arrest to Facilitate Intracranial Complex Aneurysm Clip Ligation: Review of the Literature. *Asian Journal of Neurosurgery*, **13**, 539-545. https://doi.org/10.4103/ajns.ajns_207_16
- [6] 盛爱珠, 叶亦斋, 王碧华. 头颅 CT 血管造影在诊断颅内动脉瘤及评估破裂风险中的价值[J]. 心电与循环, 2024, 43(5): 475-478+482.
- [7] 熊付伟, 牛亚琦, 张雪瑞. CTA 和 MRI 血管成像在颅内动脉瘤破裂风险评估中的应用[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2026, 24(1): 10-13.
- [8] Chen, Y., Wu, J., Yuan, W., Mai, W. and Li, H. (2024) The Rupture Risk of Intracranial Saccular Aneurysm: A Case-Control Study Based on a Three-Dimensional Computed Tomography Angiography Model. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 3339-3349. <https://doi.org/10.21037/qims-23-1694>
- [9] Ali, S., Chen, Z., Wu, T., Huang, W. and Shih, T. (2025) Localized Hemodynamic Assessment and Rupture Risk Evaluation of Intracranial Aneurysms Using the TESLA Framework via Computational Fluid Dynamics. *Medical Physics*, **52**, e18071. <https://doi.org/10.1002/mp.18071>
- [10] Choi, J.H., Sobisch, J., Kim, M., Park, J.C., Ahn, J.S., Kwun, B.D., et al. (2025) Prediction of Intracranial Aneurysm Rupture from Computed Tomography Angiography Using an Automated Artificial Intelligence Framework. *Computers in Biology and Medicine*, **197**, Article ID: 110965. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.110965>
- [11] 黄采晗, 李琪, 文利, 张冬. ELAPSS 评分分层未破裂颅内动脉瘤的影像学特征分析: 对风险预测与临床干预的启示[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2025, 31(6): 785-791.

- [12] Leon-Rojas, J.E. (2025) Beyond Size: Advanced MRI Breakthroughs in Predicting Intracranial Aneurysm Rupture Risk. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article No. 3158. <https://doi.org/10.3390/jcm14093158>
- [13] Chen, S., Zhang, W., Cheng, Y., Wang, G. and Lv, N. (2024) Quantification of Morpho-Hemodynamic Changes in Unruptured Intracranial Aneurysms with Irregular Pulsation during the Cardiac Cycle Using 4D-CTA. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article ID: 1436086. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1436086>
- [14] Bozorgpour, R. (2026) Hemodynamic Markers: CFD-Based Prediction of Cerebral Aneurysm Rupture Risk. *Vascular Pharmacology*, **162**, Article ID: 107578. <https://doi.org/10.1016/j.vph.2025.107578>
- [15] Veeturi, S.S., Hall, S., Fujimura, S., Mossa-Basha, M., Sagues, E., Samaniego, E.A., et al. (2024) Imaging of Intracranial Aneurysms: A Review of Standard and Advanced Imaging Techniques. *Translational Stroke Research*, **16**, 1016-1027. <https://doi.org/10.1007/s12975-024-01261-w>
- [16] Zhu, C.Y., Liu, R.H., Ye, Y.F., et al. (2023) Review Article Imaging Evaluation for the Size of Saccular Intracranial Aneurysm. *World Neurosurgery*, **183**, 172-179.
- [17] Abdelghafar, A., Kee, T.P., Hendriks, E.J., Andrade, H. and Krings, T. (2025) Comparison between Ruptured Anterior Choroidal Artery Aneurysms and Ruptured Intracranial Aneurysms in Other Locations in Relation to Aneurysm Dimensions at Rupture. *Acta Neurochirurgica*, **167**, Article No. 12. <https://doi.org/10.1007/s00701-025-06425-7>
- [18] 程箫, 刘亚辉, 冉雅菲. 基于 CT 血管造影参数的 LASSO-Logistic 回归模型对颅内小动脉瘤破裂风险的预测价值[J]. 实用医技杂志, 2026, 33(1): 12-16+84.
- [19] 王珂璠, 李裕国, 顾长青, 等. 颅内动脉瘤破裂风险因素预测颅内动脉瘤破裂风险因素预测: 基于 CT 血管成像形态学联合临床因子和血液炎症指标[J]. 分子影像学杂志, 2025, 48(4): 412-418.
- [20] 刘亚飞, 陈为军, 许洋, 等. 修正后-大小比(c-SR)值对颅脑动脉瘤破裂风险研究价值[J]. 实用放射学杂志, 2025, 41(3): 381-384.
- [21] Cui, X., Zhao, Y., Wang, L., Jin, Y., Yang, Z., Li, Y., et al. (2025) Prevalence, Geometry, and Hemodynamics of Small and Medium-Sized Intracranial Aneurysms with and without Blebs in the Chinese Han Population. *Journal of Central Nervous System Disease*, **17**. <https://doi.org/10.1177/11795735251364919>
- [22] Saemann, A., de Wilde, D., Rychen, J., Roethlisberger, M., Żelechowski, M., Faludi, B., et al. (2024) Assessment of Interrater Reliability and Accuracy of Cerebral Aneurysm Morphometry Using 3D Virtual Reality, 2D Digital Subtraction Angiography, and 3D Reconstruction: A Randomized Comparative Study. *Brain Sciences*, **14**, Article No. 968. <https://doi.org/10.3390/brainsci14100968>
- [23] 林锦川. 基于 CTA 形态学及 miR-301a 的颅内动脉瘤破裂风险预测模型的构建与验证[J]. 中国处方药, 2025, 23(5): 100-104.
- [24] 周照凯, 覃川, 雷科, 阎婷, 张彪. 高分辨率 MRI 在颅内动脉瘤破裂风险评估中的应用[J]. 中国临床神经外科杂志, 2025, 30(5): 303-307.
- [25] 叶庆跃, 洪晓平. 3.0T HR-MR-VWI 与 CTA 对颅内动脉瘤破裂风险评估对比分析[J]. 现代医用影像学, 2025, 34(9): 1596-1599.
- [26] Hoque, K.E., Billah, M.M., Alam, M.S. and Noor, R.E. (2026) Role of Wall Shear Hemodynamic Characteristics in Determining Cerebral Aneurysms Severity: A Stroke-Related Study. *Results in Engineering*, **29**, Article ID: 109596. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109596>
- [27] Song, L., Du, P. and Bao, E. (2026) Influence of Bleb Formation on Intracranial Aneurysm Hemodynamics: A Patient-Specific CFD Study. *Chinese Journal of Physics*, **99**, 412-425. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2025.12.011>
- [28] Khan, M.M., Shah, N. and Chaurasia, B. (2025) Integrating Laplace's Law with Patient-Specific Hemodynamics to Predict Rupture Risk in Unruptured Intracranial Aneurysms: A Systematic Review of a Biophysical and Computational Framework. *Surgery in Practice and Science*, **23**, Article ID: 100318. <https://doi.org/10.1016/j.sipas.2025.100318>
- [29] Singh, D., Usmani, A.Y. and Upadhyay, R.K. (2025) Hemodynamic Characteristics and Drug Deposition in Cerebral Aneurysm Sac. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 41657. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25588-y>
- [30] Korte, J., Abdelsamie, A., El-Khader, B.A.D., Shirdade, N., Church, E.W., Brindise, M.C., et al. (2025) Resolving High Frequency Fluctuations in Cerebral Aneurysm Hemodynamics: The Critical Role of High-Fidelity Simulations and Heart Rate Effects. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **276**, Article ID: 109219. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2025.109219>
- [31] Cai, Z. and Wei, W. (2025) Computational Analysis of Bleb-Induced Hemodynamic Disturbances in Cerebral Aneurysms. *Chinese Journal of Physics*, **98**, 834-849. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2025.10.028>
- [32] Harikrishnan, G., Akhil, V.M., Vikas, R. and Tawk, C. (2025) Effects of Blood Hematocrit on Cerebral Aneurysm Flow Dynamics and Rupture Risk Assessment: A Computational Study Based on Modified Carreau-Yasuda Model. *Results in Engineering*, **27**, Article ID: 106026. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106026>

- [33] Ali, R., Hassan, H.I., Sharma, A., Dhawan, A., Sharma, P., Taher, W.M., *et al.* (2025) Efficiency of Endovascular Coiling on the Evolution of MCA Cerebral Aneurysm by Hemodynamic Analysis: Computational Study. *International Journal of Modern Physics C*, **37**, Article ID: 2550065. <https://doi.org/10.1142/s0129183125500652>
- [34] Song, M., Wang, S., Qian, Q., Zhou, Y., Luo, Y. and Gong, X. (2024) Intracranial Aneurysm CTA Images and 3D Models Dataset with Clinical Morphological and Hemodynamic Data. *Scientific Data*, **11**, Article No. 1213. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04056-8>
- [35] Wu, J., Zhang, B. and Cui, S. (2024) Impact of Blood Viscosity on Hemodynamics of Large Intracranial Aneurysms. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, **246**, Article ID: 108543. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2024.108543>
- [36] Shiryanpoor, I., Kheiri, A., Gerdroodbary, M.B., Valipour, P. and Moradi, R. (2024) Using Computational Fluid Dynamic for Evaluation of Rupture Risk of Micro Cerebral Aneurysms in the Growth Process: Hemodynamic Analysis. *International Journal of Modern Physics C*, **36**, Article ID: 2450184. <https://doi.org/10.1142/s0129183124501845>
- [37] Moghaddam, E.A., Rassoli, A., Darvish, H. and Fatouraee, N. (2024) Assessing the Influence of Aneurysm Dimensions on Hemodynamic Patterns and Wall Deformation Dynamics for Predicting Rupture Risk. *Results in Engineering*, **22**, Article ID: 102145. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102145>
- [38] Huo, H. and Chang, Y. (2024) Hemodynamic Study of the ICA Aneurysm Evolution to Attain the Cerebral Aneurysm Rupture Risk. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 8984. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59242-w>
- [39] Raheem, A.F., Farqad, R.O., Aminian, S., Dabis, H.K., Ghane, G., Hassanvand, A., *et al.* (2024) Hemodynamic Effects of the Blood Flow on Aneurysm Rupture Risk: Geometrical Aspects. *International Journal of Modern Physics C*, **35**, Article ID: 2450080. <https://doi.org/10.1142/s0129183124500803>
- [40] 姬若诗, 闫春春, 刘三春, 邹璇, 姚佳, 徐加利. 动脉粥样硬化合并颅内动脉瘤患者的血流动力学特征及其与蛛网膜下腔出血风险的相关性[J]. 分子影像学杂志, 2025, 48(10): 1198-1204.
- [41] Gaidzik, F., Korte, J., Saalfeld, S., Janiga, G. and Berg, P. (2024) Image-Based Hemodynamic Simulations for Intracranial Aneurysms: The Impact of Complex Vasculature. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **19**, 687-697. <https://doi.org/10.1007/s11548-023-03045-3>
- [42] Khan, M.M., Shah, N., Iqbal, J., El-Ghandour, N.M.F., Vukic, M., Lawton, M., *et al.* (2025) Evaluating Artificial Intelligence Models for Rupture Risk Prediction in Unruptured Intracranial Aneurysms: A Focus on Vessel Geometry and Hemodynamic Insights. *Neurosurgical Review*, **48**, Article No. 539. <https://doi.org/10.1007/s10143-025-03689-6>
- [43] Sohrabi-Ashlaghi, A., Azizi, N., Abbastabar, H., *et al.* (2024) Accuracy of Radiomics-Based Models in Distinguishing between Ruptured and Unruptured Intracranial Aneurysms: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Journal of Radiology*, **181**, Article ID: 111739. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2024.111739>
- [44] 王珂璠, 陈艾琪, 谭诗琪, 杜小萌, 李想, 马宣传. 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.
- [45] 胡斌, 张龙江. 提升人工智能技术在颅内动脉瘤的研究和应用水平[J]. 中国医学影像技术, 2025, 41(1): 6-8.
- [46] 胡小龙, 邓朋, 唐晓宇, 马冕, 钱锦宏, 吴刚, 成之奇, 龚宇琿, 吴建东, 丁志良. 基于临床-影像组学特征的机器学习模型预测颅内动脉瘤的破裂风险[J]. 中国临床神经外科杂志, 2023, 28(9): 549-553.
- [47] Jin, H., Chen, L., Zhu, T., Chu, G., Ma, L., Liang, G., *et al.* (2025) Predicting Intracranial Aneurysm Rupture Risk and Intervention Outcomes Using Denoising-Enhanced CT Angiography. *American Journal of Neuroradiology*, **47**, 1250-1258. <https://doi.org/10.3174/ajnr.a9093>
- [48] 杨秋子, 毛星刚, 孙季冬, 罗鹏. 基于血流动力学的颅内动脉瘤破裂风险预测研究进展[J]. 中国脑血管病杂志, 2024, 21(4): 265-271.
- [49] Zhang, R., Liu, R., Ma, H., Chu, G., Chen, L., Liang, G., *et al.* (2026) The Accuracy in Rupture Risk Prediction of Intracranial Aneurysms by Artificial Intelligence Algorithms Using Imaging Data from CTA and DSA: A Systematic Review and Meta-Analysis. *IET Systems Biology*, **20**, e70050. <https://doi.org/10.1049/syb2.70050>
- [50] Sahlein, D.H., DeNardo, A.J., Amuluru, K., Gibson, D.P., Raz, E., Shapiro, M., *et al.* (2025) The Role of AI-Driven Volumetric Aneurysm Analysis in the Management of Cerebral Aneurysms. *Neuroimaging Clinics of North America*, **35**, 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.nic.2025.05.003>
- [51] Rezaeitalshmahalleh, M., Lyu, Z., Mu, N., Nainamalai, V., Tang, J., Gemmete, J.J., *et al.* (2025) Improving Prediction of Intracranial Aneurysm Rupture Status Using Temporal Velocity-Informatics. *Annals of Biomedical Engineering*, **53**, 1024-1041. <https://doi.org/10.1007/s10439-025-03686-2>
- [52] Nagy, J., Fenz, W., Thumfart, S., Maier, J., Major, Z., Stefanits, H., *et al.* (2025) Fluid Structure Interaction Analysis for Rupture Risk Assessment in Patients with Middle Cerebral Artery Aneurysms. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 1965. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-85066-9>