

颅内动脉瘤影像学判读中国指南(2024 版)

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

通信作者:张鸿祺,首都医科大学宣武医院神经外科,北京 100053, Email: xwzhanghq@163.com; 杨新健,首都医科大学附属北京天坛医院神经外科学中心,北京 100070, Email: yangxinjian@voiceoftiantan.org; 顾宇翔,复旦大学附属华山医院神经外科,上海 200040, Email: guyuixiang1972@126.com

基金项目:国家重点研发计划重大慢性非传染性疾病防控研究重点专项(2016YFC1300800);北京市科学技术委员会首都临床诊疗技术研究及转化应用(Z201100005520021);首都医科大学医学创新能力提升建设专项(12300122);北京市博士后科研活动经费资助项目(2023-ZZ-009)

DOI: 10.3760/cma.j.cn112050-20240430-00152

颅内动脉瘤(intracranial aneurysm, IA)是颅内血管壁薄弱部分病理性膨出形成的血管瘤。随着磁共振血管成像(MRA)和CT血管成像(CTA)等检查纳入健康筛查并普遍应用,IA的检出率较前提高^[1]。未破裂颅内动脉瘤(unruptured intracranial aneurysms, UIAs)的综合患病率约为3.2%^[2],一项基于上海社区人群的横断面研究表明,在35~75岁人群中,通过MRA检出UIAs的比率高达7%,其中女性高于男性^[3]。破裂颅内动脉瘤(ruptured intracranial aneurysms, RIAs)是蛛网膜下腔出血(SAH)最常见的病因,约占85%^[4],患者的致死、致残率可达50%^[5-6]。国际未破裂颅内动脉瘤研究(ISUIA)的I期研究结果显示,UIAs的年破裂率为0.95%,且IA的最大径越大,破裂风险越高^[7]。因此,尽早检出IA并评价其破裂风险显得尤为重要。基于此,本指南对IA筛查及风险评估常用的影像学技术及新兴技术进行总结归纳,并力求推荐最适合的影像学技术用以指导临床IA的诊疗。

一、指南制订方法

1. 指南发起机构:本指南由首都医科大学宣武医院神经外科发起并组织撰写,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协助指南的制订和修改工作,指南制订工作于2022年9月启动,2023年12月定稿。

2. 指南工作阶段:本指南以专家讨论会的方式完成,主要由具有临床实践经验和核医学科的多学科专家研究制订,分三个阶段对指南内容进行了撰写和修改。

第一阶段:委托神经外科专家起草指南的初稿,检索的数据库包括NCBI PubMed、中国知网、万方数据库,检索时间为建库至2023年9月。第二阶段,成立由神经外科和核医学专家组成的指南核心工作小组,对指南的初稿进行讨论、修改和确认。主要满足临床医生的工作需要及医保政策的需要。第三阶段:建立指南完善小组,专家组成员来自神经外科、重症医学科、核医学科、卫生经济学领域。对核心工作小组确认的指南进行评议、修改和确认,使其满足分级诊疗的需要,使相关检查符合国家医保的要求。

3. 指南使用者与应用的目标人群:本指南供各级医院从事IA的相关临床及科研人员使用,指南推荐意见应用的目标人群为IA患者。

4. 证据评价、分级及推荐意见:评价过程由2名经过培训的人员独立完成,存在争议时讨论或征求第3名研究人员的意见后确定。使用推荐意见分级的评估、制订及评价(grading of recommendations assessment, development and evaluation, GRADE)方法对证据体和推荐意见进行分级(表1)。

5. 指南的外审和批准:在提交指南指导委员会审批前,交由外审专家审阅,根据其反馈意见进行完善后,由证据评价及撰写组提交指南指导委员会批准。

二、IA筛查常用的影像学技术

1. MRA:主要成像技术包括时间飞越法(time of flight, TOF) MRA、对比增强(contrast enhanced, CE) MRA。TOF-MRA的成像原理是通过流入效应获得血液流动信息并将其转化为MR信号,局部血流不

表 1 推荐意见分级的评估、制订及评价 (GRADE) 分级标准

分级	内容
证据质量分级	
高 (A 级)	非常有把握:观察值接近真实值
中 (B 级)	对观察值有中等把握:观察值有可能接近真实值,但亦有可能差别很大
低 (C 级)	对观察值的把握有限:观察值可能与真实值有很大差别
极低 (D 级)	对观察值几乎无把握:观察值与真实值可能有极大差别
推荐强度分级	
强 (1 级)	明确显示干预措施利大于弊或弊大于利
弱 (2 级)	利弊不确定或无论证据质量高低均显示利弊相当

规则及血栓形成可导致信号丢失。但 TOF-MRA 的突出优势为无需注射对比剂及无 X 线辐射,被较广泛地用于 IA 的筛查。纳入 12 项研究 960 例患者的荟萃分析显示,772 例 IA 患者中,TOF-MRA 检出 IA 的灵敏度为 95%,特异度为 89%^[8]。TOF-MRA 对不同位置及大小的动脉瘤检出的灵敏度不尽相同,IA 位于大脑前动脉 (ACA)、最大径 < 3 mm 及使用低场强 MR (< 1.5T) 检测是导致 MRA 误判的危险因素^[9-10]。相比 3.0 T MR,7.0 T MR 在 IA 诊断效能 (如穿支血管的显示等) 有一定提升,但仍需进一步研究验证^[11]。

CE-MRA 是通过注射顺磁性钆对比剂增强成像,因其不受血液不规则流动伪影的影响,比普通 MRA 的信号更稳定。Cirillo 等^[12]以数字减影血管造影 (DSA) 为金标准,通过对 41 个 IA 的影像学对比研究发现,CE-MRA 与 TOF-MRA 检出 IA 的灵敏度的一致性良好 ($\kappa = 0.95$),但 CE-MRA 能更好地显示 IA 的不规则形态、瘤颈形态及瘤颈部的分支血管。但由于不注射对比剂的 TOF-MRA 已基本满足 IA 筛查需要,且 CE-MRA 检查仍无法避免对比剂过敏的风险,故目前我国很多医疗中心未常规开展 CE-MRA 检查。

2. CT:除一些体积较大或存在丰富瘤内血栓的 IA 可在 CT 中显示外,CT 多无法作为 UIAs 的诊断标准。但 CT 平扫是诊断动脉瘤性 SAH (aSAH) 及责任动脉瘤大致位置的主要手段。aSAH 发生 6 h 内,CT 扫描的灵敏度接近 100%,24 h 后可达 93%^[13-14]。

3. CTA:目前,CTA 被广泛应用于 IA 的检出。随着多层螺旋 CT 分辨率不断提高,64 排及以上 CT 可获得较好的成像效果。一项纳入 45 项研究

3 643 例患者的荟萃分析显示,CTA 诊断 IA 的灵敏度为 97.2%,特异度为 97.9%^[15]。CTA 对瘤囊的测量值准确性较高,但其对瘤颈及邻近穿支血管显示的清晰度低于 3D-DSA;由于局部容积效应,瘤颈的测量值也常大于实际^[16-17]。对于巨大型 IA (最大径 ≥ 25 mm),CTA 与 TOF-MRA、CE-MRA 在测量动脉瘤大小方面均无差异,其中 CTA 对瘤腔的呈现效果明显优于后两者,且能较好地呈现腔内血栓、瘤壁钙化^[18];但其对最大径 < 3 mm 的微小 IA 的检测能力有限,即使是 320 排 CT,其检测的灵敏度也仅为 81.8%^[19],故存在漏诊的可能。另外,骨质、金属伪影均对成像效果存在一定的影响^[20]。

4. DSA:目前,DSA 仍是诊断 IA 的“金标准”,尤其是 3D-DSA,其特异度、灵敏度及准确度均高于 MRA 等无创检查^[21]。4D-DSA 则可以更好地观察瘤颈与相邻分支血管的关系,提供血管和动脉瘤内的血流信息,故评估动脉瘤增长和破裂风险更好^[22]。但 DSA 也存在以下缺点:(1)可能发生对比剂过敏、穿刺部位的血肿、假性动脉瘤、动脉夹层、动静脉瘘、对比剂脑病或脑梗死、对比剂肾病甚至肾功能衰竭,以及因动脉夹层、血管内斑块脱落或其他原因引发的神经功能障碍等^[23]。(2)DSA 的辐射剂量相当于 CTA 的 4~5 倍^[24]。(3)对于夹层动脉瘤,DSA 并不能显影动脉壁和管壁内血肿的形态,仍需结合 MRI 辅助评估^[25]。对于高度怀疑 aSAH 或 CTA 检查未发现 aSAH 病灶的患者,在有治疗条件的前提下,推荐直接行 DSA 检查。

推荐意见:(1)TOF-MRA 检出 IA 的灵敏度可达 95%,特异度可达 89%,可作为 UIAs 筛查的首选;CTA 检出 IA 的灵敏度为 97.2%,特异度为 97.9%,亦可用于筛查;DSA 是诊断 IA 的“金标准”,推荐 aSAH 的筛查采用 DSA;CT 用于 SAH 的检测,灵敏度为 100% (1 级推荐,A 级证据)。(2)CE-MRA 与 TOF-MRA 检出 IA 的灵敏度无差异,但 CE-MRA 能更好地显示动脉瘤形态 (1 级推荐,C 级证据)。

二、IA 不稳定风险评估中的影像学方法
在筛查过程中一旦发现 IA,应对其远期发生不稳定 (增长或破裂) 的风险因素进行评估。

(一) IA 的形态学参数的测量及其临床意义
在 MRA、CTA 及 DSA 上均可进行 IA 形态学测量,其中以 DSA 为“金标准”。形态学参数对于预测 IA 不稳定非常重要,常用的评估 IA 形态学参数及衍生参数见表 2,这些参数在既往文献报道中被认为与 IA 不稳定风险具有相关性^[26-39]。

表 2 评估颅内动脉瘤常用的形态学参数及其定义

形态学参数	参数定义
长径 (diameter, D)	动脉瘤瘤颈中心点至瘤顶的最大距离 ^[26-29]
宽径 (width, W)	与动脉瘤长径垂直的最大距离 ^[27, 29]
高度 (height, H)	动脉瘤囊垂直于动脉瘤颈平面的最大距离 ^[28]
横径 (horizontal diameter, HD)	垂直于高度的动脉瘤囊内两点之间的最大距离 ^[28]
最大径 (maximum diameter, MD)	动脉瘤囊内任意两点之间的最大距离 ^[28]
瘤颈直径 (neck diameter, ND)	瘤颈平面的最大直径 ^[38-39]
动脉瘤角 (aneurysm angle, AA)	瘤颈平面与动脉瘤直径方向的夹角 ^[30]
入射角度 (inflow angle)	血流方向与动脉瘤直径方向的夹角 ^[29, 31]
瘤颈面积 (neck surface, NS)	动脉瘤颈平面表面积, 二维平面测量中不易测得
载瘤血管平均直径 (diameter of parent artery, DP)	二维平面测量描述为瘤颈处载瘤动脉直径及距离瘤颈上游和下游 1.5 倍处载瘤动脉直径的平均值, 三维测量可定义为瘤颈上下游各 1.0 cm 内载瘤动脉直径的算术平均值 ^[32-33]
体积 (volume, V)	空间测量中为动脉瘤体积变化的总和; 二维测量中可以通过多条径线的立方积估算, 但不准确
纵横比 (aspect ratio, AR)	动脉瘤长径或高度与瘤颈直径比 ^[34]
长宽比 (D/W)	动脉瘤长径与宽径之比 ^[27]
尺寸比 (size ratio, SR)	动脉瘤长径或高度与载瘤血管平均直径之比 ^[30]
横径瘤颈比	动脉瘤横径与瘤颈直径之比 ^[35]
波动指数 (undulation index, UI)	$UI = 1 - V/V_{ch}$, 其中 V 是动脉瘤的体积, V_{ch} 是包裹动脉瘤的最小规则凸型的体积 ^[30, 36]
非球形指数 (nonsphericity index, NSI)	动脉瘤与球体的偏差, $NSI = 1 - (18\pi)^{1/3} V^{2/3}/S$ ^[36] , 其中 V 为动脉瘤体积, S 为动脉瘤表面积
体积/瘤颈面积比	体积与瘤颈面积的比值

1. 常用的反映动脉瘤大小的相关参数:动脉瘤的大小是最早被提出的与动脉瘤不稳定风险可能相关的参数,但不同研究对动脉瘤大小的描述方法不同。ISUIA 研究指出,位于前循环、最大径 < 7 mm、既往无 SAH 的 IA,其年破裂率为 0^[37]。Backes 等^[38]得出长径 > 7 mm 的 IA 更容易发生不稳定。Bor 等^[39]发现,高度为 4.0 ~ 6.9 mm 的 IA 比高度 < 4 mm 的 IA 更容易发生不稳定。然而并非所有研究都认为 IA 的大小与其不稳定风险相关, Xu 等^[32]基于 763 个镜像 IA 的研究表明,破裂与未破裂 IA 长径的差异无统计学意义。综上,既往对于 IA 大小的测量尚缺乏统一标准,结论的不一致降低了其应用价值,未来应制定描述 IA 大小的统一标准。

2. 纵横比 (aspect ratio, AR) 和尺寸比 (size ratio, SR):多项研究认为,AR 在大于某一比值时 IA 破裂的风险显著增高。Qiu 等^[40]研究发现,AR ≥ 1.4 的 IA 低剪切应力区域占比 (low shear area ratio, LSAR) 为 0.13 时更容易引起 IA 不稳定,与 AR < 1.4 (LSAR 为 0.02) 相比差异有计学意义 ($P < 0.001$)。SR 与 IA 破裂风险相关的结论由 Dhar 等^[30]

提出,Tremmel 等^[41]的研究表明,SR > 2 时可导致 IA 内出现更多涡流及更复杂的血流模式,易引发 IA 破裂。

3. 入射角度和波动指数 (undulation index, UI):入射角度的概念由 Baharoglu 等^[31]提出,并发现其是影响侧壁 IA 破裂的重要危险因素。Zhai 等^[29]分析了 23 例胼周动脉瘤与 233 例其他部位前循环动脉瘤的形态学特点,发现胼周动脉瘤的入射角度比其他前循环动脉瘤更大 ($P < 0.001$),并指出该因素可能是胼周动脉瘤更易破裂的原因。但亦有研究指出,很难从二维平面中选择到满足定义的最准确的入射角度,因为动脉瘤的直径方向测量时可能因工作角度选取的差异造成偏差,三维空间测量有望解决此问题^[26]。UI 则在一定程度上反映 IA 的不规则特性。Dhar 等^[30]提出,RIAs 较 UIAs 有更大的 UI 值,即 RIAs 更加不规则。不规则 IA 一般是指分叶状或伴有子囊的动脉瘤^[42]。越来越多的研究证明,IA 的不规则形态是其破裂的独立危险因素^[42-43]。Björkman 等^[44]认为,出现 aSAH 和多发 IA 的患者中,不规则形态对动脉瘤破裂的影响可能比其大小更有意义。

综上,IA 的形态学参数复杂多样,对 IA 不稳定风险评估是否有临床意义尚不统一。不同部位的 IA 可能具有不同的形态学参数特点,分部位评估 IA 形态学特征可能是更准确的归纳方法。

(二) 血流动力学参数及其临床意义

计算流体力学技术已成为目前研究动脉瘤血流动力学的主要手段。计算流体力学对动脉瘤血流动力学的模拟方法主要通过采集动脉瘤患者的影像学数据,将其建模并使用软件进行有限元分析,最终得出结果。

1. 定性分析指标:主要包括血流复杂程度、血流稳定性、血流集中性及血流冲击域 4 个方面^[45]。RIAs 的血流模式较 UIAs 更复杂和不稳定^[46]。一项纳入 210 例 IA 患者的血流动力学研究发现,更加聚集的射流、小的射流承受区域、复杂及不稳定的血流模式是 IA 破裂的危险因素^[45]。

2. 壁面剪切应力(wall shear stress gradient, WSS)和壁面剪切应力梯度(WSS gradient, WSSG):WSS 是指血液流动对血管内壁产生的剪切力^[47],其数值与物体之间的速度梯度成正比。WSSG 定义为切应力沿流动方向的空间导数,即沿血管长度的 WSS 变化^[48]。目前,动脉瘤增长的血流动力学原因存在争议,WSS 增高及降低均被证明与 IA 的生长及破裂有关^[49-51]。多项研究显示,相较于 UIAs, RIAs 的 WSS 更低^[52-53]。而有些研究则认为,过高的 WSS 和 WSSG 可以损伤血管内皮,导致局部血管壁退化、扩张甚至膨胀,进而形成动脉瘤或导致动脉瘤的生长,这可能与小的或继发性泡状动脉瘤表型的生长和破裂有关^[52, 54-56]。

3. 低壁面剪切应力区域(low shear area, LSA):LSA 定义为瘤壁 WSS 低于 1/10 载瘤动脉的平均 WSS 区域^[57]。瘤体表面 LSA 越大,IA 破裂风险越高。一项纳入 15 项研究,共 779 例患者的 900 个 IA 的荟萃分析结果表明,LSA 与 IA 破裂显著相关^[58]。

4. 能量损耗(energy loss, EL):血液流经动脉瘤或载瘤动脉所损耗的动能将转化为其他形式的能量,可能会导致动脉瘤壁变形,甚至破裂并发生 SAH。EL 能够精确地评估瘤内压力变化和血流动能的改变,展示血流动力及其与血管壁碰撞间的关系^[59]。高 EL 被认为是 IA 破裂的危险因素^[60]。一项基于 7 例前交通动脉动脉瘤的血流动力学分析显示,RIAs 的 EL 明显高于 UIAs,且血流模式更为复杂和不稳定^[61]。

5. 振荡剪切指数(oscillatory shear index, OSI):

OSI 主要用于评价血流方向上的时间变化,衡量在心动周期中 WSS 方向改变的程度^[52]。研究显示,RIAs 的 OSI 值较 UIAs 的高^[62];但也有研究提出,UIAs 与 RIAs 的 OSI 值的差异无统计学意义^[63]。因此,OSI 在预测 IA 破裂中的作用仍需进一步探讨。

6. 梯度振荡数值(gradient oscillatory number, GON):GON 是心动周期内血流作用在内皮细胞上的血流动力学参数,主要用于量化震荡张力和压缩力的程度。GON 局部升高区域提示可能是入射角度形成的区域。一项纳入 22 项分析 IA 血流动力学的荟萃分析结果显示,IA 的高 GON 与容易形成侧壁 IA 的区域高度相关^[64]。

7. 相对阻滞时间(relative residence time, RRT):RRT 代表了血液在血管壁周围的停滞时间,RRT 越高表示血流阻滞时间越长,流速越慢,WSS 则越低^[65-66]。一项纳入 23 个最大径 > 7 mm IA 的研究表明,RRT 预测 IA 的破裂风险具有统计学意义,RIAs 的 RRT 值显著增高^[67]。另一项纳入 113 个 UIAs 的研究证明,RRT 对 IA 瘤壁的重塑、炎症和粥样硬化均有显著影响^[68]。

(三) 影像学检查及其临床意义

1. 高分辨率(high resolution, HR)MRI 判读及对 IA 稳定性的预测意义:HR-MRI 技术多是指在高场强 MR 系统中应用高信噪比线圈扫描的序列,最大特点是能够清晰地观察病变所在节段血管壁的信号特征及有无强化表现,即“黑血”技术^[69]。而 HR-MRI 上的瘤壁环形强化可以间接反映强化部位的炎性反应,可极大提示 IA 由稳定变为不稳定,甚至趋于破裂^[70-73]。Edjlali 等^[72]对 87 例患者的 108 个 IA 行 HR-MRI 检查,结果提示不稳定 IA 的瘤壁强化明显高于稳定 IA,且瘤壁强化是 IA 不稳定的独立危险因素。Hu 等^[74]对比分析 30 个 IA 的术前 HR-MRI 与术后 IA 病理学结果,发现 HR-MRI 的环形强化区对应瘤壁的病理学为大量巨噬细胞及淋巴细胞浸润,说明瘤壁强化对瘤壁炎症及不稳定有极大的提示作用。Wu 等^[75]也在 HR-MRI 研究中证实,中性粒细胞与淋巴细胞比值作为一种有价值的炎症标志物在 RIAs 中更高,且该标志物与 UIAs 瘤壁强化有关;此外,该团队还发现,与瘤壁增强相关的环状 RNA 分子(circRNAs)可能是评估 UIAs 稳定性的新炎症生物标志物^[76]。

2. 四维血流(four dimensional flow, 4D Flow)MRI 和动态 4D-CTA:4D Flow-MRI 是基于时间分辨的三维相位对比 MR 成像技术,可采集多维度信息,

除形态学信息外,还可获取血流动力学参数^[77]。目前,该技术已逐渐应用于临床和科研工作中。Futami 等^[78]在 40 例 IA 患者 4D Flow-MRI 扫描中发现,RIAs 和具有子囊的动脉瘤可能具有不稳定的涡旋核和更为复杂的血流模式。4D Flow-MRI 还可用以评价血流导向装置(flow diverter devices,FD)置入后瘤内的血流改变情况,Brina 等^[79]证实,血流从载瘤动脉流入动脉瘤内后流速下降率是瘤内血栓形成的重要因素,其数值越大血栓越容易形成。动态 4D-CTA 是运用动态容积扫描模式,在相同的心脏相和时间相获得容积数据集,在一定程度上弥补了普通 CTA 在时间分辨率上的缺陷,既能观察 IA 的静态特征又能根据瘤壁的运动情况有效识别其不规则搏动,并可有效评估 UIAs 的破裂风险,有望成为 IA 不稳定风险的良好预测指标。Zhang 等^[80]的研究对 328 例 IA 患者的 4D-CTA 扫描结果进行评估,显示不规则瘤壁搏动与 IA 破裂独立相关。

推荐意见:(1) IA 形态学特征与其不稳定风险相关,但没有统一的影像学测量方法和形态学参数,与 IA 不稳定相关的形态学危险因素也无统一结论(1 级推荐,B 级证据)。(2) 血流动力学分析存在一定局限性,缺少量化衡量标准,相关血流动力学参数平均值与相对值的定性意义更大,参数自身的临床应用价值有待进一步提高,可结合形态学及 IA 瘤壁信息进行综合分析(1 级推荐,C 级证据)。(3) 高 WSS 和 WSSG 可能与血管重构和 IA 的形成有关(1 级推荐,C 级证据)。(4) 低 WSS 或高 OSI 可能与 IA 破裂相关(1 级推荐,C 级证据)。(5) HR-MRI 出现瘤壁环形强化可能提示瘤壁炎性改变,IA 易发生不稳定(1 级推荐,C 级证据)。(6) 4D-Flow MRI 可能很好地反映 IA 不规则血流,4D-CTA 可能观察 IA 瘤壁不规则搏动,两种检查对 IA 不稳定风险评估可能有一定的价值(2 级推荐,D 级证据)。

三、非囊性动脉瘤的影像学判读

(一) 夹层动脉瘤

颅内夹层动脉瘤是由于各种因素导致血管壁撕裂,继而血流涌入血管壁层间,形成血管壁层间血肿的一种特殊类型 IA。其特征性的影像学表现主要包括“串珠征”、“壁间血肿”及“内膜瓣征”。“串珠征”是夹层导致的扩张与狭窄并存的影像学表现,DSA、CTA 及 MRA 均可显示这一征象,其中 DSA 为“金标准”^[81]。“壁间血肿”即夹层假腔内血肿形成的影像学征象,增强及非增强 MRI T1 加权成像(T1WI)及 HR-MRI 均可以较好地检出^[82-83]。“内

膜瓣征”即夹层血管分为真腔与假腔两个腔并在其间存在一层内膜的影像学征象,也称为“双腔征”,更容易在 MRI 而非血管成像类检查中被观察到^[84]。一项纳入 50 例颅内夹层动脉瘤的影像学研究指出,HR-MRI 增强 T1WI 检出“内膜瓣征”的灵敏度为 91.4%,被认为是诊断颅内夹层动脉瘤最可靠的影像学证据^[82]。颅内夹层动脉瘤的诊断需要综合血管内腔、血管壁情况共同判断,考虑到 DSA 的有创性,可先行 CTA 或 MRA 检查,若诊断无法明确或患者因 SAH 需血管内治疗可进一步行 DSA 检查。

(二) 血泡样动脉瘤(blood blister-like aneurysm, BBA)

BBA 是一种特殊类型 IA,常见于颈内动脉床突上段背侧。尸检病理学结果显示,BBA 病变为局部血管壁的缺陷,血管壁缺损处仅被菲薄的纤维组织所覆盖,并非真性动脉瘤^[85-86]。BBA 常见的影像学表现为颈内动脉床突上段似“浆果”样的半圆形隆起,因其较小,容易在首次 CTA 甚至 DSA 检查中被漏诊。BBA 在短期血管造影随访中的形态学可发生变化,该类动脉瘤极不稳定,倾向破裂出血或生长等,故对于怀疑 BBA 的患者需要特别注意影像学上的变化^[87]。当然也有部分观点认为,BBA 属于一种病理学诊断而非影像学诊断,仅从影像学及临床表现很难明确诊断 BBA^[88]。

推荐意见:(1) DSA 是诊断颅内夹层动脉瘤的“金标准”,HR-MRI 可以很好地观察到管壁“内膜瓣征”和“壁间血肿”(1 级推荐,C 级证据)。(2) BBA 在影像上不易确诊,结合临床症状、影像学及病理学可综合诊断(1 级推荐,D 级证据)。

四、围手术期的影像学应用

(一) 血管内治疗术前规划及术中影像学应用

目前,血管内治疗已成为大多数 IA 的主要治疗手段,其方式主要包括单纯弹簧圈栓塞、支架辅助弹簧圈栓塞和 FD 置入等。术前充分的影像学评估,对治疗决策的制定有重要价值。

1. CTA 和 MRA:CTA 和 MRA 主要用于 IA 的初步筛查。其中,CTA 检查快速,更适用于 RIAs 的患者;MRA 无创,更适合 UIAs 的筛查。目前,相较于 DSA,CTA 和 MRA 虽然对动脉瘤和载瘤动脉形态结构的评估受到一定限制,但二者检出 IA 的灵敏度和特异度均较高^[15, 18],并且 CTA 或 MRA 对于分析 Willis 环状况和指导手术有很好的作用,现已将其运用于术前筛查和辅助制定治疗计划。此外,所得数据

也便于今后导管塑形 3D 打印等新技术的开展。

2. DSA: DSA 是 IA 形态学观察的“金标准”,术中通路的建立、导管塑形、器材选择及手术策略规划均依赖于术前 DSA 的评估。通路的建立是血管内治疗的前提,在治疗前,通过观察患者术前头颈部 CTA 或 DSA,评估主动脉弓型和血管通路情况,辅助血管治疗方案的制定^[89]。近年来,越来越多的研究采用人工智能(artificial intelligence, AI)技术对动脉瘤进行智能化测量和微导管塑形,旨在提高血管内治疗 IA 的精确性和安全性^[26]。

3. 数字平板“C”型臂血管造影系统 CT 成像技术(Dyna CT)和光学相干断层扫描(optical coherence tomography, OCT): Dyna CT 不但可多角度观察血管和动脉瘤的空间位置,还可用于动脉瘤栓塞术中评估支架的打开情况从而辅助手术策略调整^[90-91]。其主要局限性包括伪影和影像质量校准,并且 CT 重建需要一定的时间。相较于 Dyna CT, OCT 可通过更高的分辨率及近似于病理学的方式充分显示支架每根网丝打开的情况以及网丝与血管内膜的位置关系,并且可明确支架贴壁情况及其表面的血管内皮覆盖情况^[92-93]。但其应用也存在一定的局限性^[94],目前可获得的 OCT 系统均为为冠状动脉设计,其导管僵硬,对于迂曲的颅内血管适用性较为有限,存在安全隐患。

(二) 血管内治疗术后的影像学应用

若术后考虑患者发生出血性并发症时,需急诊完善头颅 CT 加以明确;对于术后发生缺血性并发症但无法排除出血性并发症时,在应用抗凝、抗血小板聚集等药物前,建议完善 CT 以除外出血。RIAs 患者术后需根据病情定期复查 CT,明确出血的吸收情况、脑积水及脑肿胀情况等。MRI 及 MRA 可早期反映 IA 闭塞及围手术期并发症的情况^[95]。弥散加权成像(DWI)可用于术后对缺血性并发症的评估,尤其是采用支架辅助弹簧圈栓塞者。文献报道,血管内治疗后有高达 92.1% 的患者 DWI 至少显示 1 个高信号病灶,但其中 81.6% 的患者不表现出相关症状^[96]。另外,患者的临床表现常与 DWI 所显示的缺血病灶大小相关,约 44.1% 的 DWI 所显示的 <2 mm 的缺血病变在术后 6 个月改善^[97]。同时,由于血栓部分不能在 DSA 中显影, MRI 在此类具有占位效应的 IA,尤其是后循环血栓性动脉瘤的检出和随访中具有很大优势^[98]。

(三) 开颅手术前规划及术中的影像学应用

开颅手术是 IA 重要的治疗手段,尤其适用于分

叉部宽颈动脉瘤、瘤体发出分支血管、大脑中动脉合并血肿及巨大型 IA 需行搭桥手术者^[99]。开颅手术治疗 IA 包括动脉瘤单纯夹闭、动脉瘤包裹夹闭及动脉瘤孤立联合搭桥术等,影像学评价对于开颅治疗非常重要,下面就常用的重要影像学方法进行介绍。

1. CTA 在开颅术前的应用: 3D-CTA 与 2D-CT 图像相结合是 IA 显微手术中一种可行且有效的图像引导方法,其优势在于:(1) 诊断方面灵敏度类似 DSA,可高达 97.2%^[100]。(2) 容积重建的 3D-CTA 可用于模拟开颅手术的入路。(3) 更加便捷,操作更容易。近年来,随着影像标注软件的开发,IA 夹闭术前模拟方法不断更新,CTA 术前规划也更加精细。一项基于 CTA 数据采用 3D-slicer 软件重建引导 IA 夹闭手术的研究结果显示,纳入的 12 例患者中,9 例术中所见与重建图像完全一致,患者均顺利完成 IA 夹闭^[101]。CTA 对开颅手术入路的指导作用很强,但对于 Willis 环代偿情况及 IA 细小穿支的辨认能力不及 DSA,仍需个体化综合评估。

2. DSA 在开颅术中的应用: DSA 除具有上述对责任动脉瘤精准定位、明确是否有穿支动脉或相邻近粘连的小动脉的作用外,在开颅术中,DSA 可实时监测动脉瘤的夹闭情况、评价侧支循环代偿情况,且在复合手术治疗复杂 IA 中起到非常重要的作用。Tang 等^[102]采用开颅手术夹闭 517 个 IA,术中根据 DSA 指导及时调整动脉瘤夹,阳性不良事件(血管闭塞或动脉瘤残留)的发现率仅为 12.4%。对于需闭塞载瘤动脉的 IA,评估载瘤动脉远端侧支循环状态非常重要,若远端侧支循环代偿不良,则须行血管搭桥手术以保证载瘤动脉远端脑组织的血液供应。评价方法主要包括压颈试验和球囊闭塞试验(balloon occlusion test, BOT)。压颈试验可观察颈内动脉短暂闭塞后侧支循环充盈状态,但只能初步判断远端血管的代偿情况。BOT 是评价脑组织对缺血耐受程度的重要方法^[103]。若患者可耐受 30 min 以上而无脑缺血表现为 BOT 阴性(BOT 试验假阴性率可达 20%,对阴性患者可降低血压至平均动脉压的 2/3 水平,再次阻断 15 min 进行评估,可减少假阴性率)可临时或永久闭塞载瘤动脉,否则应施行血管搭桥术。对于复杂 IA,复合手术为外科手术夹闭动脉瘤提供了更多的辅助选择。一项纳入 119 例床突旁复杂 IA 在 DSA 引导下球囊辅助开颅夹闭手术的研究显示,111 例(93%)患者可顺利夹闭动脉瘤,105 例(88.2%)患者出院时无任何神经功能缺

损症状^[104]。

3. 吲哚菁绿荧光造影(indocyanine green angiography, ICGA)在开颅手术中的应用:2003 年, Raabe 等^[105]首次报道了 ICGA 在脑血管病术中的应用,发现 ICGA 可以提供所有相关的动脉和静脉血管通畅的实时信息,包括小动脉和穿支动脉(直径 $<0.5\text{ mm}$)及可见动脉瘤囊。一项纳入 108 例术中应用 ICGA 与术后 DSA 对比的研究表明,ICGA 的准确度可达 92.6%^[106]。荧光素视频血管造影(fluorescein video angiography, FL-VA)是 ICGA 后更新的术中实时造影技术,可判断血管通畅程度及 IA 夹闭程度;其优点是显微镜下同时可见荧光血管组织和非荧光组织,故无需中断手术等待造影。Świątnicki 等^[107]在开颅夹闭 IA 术中应用 FL-VA,成功监测到残余的动脉瘤及受损的血管。虽然 ICGA 监测表浅动脉通畅度的优势显著,但深部的病变因受脑组织遮挡,不易观察全部动脉显影,且受药品使用时间的限制,每次荧光造影时间需要间隔 $>20\text{ min}$ 。

4. 术中微血管多普勒超声(intraoperative microvascular Doppler sonography, iMDS)的应用:iMDS 是一种成熟的血管外科血流速度检测工具,能检测血管闭塞,但在开颅夹闭 IA 术中的应用还不广泛,是否能检测到细小的穿支闭塞仍处于探索阶段。有研究在开颅夹闭 IA 术中采用 iMDS 监测血管,显示该技术可以很好地判断细小血管血流流速的变化,从而诊断其受损或闭塞^[108]。

(四)开颅夹闭 IA 术后的影像学应用

1. CTA 和 DSA:IA 夹闭术后需要复查 CTA 或 DSA^[109],目前,普遍认为 DSA 是评价手术结果的“金标准”。MacDonald 等^[110]的术后 DSA 结果显示,IA 夹闭术后仍可发生约 11.5% 的意外狭窄,其中 88.9% 的患者发生卒中或死亡;4% 的动脉瘤残余,可能需要二次手术。对于动脉瘤孤立联合搭桥术患者,术后采用 CTA 甚至 DSA 评价桥血管的通畅程度是必要的^[111]。对于已发生血管痉挛、缺血或出血事件者,及时行 DSA 有助于快速诊断责任血管病变,并予以对症处理^[112-113]。由于钛夹产生的高度易感伪影妨碍了 MRA 对动脉瘤瘤囊和载瘤动脉的评估,故术后评估不常使用 MRA^[114]。

2. 经颅多普勒超声(TCD):TCD 是目前公认的、应用最广泛的无创血管内检测技术,对早期发现血管痉挛具有绝对的优势^[115-117]。TCD 的局限性在于只能评估大的近端动脉血流,在后循环中的评

估作用有限,且困难的颞骨窗口会导致数据不准确^[118]。因此,需结合临床检查,大多数中心采用连续 TCD 来判断需要进一步行 CTA 或 DSA 的患者。

3. CT 和 MRI:2D-CT 是术后最常用的评估脑组织情况的方法。对于颅内病变,特别是出血性病变具有检测灵敏度及特异度高的优势,是术后最方便、准确的检查方式^[1]。但与金属动脉瘤夹相关的光束硬化伪影限制了其应用,随着钛夹的广泛使用及双能量、光谱成像和金属伪影消除(metal artifact reduction, MAR)等新 CT 技术的出现显著改善了图像质量^[119-120]。然而,MAR 技术同时也会导致新伪影的出现,包括假阳性血管狭窄或闭塞,故对校正图像应谨慎解释^[121-122]。MRI 在 IA 夹闭术后,特别是对 RIAs 患者脑组织的评价具有重要优势,尤其是对缺血性改变的判别和早期认知功能障碍的发现。与 CT 比较,MRI 仍是获得最大信息量的方法^[4, 123]。

推荐意见:(1)DSA 指导血管内治疗术中的进行及实时监测,Dyna CT 和 OCT 技术可观察血管内治疗术中及术后支架打开情况及内皮细胞覆盖情况(1 级推荐,A 级证据)。(2)CT 和 MRI 可用于血管内治疗术后及时发现新发的脑出血和脑梗死(1 级推荐,B 级证据)。(3)CTA 可用于 IA 开颅术前模拟手术入路;DSA 可用于 IA 开颅手术的术前规划,基于 DSA 的球囊闭塞技术可用于开颅术前评价血管代偿情况及术中载瘤动脉控制情况;ICGA 可用于开颅术中评估 IA 残余及载瘤动脉通畅情况;iMDS 可用于开颅术中监测细小血管的闭塞(1 级推荐,C 级证据)。(4)TCD 可用于术后评价血管痉挛,CTA 可用于出院前复查瘤夹及动脉瘤夹闭情况(1 级推荐,C 级证据)。

五、随访中的影像判读

(一)UIAs 随访观察中形态变化的判定

尽管低风险 UIAs 在随访期发生破裂的概率低^[124],但应及时判断 UIAs 的形态学变化及是否发生增长。既往研究对 IA 是否增长的判定标准不统一。2015 年,Bor 等^[39]将 IA 增长定义为:某一径线增长超过 1 mm,或任意 2 条径线的增长均超过 0.5 mm,或出现小阜或分叶等明显的形态学变化。因该标准被多项高质量研究所引用^[38, 125],目前逐渐成为最被认可的基于测量 IA 径线变化判断动脉瘤增长的标准。然而基于二维径线测量的判断并不能代表 IA 的空间增长趋势,Geng 等^[126]研发出了基于三维配准技术判断 IA 增长的方法,验证了体素变化率 $>20\%$ 判断 IA 增长的灵敏度为 94.44%,空间最大增长矢量 $>1\text{ mm}$ 判断 IA 增长的灵敏度为

77.78%。随着技术的进步,IA 空间形态变化的判断可能是未来的趋势。

(二)IA 术后影像学的随访方式及判读

1. 随访方式的选择:DSA 是 IA 术后评估的“金标准”^[127],但为有创性检查,探究更为方便及舒适的随访方法是研究的方向。Schaafsma 等^[128]纳入 310 例弹簧圈栓塞术后的 IA 患者进行研究,结果显示,以 DSA 为“金标准”,TOF-MRA 检测 IA 复发的灵敏度为 82%,特异度为 89%;根据 2 种影像学随访结果预测患者的预期寿命差异无统计学意义,且采用 TOF-MRA 随访患者的总体花费更低。然而 TOF-MRA 诊断术后 IA 的残留有一定局限性。Xiang 等^[129]对 280 例术后 IA 患者同期行 DSA 及 3.0 T MRA 检查,TOF-MRA 评价单纯弹簧圈栓塞术后 IA 复发的灵敏度和特异度分别为 100.0% 和 90.1%;评价 FD 置入后动脉瘤囊内血流残留的灵敏度和特异度分别为 91.7% 和 100.0%;评价支架辅助栓塞术后 IA 复发的灵敏度为 66.7%,特异度为 100.0%;评价开颅夹闭术后 IA 复发的灵敏度仅为 50.0%,特异性为 100.0%。由于载瘤动脉内可能存在涡流或湍流等复杂的血流情况,TOF-MRA 无法准确评价载瘤动脉。血管内治疗后因金属伪影的存在,CTA 提供的信息相对有限^[130],但其对开颅夹闭术后的随访相对准确。Dehdashti 等^[131]以 DSA 为“金标准”,采用 CTA 随访 49 例开颅夹闭术后 IA 患者,显示在 42 例 CTA 影像质量良好者中,CTA 评价 IA 闭塞的灵敏度及特异度均为 100%;评价载瘤动脉通畅性的灵敏度为 80%,特异度为 100%。

静音 MRA 是近年新开展的非对比增强 MRA 技术,可能会减少与编织、高金属覆盖支架相关的伪影^[132],比其他非 DSA 类影像检查更适用于支架辅助栓塞或 FD 术后 IA 患者的复查,尤其是对载瘤动脉的观察。Tan 等^[133]对比分析了 155 例支架辅助栓塞 IA 患者静音 MRA 与 DSA 的随访效果,以 DSA 为“金标准”对静音 MRA 的质量进行 5 分法可视化评分。结果显示,病灶区静音 MRA 可视化评分达 (3.92 ± 0.94) 分;采用 Raymond-Roy 分级标准评价 IA 的闭塞程度,静音 MRA 与 DSA 一致性好($\kappa=0.992$)。

Woven EndoBridge (WEB) 等瘤内扰流装置是近年来广泛应用于血管分叉部宽颈动脉瘤的新型栓塞装置,其有效性和安全性均已被证实^[134-136]。WEB 研究中的短期影像学随访通常采用 DSA^[134],长期随访采用 DSA、CTA 及 TOF-MRA 多种影像方式^[136]。Ozpeynirci 等^[137]应用 CTA 和 DSA 对采用 WEB 装置

栓塞的 IA 患者进行随访,CTA 与 DSA 对 IA 评价的吻合度为 93.8%,CTA 发现动脉瘤残留的灵敏度为 50%,特异度为 100%。Algin 等^[138]采用 TOF-MRA 对 WEB 装置栓塞后的患者(69 例患者 73 个动脉瘤)进行的随访,显示 TOF-MRA 与 DSA 及 CTA 在动脉瘤的复发判断上具有良好的一致性($P<0.001$)。

2. 术后 IA 愈合的影像学判断标准:IA 术后不同的治疗方式采取不同的愈合判断标准。单纯弹簧圈栓塞、支架辅助栓塞及开颅夹闭的治疗方式,因对瘤囊进行了填塞或夹闭处理,封闭了瘤内血流使其术后不显影,故通常需考虑瘤囊是否有再显影即复发的情况,通常采用 Raymond 分级标准评估[即:IA 完全闭塞不显影(I 级)、瘤颈部残余(II 级)及动脉瘤体残余(III 级)的三种愈合等级]。近年来有研究将 Raymond 分级改良形成细化的 Raymond-Roy 分级,将瘤颈残留按照占动脉瘤体积的百分比进一步分成 1 级、2a 级及 2b 级,并把完全闭塞定义为 0 级,动脉瘤基底部新发动脉瘤定义为 4 级^[139]。该分级更加细致,但是临床应用较繁琐,实用性尚未得到验证。

多数情况下 FD 置入治疗 IA 仅处理载瘤动脉而不进行瘤内操作,影像通常表现为 IA 显影伴血流迟滞,随访期应更加关注瘤内的血栓化及动脉瘤自我修复的情况。目前国际上已发表的研究中,O'Kelly-Marotta (OKM) 分级是常用的判断 FD 术后栓塞程度的标准^[140-141]:A 级为瘤体完全显影($>95\%$),B 级为瘤体部分显影($5\% \sim 95\%$),C 级为仅有瘤颈显影($<5\%$),D 级为完全闭塞。此外仍有 4 种已发表的分级标准^[142-145]。但上述的 5 种分级标准为描述性判定,不能预测动脉瘤未来闭塞或复发趋势。Kang 等^[146]筛选出 4 个影响 FD 置入后 IA 闭塞的因素(由 4 个字母“F”表示,分别为棱形动脉瘤、射流、瘤体充盈及对比剂滞留),形成了 4F-FPS 评分系统(4F-flow diversion predictive score)。该评分系统由 4 个因素分值相加组成,总分为 0~5 分。当总分值 ≥ 3 分,预测动脉瘤闭塞率 $\geq 78\%$ 。该评分系统在 FD 置入后即刻可以很好地预测远期预后情况,同时描述了动脉瘤囊内有无入射血流、瘤内充盈血流的多少等动脉瘤充盈愈合情况。

WEB 装置因其特殊形态,故评价时不完全等同于弹簧圈栓塞。既往研究中提出 3 种评价 WEB 术后 IA 内血流残留的分级方法,分别为 BOSS (Beaujon occlusion scale score) 分级^[147]、Lubicz 分级^[148]及 Webcast 分级^[149],其中 Webcast 分级接近

上述的 Raymond 分级, I 级为完全闭塞, II 级为充分闭塞, III 级为动脉瘤残留; Lubicz 分级分为 A、B、C、D 4 个等级, A 级为完全闭塞; B 级为完全闭塞, 动脉瘤内无对比剂, 但对比剂填充在 WEB 装置下方的中心凹陷区; C 级为瘤颈残留, 瘤壁部分对比剂显影, 但瘤内无对比剂充盈; D 级为瘤内或 WEB 装置内对比剂充盈。BOSS 分级为 6 个等级, 0 级为无血流进入动脉瘤及 WEB 装置, 0' 级为对比剂填充在 WEB 装置下方中心凹陷区, 1 级为仅 WEB 装置内出现血流; 2 级为瘤颈部残留; 3 级为动脉瘤瘤体残留; 1 + 3 级为瘤体及 WEB 装置内均出现血流。Caroff 等^[150]采用 BOSS 分级对 4 个治疗中心 756 例 WEB 治疗的患者进行随访评估, 共 57 例患者需再治疗, 包括 48 例 BOSS 3 级及 BOSS 1 + 3 级, 9 例 BOSS 2 级。

推荐意见: (1) 判断 UIAs 是否增长多采用某一径线增长超过 1.0 mm, 或任意 2 条径线的增长均超过 0.5 mm, 或 IA 出现小阜或分叶等明显的形态学变化的判断方法, 很可能最可以代表 IA 形态变化 (1 级推荐, B 级证据)。 (2) DSA 是术后随访最可靠的手段, 其他影像学方式如 TOF-MRA、CTA、静音 MRA 等很可能在某一治疗方式中能很好地替代 DSA (1 级推荐, B 级证据)。 (3) IA 复发的判断, 单纯弹簧圈栓塞、支架辅助栓塞及开颅夹闭可采用 Raymond 分级; FD 治疗目前无统一评价复发的分级标准, OKM 分级可以很好描述即刻 IA 闭塞情况, 4F-FPS 可能预测动脉瘤未来闭塞情况; WEB 装置治疗后的复发判断有 BOSS、Lubicz 及 Webcast 分级标准 (1 级推荐, B 级证据)。

六、AI 筛查技术

随着 AI 技术的发展, AI 算法已经广泛应用于 IA 的图像后处理、定量影像特征提取、血管分割、智能诊断、疗效评估和预后预测等多个环节。AI 的出现大大缩短了图像分析时间、提高诊断的准确度, 提升了临床医生对 IA 的诊疗水平。AI 技术主要包含机器学习 (machine learning, ML) 和深度学习 (deep learning, DL) 技术。ML 是通过学习和训练模型来提取与记忆相关的特征和参数, 该类模型包括随机森林模型、支撑向量机模型及 K - 近邻模型等^[151]。DL 是实现 ML 的重要技术^[152], 多用于开发图像识别算法, 通过构建神经网络模拟脑运行。DL 常用的算法结构有多种, 包括深度神经网络 (deep neural network, DNN)、卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 及循环神经网络 (recurrent neural

network, RNN) 等, 这些算法结构可应用于图像自动化分割、数据特征的挖掘和提取, 建立分类和预测模型, 从而提升任务的准确性。随着 AI 和计算机视觉技术的快速发展, 以 DL 神经网络为代表的 AI 算法基于强大的表征学习能力, 能够自动化提取影像学特征, 为辅助诊断和决策提供参考。

1. AI 在 IA 筛查中的应用: AI 算法已经广泛应用于 IA 影像处理的多个环节。Yang 等^[153]基于 DL 的 CNN 三维检测算法对 1 337 个 IA 进行训练和验证, 所得的 AI 模型检测 IA 的灵敏度为 97.5%。采用 AI 技术辅助检测 IA 除了有望降低漏诊率外, 还有望提高对微小 IA 的检测能力^[154]。Jin 等^[155]开发的基于 CNN 的 2D-DSA 筛查算法检出最大径 ≤ 3 mm IA 的灵敏度为 74.4%, 检出 > 3 mm IA 的灵敏度为 91.1%。Ueda 等^[156]采用 DL 技术检测 IA, 对内部和外部测试数据集诊断的灵敏度分别为 91% 和 93%, 其中外部数据集来自于 4 个机构, 影像环境、场强和 MRI 设备均不同, 该模型设计严谨且具有普遍适用性。

2. AI 在 IA 影像重建中的应用: 尽管 DSA 技术已趋近成熟, 但在不丢失诊断信息的基础上减少辐射剂量是非常可取的。Lang 等^[157]采用数字减影技术和基于 AI 的算法重建患者三维 DSA (3D angiography, 3DA) 数据集, 通过定量分析发现, 3D-DSA 与 3DA 数据集检测脑血管的直径差异无统计学意义 ($r_{\text{颈内动脉}} = 0.901$; $r_{\text{大脑中动脉 M1 段}} = 0.951$; $r_{\text{基底动脉}} = 0.906$; $r_{\text{大脑后动脉 P1 段}} = 0.991$)。由于 3DA 只需要 1 次增强运行就可以重建类似 DSA 的 3D 体积, 提示 AI 技术可以有效减少辐射剂量。

3. AI 在 IA 影像测量中的应用: 目前基于 DSA、MRA 及 CTA 重建后人工测量仍是 IA 形态学测量最常用的方式。然而不同医生选择的最优工作视角具有主观差异, 可能导致测量结果不同, 这种测量方式与医生的个人经验相关^[158]。而通过 AI 算法自动选取合适的工作角度, 消除人为选择带来的差异, 将有可能解决这一问题。Hernandez 和 Frangi^[159]采用测地活动区法 (geodesic active regions, GAR) 技术分割动脉瘤, 即基于几何可变模型, 结合测量分析动脉瘤表面曲率和查找血管边界的方法对动脉瘤进行分割, 为之后的研究打下基础。Larrabide 等^[160]开发出动脉瘤测量算法模型, 可以自动测量动脉瘤的形态学参数, 提供血管内治疗的方案计划。但是, 这款软件仍然需要人工标注瘤颈位置来分割动脉瘤与载瘤动脉, 未做到完全智能化。Geng 等^[26]研发计

计算机辅助半自动化测量方法,分别对 $\leq 5\text{ mm}$ 、 $> 5 \sim 15\text{ mm}$ 、 $> 15 \sim 25\text{ mm}$ 、 $> 25\text{ mm}$ 的动脉瘤模体进行多次形态学测量,以人工测量作为对照,发现该测量法得到的结果更接近模体的真实值($CCC = 1.000$),误差更小。

4. AI 在影像融合中的应用:不同模态下的动脉瘤影像结果有差异且单一影像显示有其局限性,为了在一张影像上既显示病变的解剖结构又显示其功能,就需要将 2 种或多种影像叠加融合,此过程中关键的步骤是将多模态影像数据进行配准。Balakrishnan 等^[161]基于 CNN 算法构建了一套用于进行影像数据模态融合的框架体系——无监督的神经网络算法 VoxelMorph,改善了传统的配准方法速度慢、需要大量的标注信息的缺点,该模型应用于脑功能区及病灶勾画。Geng 等^[162]针对 IA 的影像数据开发了三维配准融合技术,将随访期动脉瘤与初始期动脉瘤形态融合判断其变化,并在 108 例 IA 患者中进行了准确度的验证,显示该算法的灵敏度和特异度分别是 94.44% 和 94.29%。

5. AI 在 IA 稳定性评估及治疗中的应用:临床实践中,对于稳定性 IA 一般行随访治疗,不稳定性 IA 行手术治疗。Silva 等^[163]采用随机森林、线性支持向量机及高斯核函数三种算法对 845 个 IA 数据进行稳定性预测,模型的曲线下面积(AUC)分别为 0.81、0.77、0.78。Liu 等^[164]收集了 2 000 余例 UIAs 患者的临床和影像学信息,应用 AI 技术训练了一款评估 IA 稳定性的软件,准确率为 86.7%,明显高于医生独立评估组的 70% ($P < 0.05$)。

AI 技术在术前模拟中应用的相关文献较少,通常针对 AI 辅助治疗研究的侧重点是治疗材料的选择及预测血管内治疗后 IA 的即刻闭塞情况。Wang 等^[165]以 DSA 为基础,利用 AI 软件模拟了 29 例 IA 患者 FD 置入后的效果,并与 FD 实际置入后的效果对比。结果发现,算法推荐 FD 置入的准确度为 96.6%,且 FD 的置入位置、贴壁性良好。支架辅助弹簧圈模拟系统可以重建 IA 三维结构,并结合动脉瘤及载瘤动脉的形态学特征,模拟出支架放置的位置及使用支架的型号,通过该系统的模拟训练,可以有效缩短手术时间[100 min (95% CI: 85 ~ 125 min) 对比 118 min (95% CI: 90 ~ 140 min)]^[166]。Regli 等^[167]通过对动脉瘤夹闭治疗训练仿真系统评估发现,大多数术者认为该模型能很好地模拟动脉瘤夹闭过程,夹闭的难度与真实手术情况相当,证实了其有效性。

近年来,应用计算机 3D 打印技术可以构建动脉瘤 3D 模型,为医生开展手术提供便利^[168]。在动脉瘤栓塞术中,应用 3D 打印技术可以更加准确、直观地掌握脑血管的解剖特点,顺利完成手术,降低术后并发症的发生风险。然而,3D 打印技术准备的血管模型无法再现导管在体内的实际曲线,且耗时较长,不适用于 RIAs 的急诊手术^[169-170]。

与 3D 打印模拟技术的临床应用尚处于研究阶段不同,AI 技术在动脉瘤弹簧圈栓塞术中的微导管个性化塑形中的作用已取得验证,并初步应用于临床。在 2021 年开展的一项中国前瞻性、多中心、随机对照临床研究中,医生应用 UKNOW® 软件(2022 年通过国家药品监督管理局审批)对动脉瘤进行三维重建、精准分割、形态学自动测量,并自动设计微导管塑形形态,完成个性化塑形。结果显示,微导管一次性到位率高达 96.0%,明显提高了手术成功率^[171]。在临床应用过程中,该软件可搭配自动化塑形设备在术中完成一次性微导管塑形器的个性化塑形。Liu 等^[172]的一项前瞻性队列研究中,应用 AI 技术辅助微导管塑形,术中微导管均一次到位,且弹簧圈输送过程中微导管的稳定性令人满意,未发生踢管、二次塑形事件,为手术提供了良好的技术支持。在另一项单中心随机对照研究中,手术独立操作年限 ≤ 5 年的神经介入医生在 AI 软件的辅助下完成微导管塑形,其微导管一次到位率为 94.4%,而对照组即传统手工塑形组的一次到位率仅为 50.0% ($P = 0.002$)。提示,AI 技术可以辅助年轻医生有效提升微导管塑形的效果,缩短学习曲线,提高手术的安全性和有效性^[173]。

推荐意见:(1)AI 技术在 IA 筛查中具有一定应用价值,但临床尚未广泛开展(1 级推荐,C 级证据)。(2)AI 技术在 IA 的影像融合、重建、分割、测量及稳定性评估中均有应用价值(1 级推荐,C 级证据)。(3)AI 技术应用于微导管个性化塑形的实施已通过验证并初步应用于临床(1 级推荐,B 级证据)。

共同执笔 耿介文(首都医科大学宣武医院)、王思敏(首都医科大学宣武医院)、张彤宇(首都医科大学宣武医院)、吉喆(首都医科大学宣武医院)、翟晓东(山东省立医院)、赵执(首都医科大学宣武医院)、李静伟(首都医科大学宣武医院)、张鸿祺(首都医科大学宣武医院)

指南专家组成员(按姓氏汉语拼音排序) 白小欣(广东省中医院)、蔡艺灵(解放军战略支援

部队总医院)、曹文锋(江西省人民医院)、曹毅(昆明医科大学第二附属医院)、柴尔青(甘肃省人民医院)、陈锬(厦门大学附属中山医院)、陈风华(中南大学湘雅医院)、陈文伙(福建省漳州市医院)、陈左权(上海市第十人民医院)、程道宾(广西医科大学第一附属医院)、戴琳孙(福建医科大学附属第一医院)、杜德坤(广州市红十字会医院)、段传志(南方医科大学珠江医院)、范一木(天津市环湖医院)、顾宇翔(复旦大学附属华山医院)、管生(郑州大学第一附属医院)、何川(首都医科大学宣武医院)、洪波(上海市第一人民医院)、洪韬(首都医科大学宣武医院)、胡鹏(首都医科大学宣武医院)、胡伟(中国科学技术大学第一附属医院)、黄昌仁(西南医科大学附属医院)、黄德俊(宁夏医科大学总医院)、黄理金(南方医科大学第三附属医院)、江涛(安徽医科大学第四附属医院)、姜长春(包头市中心医院)、焦力群(首都医科大学宣武医院)、康德智(福建医科大学附属第一医院)、李桂林(首都医科大学宣武医院)、李明昌(湖北省人民医院)、李天晓(河南省人民医院)、李永利(哈尔滨医科大学附属第二医院)、李佑祥(首都医科大学附属北京天坛医院)、李则群(温州医科大学附属第一医院)、李真保(皖南医学院第一附属医院)、梁旭光(赤峰市医院)、刘加春(首都医科大学三博脑科医院)、刘建民(海军军医大学第一附属医院)、刘圣(江苏省人民医院)、刘增品(河北医科大学第二医院)、买买提力·艾沙(新疆医科大学第一附属医院)、毛国华(南昌大学第二附属医院)、缪中荣(首都医科大学附属北京天坛医院)、南光贤(吉林大学中日联谊医院)、潘力(解放军中部战区总医院)、彭亚(常州市第一人民医院)、任军(兰州大学第二医院)、任少华(山西省人民医院)、石忠松(中山大学孙逸仙纪念医院)、史怀璋(哈尔滨医科大学附属第一医院)、宋冬雷(上海冬雷脑科医院)、孙军(温州市中心医院)、孙力泳(首都医科大学宣武医院)、孙钦建(山东省立医院)、万杰清(上海交通大学医学院附属仁济医院)、万曙(浙江医院)、汪雷(宜昌市中心人民医院)、汪阳(首都医科大学附属北京朝阳医院)、汪银洲(福建省立医院)、王大明(北京医院)、王东海(山东大学齐鲁医院)、王峰(大连医科大学附属第一医院)、王宏磊(吉林大学白求恩第一医院)、王君(解放军总医院第一医学中心)、温昌明(南阳市中心医院)、翁国虎(广东省中医院海南医院)、吴红星(新疆维吾尔自治区人

民医院)、吴科学(西藏自治区人民医院)、夏鹰(海口市人民医院)、向欣(贵州医科大学附属第一医院)、肖福顺(天津医科大学总医院)、谢晓东(四川大学华西医院)、徐国栋(河北省人民医院)、徐翔(唐山市工人医院)、许璟(浙江大学医学院附属第二医院)、杨少春(赣南医科大学第一附属医院)、杨伟(山东省立医院)、杨新健(首都医科大学附属北京天坛医院)、姚声涛(遵义医科大学附属医院)、叶明(首都医科大学宣武医院)、于加省(华中科技大学同济医学院附属同济医院)、于建军(临沂市人民医院)、喻博(中国医科大学附属盛京医院)、喻孟强(中南大学湘雅二医院)、张桂莲(西安交通大学第二附属医院)、张鸿祺(首都医科大学宣武医院)、张继方(青岛市立医院)、张猛(解放军陆军特色医学中心)、张鹏(首都医科大学宣武医院)、张品元(河北医科大学第三医院)、张庆荣(南京鼓楼医院)、张天(四川省人民医院)、张晓龙(复旦大学附属华山医院)、张占普(内蒙古医科大学附属医院)、赵沃华(华中科技大学同济医学院附属协和医院)、赵振伟(空军军医大学第二附属医院)、郑伟良(浙江大学医学院附属邵逸夫医院)、钟书(广西壮族自治区人民医院)、周斌(中山大学附属第五医院)、朱刚(陆军军医大学西南医院)、朱良付(河南省人民医院)

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

- [1] Juvela S. Prevalence of and risk factors for intracranial aneurysms [J]. *Lancet Neurol*, 2011,10(7):595-597. DOI: 10.1016/S1474-4422(11)70125-9.
- [2] Vlak MH, Algra A, Brandenburg R, et al. Prevalence of unruptured intracranial aneurysms, with emphasis on sex, age, comorbidity, country, and time period: a systematic review and meta-analysis[J]. *Lancet Neurol*, 2011,10(7):626-636. DOI: 10.1016/S1474-4422(11)70109-0.
- [3] Li MH, Chen SW, Li YD, et al. Prevalence of unruptured cerebral aneurysms in Chinese adults aged 35 to 75 years: a cross-sectional study[J]. *Ann Intern Med*, 2013,159(8):514-521. DOI: 10.7326/0003-4819-159-8-201310150-00004.
- [4] van Gijn J, Kerr RS, Rinkel GJ. Subarachnoid haemorrhage [J]. *Lancet*, 2007,369(9558):306-318. DOI: 10.1016/S0140-6736(07)60153-6.
- [5] Lawton MT, Vates GE. Subarachnoid hemorrhage[J]. *N Engl J Med*, 2017,377(3):257-266. DOI: 10.1056/NEJMcpl605827.
- [6] 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. DOI: 10.1016/S1474-4422(09)70126-7.
- [7] International Study of Unruptured Intracranial Aneurysms Investigators. Unruptured intracranial aneurysms--risk of rupture and risks of surgical intervention[J]. *N Engl J Med*, 1998,339(24):1725-1733. DOI: 10.1056/NEJMI199812103392401.

- [8] Sailer AM, Wagemans BA, Nelemans PJ, et al. Diagnosing intracranial aneurysms with MR angiography: systematic review and meta-analysis[J]. *Stroke*, 2014, 45 (1): 119-126. DOI: 10.1161/STROKEAHA.113.003133.
- [9] Li MH, Cheng YS, Li YD, et al. Large-cohort comparison between three-dimensional time-of-flight magnetic resonance and rotational digital subtraction angiographies in intracranial aneurysm detection[J]. *Stroke*, 2009, 40(9): 3127-3129. DOI: 10.1161/STROKEAHA.109.553800.
- [10] Mine B, Pezzullo M, Roque G, et al. Detection and characterization of unruptured intracranial aneurysms: comparison of 3T MRA and DSA[J]. *J Neuroradiol*, 2015, 42(3): 162-168. DOI: 10.1016/j.neurad.2014.08.002.
- [11] Werner MJ, van Walderveen MA, Garpebring A, et al. 7Tesla MRA for the differentiation between intracranial aneurysms and infundibula[J]. *Magn Reson Imaging*, 2017, 37: 16-20. DOI: 10.1016/j.mri.2016.11.006.
- [12] Cirillo M, Scomazzoni F, Cirillo L, et al. Comparison of 3D TOF-MRA and 3D CE-MRA at 3T for imaging of intracranial aneurysms[J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82(12): e853-859. DOI: 10.1016/j.ejrad.2013.08.052.
- [13] Perry JJ, Stiell IG, Sivilotti ML, et al. Sensitivity of computed tomography performed within six hours of onset of headache for diagnosis of subarachnoid haemorrhage: prospective cohort study[J]. *BMJ*, 2011, 343: d4277. DOI: 10.1136/bmj.d4277.
- [14] Sames TA, Storrow AB, Finkelstein JA, et al. Sensitivity of new-generation computed tomography in subarachnoid hemorrhage[J]. *Acad Emerg Med*, 1996, 3(1): 16-20. DOI: 10.1111/j.1553-2712.1996.tb03296.x.
- [15] Menke J, Larsen J, Kallenberg K. Diagnosing cerebral aneurysms by computed tomographic angiography: meta-analysis[J]. *Ann Neurol*, 2011, 69(4): 646-654. DOI: 10.1002/ana.22270.
- [16] Hirai T, Korogi Y, Ono K, et al. Preoperative evaluation of intracranial aneurysms: usefulness of intraarterial 3D CT angiography and conventional angiography with a combined unit-initial experience[J]. *Radiology*, 2001, 220(2): 499-505. DOI: 10.1148/radiology.220.2.r01au20499.
- [17] D'Argento F, Pedicelli A, Ciardi C, et al. Intra- and inter-observer variability in intracranial aneurysm segmentation: comparison between CT angiography (semi-automated segmentation software stroke VCAR) and digital subtraction angiography (3D rotational angiography)[J]. *Radiol Med*, 2021, 126(3): 484-493. DOI: 10.1007/s11547-020-01275-y.
- [18] Wang X, Benson JC, Jagadeesan B, et al. Giant cerebral aneurysms: comparing CTA, MRA, and digital subtraction angiography assessments[J]. *J Neuroimaging*, 2020, 30(3): 335-341. DOI: 10.1111/jon.12712.
- [19] Wang H, Li W, He H, et al. 320-detector row CT angiography for detection and evaluation of intracranial aneurysms: comparison with conventional digital subtraction angiography[J]. *Clin Radiol*, 2013, 68(1): e15-e20. DOI: 10.1016/j.crad.2012.09.001.
- [20] Sagara Y, Kiyosue H, Hori Y, et al. Limitations of three-dimensional reconstructed computerized tomography angiography after clip placement for intracranial aneurysms[J]. *J Neurosurg*, 2005, 103(4): 656-661. DOI: 10.3171/jns.2005.103.4.0656.
- [21] Abe T, Hirohata M, Tanaka N, et al. Clinical benefits of rotational 3D angiography in endovascular treatment of ruptured cerebral aneurysm[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2002, 23(4): 686-688.
- [22] Falk KL, Schafer S, Speidel MA, et al. 4D-DSA: development and current neurovascular applications[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2021, 42(2): 214-220. DOI: 10.3174/ajnr.A6860.
- [23] Manninen AL, Isokangas JM, Karttunen A, et al. A comparison of radiation exposure between diagnostic CTA and DSA examinations of cerebral and cervicocerebral vessels[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2012, 33(11): 2038-2042. DOI: 10.3174/ajnr.A3123.
- [24] Aaron JO, Hesselink JR, Oot R, et al. Complications of intravenous DSA performed for carotid artery disease: a prospective study[J]. *Radiology*, 1984, 153(3): 675-678. DOI: 10.1148/radiology.153.3.6387790.
- [25] Takano K, Yamashita S, Takemoto K, et al. MRI of intracranial vertebral artery dissection: evaluation of intramural haematoma using a black blood, variable-flip-angle 3D turbo spin-echo sequence[J]. *Neuroradiology*, 2013, 55(7): 845-851. DOI: 10.1007/s00234-013-1183-4.
- [26] Geng J, Hu P, Ji Z, et al. Accuracy and reliability of computer-assisted semi-automated morphological analysis of intracranial aneurysms: an experimental study with digital phantoms and clinical aneurysm cases[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2020, 15(10): 1749-1759. DOI: 10.1007/s11548-020-02218-8.
- [27] Baharoglu MI, Lauric A, Gao BL, et al. Identification of a dichotomy in morphological predictors of rupture status between sidewall- and bifurcation-type intracranial aneurysms[J]. *J Neurosurg*, 2012, 116(4): 871-881. DOI: 10.3171/2011.11.JNS11311.
- [28] Lauric A, Miller EL, Baharoglu MI, et al. 3D shape analysis of intracranial aneurysms using the writhe number as a discriminant for rupture[J]. *Ann Biomed Eng*, 2011, 39(5): 1457-1469. DOI: 10.1007/s10439-010-0241-x.
- [29] Zhai XD, Yu JX, Li CJ, et al. Morphological characteristics of pericallosal artery aneurysms and their high propensity for rupture[J]. *World Neurosurg*, 2020, 133: e320-e326. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.09.003.
- [30] Dhar S, Tremmel M, Mocco J, et al. Morphology parameters for intracranial aneurysm rupture risk assessment[J]. *Neurosurgery*, 2008, 63(2): 185-196; discussion 196-197. DOI: 10.1227/01.NEU.0000316847.64140.81.
- [31] 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. DOI: 10.1161/STROKEAHA.109.570770.
- [32] Xu WD, Wang H, Wu Q, et al. Morphology parameters for rupture in middle cerebral artery mirror aneurysms[J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12(9): 858-861. DOI: 10.1136/neurintsurg-2019-015620.
- [33] Li M, Hu S, Yu N, et al. Association between meteorological factors and the rupture of intracranial aneurysms[J]. *J Am Heart Assoc*, 2019, 8(17): e012205. DOI: 10.1161/JAHA.119.012205.
- [34] Ujiie H, Tamano Y, Sasaki K, et al. Is the aspect ratio a reliable index for predicting the rupture of a saccular aneurysm? [J]. *Neurosurgery*, 2001, 48(3): 495-502; discussion 502-503. DOI: 10.1097/00006123-200103000-00007.
- [35] Jaja BN, Lingsma H, Steyerberg EW, et al. Neuroimaging characteristics of ruptured aneurysm as predictors of outcome after aneurysmal subarachnoid hemorrhage: pooled analyses of the SAHIT cohort[J]. *J Neurosurg*, 2016, 124(6): 1703-1711. DOI: 10.3171/2015.4.JNS142753.
- [36] Rajabzadeh-Oghaz H, Varble N, Shallwani H, et al. Computer-assisted three-dimensional morphology evaluation of intracranial aneurysms[J]. *World Neurosurg*, 2018, 119: e541-e550. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.07.208.
- [37] Wiebers DO, Whisnant JP, Huston J 3rd, et al. Unruptured intracranial aneurysms: natural history, clinical outcome, and

- risks of surgical and endovascular treatment[J]. *Lancet*, 2003, 362 (9378): 103-110. DOI: 10. 1016/s0140-6736 (03) 13860-3.
- [38] Backes D, Vergouwen MD, Tiel Groenestege AT, et al. PHASES score for prediction of intracranial aneurysm growth[J]. *Stroke*, 2015, 46 (5): 1221-1226. DOI: 10. 1161/STROKEAHA. 114. 008198.
- [39] Bor AS, Tiel Groenestege AT, terBrugge KG, et al. Clinical, radiological, and flow-related risk factors for growth of untreated, unruptured intracranial aneurysms[J]. *Stroke*, 2015, 46 (1): 42-48. DOI: 10. 1161/STROKEAHA. 114. 005963.
- [40] Qiu T, Jin G, Xing H, et al. Association between hemodynamics, morphology, and rupture risk of intracranial aneurysms: a computational fluid modeling study[J]. *Neurol Sci*, 2017, 38 (6): 1009-1018. DOI: 10. 1007/s10072-017-2904-y.
- [41] Tremmel M, Dhar S, Levy 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): 622-630; discussion 630-631. DOI: 10. 1227/01.NEU.0000341529. 11231. 69.
- [42] Tominari S, Morita A, Ishibashi T, et al. Prediction model for 3-year rupture risk of unruptured cerebral aneurysms in Japanese patients[J]. *Ann Neurol*, 2015, 77 (6): 1050-1059. DOI: 10. 1002/ana. 24400.
- [43] Kleinloog R, de Mul N, Verweij BH, et al. Risk factors for intracranial aneurysm rupture: a systematic review [J]. *Neurosurgery*, 2018, 82 (4): 431-440. DOI: 10. 1093/neuros/nyx238.
- [44] Björkman J, Frösen J, Tähtinen O, et al. Irregular shape identifies ruptured intracranial aneurysm in subarachnoid hemorrhage patients with multiple aneurysms[J]. *Stroke*, 2017, 48 (7): 1986-1989. DOI: 10. 1161/STROKEAHA. 117. 017147.
- [45] Cebal JR, Mut F, Weir J, et al. Association of hemodynamic characteristics and cerebral aneurysm rupture[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32 (2): 264-270. DOI: 10. 3174/ajnr. A2274.
- [46] Byrne G, Mut F, Cebal J. Quantifying the large-scale hemodynamics of intracranial aneurysms [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2014, 35 (2): 333-338. DOI: 10. 3174/ajnr. A3678.
- [47] Kulcsár Z, Ugron A, Marosfoi M, et al. Hemodynamics of cerebral aneurysm initiation: the role of wall shear stress and spatial wall shear stress gradient[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32 (3): 587-594. DOI: 10. 3174/ajnr. A2339.
- [48] Zhou G, Zhu Y, Yin Y, et al. Association of wall shear stress with intracranial aneurysm rupture: systematic review and meta-analysis[J]. *Sci Rep*, 2017, 7 (1): 5331. DOI: 10. 1038/s41598-017-05886-w.
- [49] Shojima M, Nemoto S, Morita A, et al. Role of shear stress in the blister formation of cerebral aneurysms[J]. *Neurosurgery*, 2010, 67 (5): 1268-1274; discussion 1274-1275. DOI: 10. 1227/NEU. 0b013e3181f2442.
- [50] Penn DL, Komotar RJ, Sander Connolly E. Hemodynamic mechanisms underlying cerebral aneurysm pathogenesis [J]. *J Clin Neurosci*, 2011, 18 (11): 1435-1438. DOI: 10. 1016/j.jocn. 2011. 05. 001.
- [51] Boussel L, Rayz V, McCulloch C, et al. Aneurysm growth occurs at region of low wall shear stress: patient-specific correlation of hemodynamics and growth in a longitudinal study [J]. *Stroke*, 2008, 39 (11): 2997-3002. DOI: 10. 1161/STROKEAHA. 108. 521617.
- [52] Soldozy S, Norat P, Elsarrag M, et al. The biophysical role of hemodynamics in the pathogenesis of cerebral aneurysm formation and rupture [J]. *Neurosurg Focus*, 2019, 47 (1): E11. DOI: 10. 3171/2019. 4. FOCUS19232.
- [53] Can A, Du R. Association of hemodynamic factors with intracranial aneurysm formation and rupture: systematic review and meta-analysis [J]. *Neurosurgery*, 2016, 78 (4): 510-520. DOI: 10. 1227/NEU. 0000000000001083.
- [54] 黄正威, 龙霄翱, 黄海飞, 等. 影响颅内动脉瘤形成及破裂的血流动力学和高血压因素研究进展[J]. *中国脑血管病杂志*, 2022, 19 (5): 356-360. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-5921. 2022. 05. 010.
- [55] 孔繁毅, 史怀璋. 颅内动脉瘤破裂风险形态学与血流动力学预测因素的研究进展[J]. *中国脑血管病杂志*, 2021, 18 (5): 334-338, 343. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-5921. 2021. 05. 009.
- [56] 任国荣, 祝树森, 于良宁, 等. 颅内动脉瘤的血流动力学研究综述[J]. *医疗卫生装备*, 2020, 41 (6): 99-102, 105. DOI: 10. 19745/j. 1003-8868. 2020144.
- [57] Qin H, Yang Q, Zhuang Q, et al. Morphological and hemodynamic parameters for middle cerebral artery bifurcation aneurysm rupture risk assessment[J]. *J Korean Neurosurg Soc*, 2017, 60 (5): 504-510. DOI: 10. 3340/jkns. 2017. 0101. 009.
- [58] Han P, Jin D, Wei W, et al. The prognostic effects of hemodynamic parameters on rupture of intracranial aneurysm: a systematic review and meta-analysis [J]. *Int J Surg*, 2021, 86: 15-23. DOI: 10. 1016/j. ijsu. 2020. 12. 012.
- [59] Long Y, Zhong J, Yu H, et al. A scaling aneurysm model-based approach to assessing the role of flow pattern and energy loss in aneurysm rupture prediction [J]. *J Transl Med*, 2015, 13: 311. DOI: 10. 1186/s12967-015-0673-z.
- [60] Qian Y, Takao H, Umezumi M, et al. Risk analysis of unruptured aneurysms using computational fluid dynamics technology: preliminary results [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32 (10): 1948-1955. DOI: 10. 3174/ajnr. A2655.
- [61] Hu P, Qian Y, Lee CJ, et al. The energy loss may predict rupture risks of anterior communicating aneurysms: a preliminary result[J]. *Int J Clin Exp Med*, 2015, 8 (3): 4128-4133.
- [62] Xiang J, Natarajan SK, Tremmel M, et al. Hemodynamic-morphologic discriminants for intracranial aneurysm rupture[J]. *Stroke*, 2011, 42 (1): 144-152. DOI: 10. 1161/STROKEAHA. 110. 592923.
- [63] Xu J, Yu Y, Wu X, et al. Morphological and hemodynamic analysis of mirror posterior communicating artery aneurysms[J]. *PLoS One*, 2013, 8 (1): e55413. DOI: 10. 1371/journal.pone. 0055413.
- [64] Chen H, Selimovic A, Thompson H, et al. Investigating the influence of haemodynamic stimuli on intracranial aneurysm inception[J]. *Ann Biomed Eng*, 2013, 41 (7): 1492-1504. DOI: 10. 1007/s10439-013-0794-6.
- [65] Sugiyama S, Niizuma K, Nakayama T, et al. Relative residence time prolongation in intracranial aneurysms: a possible association with atherosclerosis[J]. *Neurosurgery*, 2013, 73 (5): 767-776. DOI: 10. 1227/NEU. 0000000000000096.
- [66] Perera R, Isoda H, Ishiguro K, et al. Assessing the risk of intracranial aneurysm rupture using morphological and hemodynamic biomarkers evaluated from magnetic resonance fluid dynamics and computational fluid dynamics [J]. *Magn Reson Med Sci*, 2020, 19 (4): 333-344. DOI: 10. 2463/mrms. mp. 2019-0107.
- [67] Lee UY, Kwak HS. Analysis of morphological-hemodynamic risk factors for aneurysm rupture including a newly introduced total volume ratio[J]. *J Pers Med*, 2021, 11 (8): 744. DOI: 10. 3390/jpm11080744.
- [68] Liu Q, Zhang Y, Yang J, et al. The relationship of morphological-hemodynamic characteristics, inflammation, and remodeling of aneurysm wall in unruptured intracranial aneurysms [J]. *Transl Stroke Res*, 2022, 13 (1): 88-99. DOI: 10. 1007/s12975-021-00917-1.
- [69] Dieleman N, van der Kolk AG, Zwanenburg JJ, et al. Imaging intracranial vessel wall pathology with magnetic resonance

- imaging; current prospects and future directions [J]. *Circulation*, 2014, 130 (2): 192-201. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.113.006919.
- [70] Matouk CC, Mandell DM, Günel M, et al. Vessel wall magnetic resonance imaging identifies the site of rupture in patients with multiple intracranial aneurysms; proof of principle [J]. *Neurosurgery*, 2013, 72 (3): 492-496; discussion 496. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31827d1012.
- [71] Chalouhi N, Hoh BL, Hasan D. Review of cerebral aneurysm formation, growth, and rupture [J]. *Stroke*, 2013, 44 (12): 3613-3622. DOI: 10.1161/STROKEAHA.113.002390.
- [72] Edjlali M, Gentric JC, Régent-Rodriguez C, et al. Does aneurysmal wall enhancement on vessel wall MRI help to distinguish stable from unstable intracranial aneurysms? [J]. *Stroke*, 2014, 45 (12): 3704-3706. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.006626.
- [73] Wu XB, Zhong JL, Wang SW, et al. Circumferential wall enhancement with contrast ratio measurement in unruptured intracranial aneurysm for aneurysm instability [J]. *Brain Behav*, 2022, 12 (5): e2568. DOI: 10.1002/brb3.2568.
- [74] Hu P, Yang Q, Wang DD, et al. Wall enhancement on high-resolution magnetic resonance imaging may predict an unsteady state of an intracranial saccular aneurysm [J]. *Neuroradiology*, 2016, 58 (10): 979-985. DOI: 10.1007/s00234-016-1729-3.
- [75] Wu XB, Zhong JL, Wang SW, et al. Neutrophil-to-lymphocyte ratio is associated with circumferential wall enhancement of unruptured intracranial aneurysm [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 879882. DOI: 10.3389/fneur.2022.879882.
- [76] Wu XB, Wu YT, Guo XX, et al. Circular RNA hsa_circ_0007990 as a blood biomarker for unruptured intracranial aneurysm with aneurysm wall enhancement [J]. *Front Immunol*, 2022, 13: 1061592. DOI: 10.3389/fimmu.2022.1061592.
- [77] Castle-Kirsbaum M, Maingard J, Lim RP, et al. Four-dimensional magnetic resonance imaging assessment of intracranial aneurysms: a state-of-the-art review [J]. *Neurosurgery*, 2020, 87 (3): 453-465. DOI: 10.1093/neuros/nyaa021.
- [78] Futami K, Uno T, Misaki K, et al. Identification of vortex cores in cerebral aneurysms on 4D flow MRI [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40 (12): 2111-2116. DOI: 10.3174/ajnr.A6322.
- [79] Brina O, Bouillot P, Reymond P, et al. How flow reduction influences the intracranial aneurysm occlusion: a prospective 4D phase-contrast MRI study [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40 (12): 2117-2123. DOI: 10.3174/ajnr.A6312.
- [80] Zhang J, Li X, Zhao B, et al. Irregular pulsation of aneurysmal wall is associated with symptomatic and ruptured intracranial aneurysms [J]. *J Neurointerv Surg*, 2023, 15 (1): 91-96. DOI: 10.1136/neurintsurg-2021-018381.
- [81] Dettle S, Compter A, Labeyrie MA, et al. Epidemiology, pathophysiology, diagnosis, and management of intracranial artery dissection [J]. *Lancet Neurol*, 2015, 14 (6): 640-654. DOI: 10.1016/S1474-4422(15)00009-5.
- [82] Han M, Rim NJ, Lee JS, et al. Feasibility of high-resolution MR imaging for the diagnosis of intracranial vertebrobasilar artery dissection [J]. *Eur Radiol*, 2014, 24 (12): 3017-3024. DOI: 10.1007/s00330-014-3296-5.
- [83] Kanoto M, Hosoya T. Diagnosis of intracranial artery dissection [J]. *Neurol Med Chir (Tokyo)*, 2016, 56 (9): 524-533. DOI: 10.2176/nmc.ra.2015-0294.
- [84] Yoshimoto Y, Wakai S. Unruptured intracranial vertebral artery dissection. Clinical course and serial radiographic images [J]. *Stroke*, 1997, 28 (2): 370-374. DOI: 10.1161/01.str.28.2.370.
- [85] Abe M, Tabuchi K, Yokoyama H, et al. Blood blisterlike aneurysms of the internal carotid artery [J]. *J Neurosurg*, 1998, 89 (3): 419-424. DOI: 10.3171/jns.1998.89.3.0419.
- [86] Peschillo S, Cannizzaro D, Caporlingua A, et al. A systematic review and meta-analysis of treatment and outcome of blister-like aneurysms [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2016, 37 (5): 856-861. DOI: 10.3174/ajnr.A4606.
- [87] Gonzalez AM, Narata AP, Yilmaz H, et al. Blood blister-like aneurysms: single center experience and systematic literature review [J]. *Eur J Radiol*, 2014, 83 (1): 197-205. DOI: 10.1016/j.ejrad.2013.09.017.
- [88] Zhao Y, Zhang Q, Wang S, et al. Comparison of radiological and clinical characteristics between blood blister-like aneurysms (BBAs) and non-blister aneurysms at the supraclinoid segment of internal carotid artery [J]. *Neurosurg Rev*, 2019, 42 (2): 549-557. DOI: 10.1007/s10143-018-1002-9.
- [89] Henkes H, Bose A, Felber S, et al. Endovascular coil occlusion of intracranial aneurysms assisted by a novel self-expandable nitinol microstent (neuroform) [J]. *Interv Neuroradiol*, 2002, 8 (2): 107-119. DOI: 10.1177/159101990200800202.
- [90] Heran NS, Song JK, Namba K, et al. The utility of DynaCT in neuroendovascular procedures [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2006, 27 (2): 330-332.
- [91] Irie K, Murayama Y, Saguchi T, et al. Dynact soft-tissue visualization using an angiographic C-arm system: initial clinical experience in the operating room [J]. *Neurosurgery*, 2008, 62 (3 Suppl 1): 266-272; discussion 272. DOI: 10.1227/01.neu.0000317403.23713.92.
- [92] Jang IK, Tearney GJ, MacNeill B, et al. In vivo characterization of coronary atherosclerotic plaque by use of optical coherence tomography [J]. *Circulation*, 2005, 111 (12): 1551-1555. DOI: 10.1161/01.CIR.0000159354.43778.69.
- [93] Ughi GJ, Marosfoi MG, King RM, et al. A neurovascular high-frequency optical coherence tomography system enables in situ cerebrovascular volumetric microscopy [J]. *Nat Commun*, 2020, 11 (1): 3851. DOI: 10.1038/s41467-020-17702-7.
- [94] Yang B, Feng Y, Ma Y, et al. Frequency-domain optical coherence tomography for intracranial atherosclerotic stenosis: feasibility, safety, and preliminary experience [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 678443. DOI: 10.3389/fneur.2021.678443.
- [95] Yan Y, Kaderali Z, Chowdhury T, et al. Feasibility of intraoperative MRI for endovascular coiling of intracranial aneurysms: a single centre experience [J]. *Interv Neuroradiol*, 2023, 29 (5): 520-524. DOI: 10.1177/15910199221100962.
- [96] Iosif C, Camilleri Y, Saleme S, et al. Diffusion-weighted imaging-detected ischemic lesions associated with flow-diverting stents in intracranial aneurysms: safety, potential mechanisms, clinical outcome, and concerns [J]. *J Neurosurg*, 2015, 122 (3): 627-636. DOI: 10.3171/2014.10.JNS132566.
- [97] Iosif C, Lecomte JC, Pedrolo-Silveira E, et al. Evaluation of ischemic lesion prevalence after endovascular treatment of intracranial aneurysms, as documented by 3-T diffusion-weighted imaging: a 2-year, single-center cohort study [J]. *J Neurosurg*, 2018, 128 (4): 982-991. DOI: 10.3171/2016.11.JNS161020.
- [98] Wang J, Jia L, Yang X, et al. Outcomes in symptomatic patients with vertebrobasilar dolichoectasia following endovascular treatment [J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 610. DOI: 10.3389/fneur.2019.00610.
- [99] 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. 中国颅内未破裂动脉瘤诊疗指南 2021 [J]. *中国脑血管病杂志*, 2021, 18 (9): 634-664. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2021.09.008.
- [100] Menke J, Larsen J, Kallenberg K. Diagnosing cerebral aneurysms by computed tomographic angiography: meta-analysis [J]. *Ann Neurol*, 2011, 69 (4): 646-654. DOI: 10.1002/ana.22270.

- [101] 李文华, 师忠杰, 王占祥, 等. 3D Slicer 三维影像重建在颅内动脉瘤夹闭术中的应用[J]. 中国临床神经外科杂志, 2022, 27(8): 646-649. DOI: 10.13798/j.issn.1009-153X.2022.08.007.
- [102] Tang G, Cawley CM, Dion JE, et al. Intraoperative angiography during aneurysm surgery: a prospective evaluation of efficacy[J]. J Neurosurg, 2002, 96(6): 993-999. DOI: 10.3171/jns.2002.96.6.0993.
- [103] Tani S, Imamura H, Asai K, et al. Comparison of practical methods in clinical sites for estimating cerebral blood flow during balloon test occlusion[J]. J Neurosurg, 2018, 131(5): 1430-1436. DOI: 10.3171/2018.5.JNS18858.
- [104] 伍聪, 骆明涛, 张昌伟, 等. 颈内动脉床旁动脉瘤复合手术的球囊阻断技术分析[J]. 中国脑血管病杂志, 2019, 16(1): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2019.01.003.
- [105] Raabe A, Beck J, Gerlach R, et al. Near-infrared indocyanine green video angiography: a new method for intraoperative assessment of vascular flow[J]. Neurosurgery, 2003, 52(1): 132-139; discussion 139. DOI: 10.1097/00006123-200301000-00017.
- [106] Li J, Lan Z, He M, et al. Assessment of microscope-integrated indocyanine green angiography during intracranial aneurysm surgery: a retrospective study of 120 patients[J]. Neurol India, 2009, 57(4): 453-459. DOI: 10.4103/0028-3886.55607.
- [107] Świątnicki W, Szymański J, Szymańska A, et al. Intraoperative fluorescein video angiography in intracranial aneurysm surgery: single-center, observational cohort study[J]. Acta Neurol Belg, 2021, 121(6): 1487-1493. DOI: 10.1007/s13760-020-01365-8.
- [108] Malinova V, von Eckardstein K, Rohde V, et al. Neuronavigated microvascular Doppler sonography for intraoperative monitoring of blood flow velocity changes during aneurysm surgery - a feasible monitoring technique[J]. Clin Neurol Neurosurg, 2015, 137: 79-82. DOI: 10.1016/j.clineuro.2015.06.021.
- [109] Hostetter J, Miller TR, Gandhi D. Imaging for treated aneurysms (including clipping, coiling, stents, flow diverters)[J]. Neuroimaging Clin N Am, 2021, 31(2): 251-263. DOI: 10.1016/j.nic.2021.01.003.
- [110] Macdonald RL, Wallace MC, Kestle JR. Role of angiography following aneurysm surgery[J]. J Neurosurg, 1993, 79(6): 826-832. DOI: 10.3171/jns.1993.79.6.0826.
- [111] Foley WD, Stonely T. CT angiography of the lower extremities[J]. Radiol Clin North Am, 2010, 48(2): 367-396, ix. DOI: 10.1016/j.rel.2010.02.008.
- [112] Grasso G, Alafaci C, Macdonald RL. Management of aneurysmal subarachnoid hemorrhage: state of the art and future perspectives[J]. Surg Neurol Int, 2017, 8: 11. DOI: 10.4103/2152-7806.198738.
- [113] Ivanidze J, Sanelli PC. Vasospasm: role of imaging in detection and monitoring treatment[J]. Neuroimaging Clin N Am, 2021, 31(2): 147-155. DOI: 10.1016/j.nic.2021.01.004.
- [114] Grieve JP, Stacey R, Moore E, et al. Artefact on MRA following aneurysm clipping: an in vitro study and prospective comparison with conventional angiography[J]. Neuroradiology, 1999, 41(9): 680-686. DOI: 10.1007/s002340050824.
- [115] Kühn AL, Balamí JS, Grunwald IQ. Current management and treatment of cerebral vasospasm complicating SAH[J]. CNS Neurol Disord Drug Targets, 2013, 12(2): 233-241. DOI: 10.2174/1871527311312020010.
- [116] Deb S, Gogos AJ, Drummond KJ, et al. The role of transcranial Doppler ultrasound monitoring in patients with aneurysmal subarachnoid haemorrhage[J]. J Clin Neurosci, 2012, 19(7): 950-955. DOI: 10.1016/j.jocn.2011.12.001.
- [117] Macdonald RL, Wallace MC, Coyne TJ. The effect of surgery on the severity of vasospasm[J]. J Neurosurg, 1994, 80(3): 433-439. DOI: 10.3171/jns.1994.80.3.0433.
- [118] Bonow RH, Young CC, Bass DI, et al. Transcranial Doppler ultrasonography in neurological surgery and neurocritical care[J]. Neurosurg Focus, 2019, 47(6): E2. DOI: 10.3171/2019.9.FOCUS19611.
- [119] Kim HJ, Yoon DY, Kim ES, et al. 256-row multislice CT angiography in the postoperative evaluation of cerebral aneurysms treated with titanium clips: using three-dimensional rotational angiography as the standard of reference[J]. Eur Radiol, 2020, 30(4): 2152-2160. DOI: 10.1007/s00330-019-06560-7.
- [120] van der Schaaf I, van Leeuwen M, Vlassenbroek A, et al. Minimizing clip artifacts in multi CT angiography of clipped patients[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2006, 27(1): 60-66.
- [121] Bier G, Bongers MN, Hempel JM, et al. Follow-up CT and CT angiography after intracranial aneurysm clipping and coiling-improved image quality by iterative metal artifact reduction[J]. Neuroradiology, 2017, 59(7): 649-654. DOI: 10.1007/s00234-017-1855-6.
- [122] Wuest W, May MS, Brand M, et al. Improved image quality in head and neck CT using a 3D iterative approach to reduce metal artifact[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2015, 36(10): 1988-1993. DOI: 10.3174/ajnr.A4386.
- [123] Rost NS, Brodtmann A, Pase MP, et al. Post-stroke cognitive impairment and dementia[J]. Circ Res, 2022, 130(8): 1252-1271. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.122.319951.
- [124] Aubertin M, Jourdain C, Thépenier C, et al. Results of watchful waiting of unruptured intracranial aneurysms in a Western patient population: a single-center cohort[J]. J Neurointerv Surg, 2022, 14(11): 1102-1106. DOI: 10.1136/neurintsurg-2021-018151.
- [125] Weng JC, Wang J, Li H, et al. Aspirin and growth of small unruptured intracranial aneurysm: results of a prospective cohort study[J]. Stroke, 2020, 51(10): 3045-3054. DOI: 10.1161/STROKEAHA.120.029967.
- [126] Geng J, Wang Y, Ji Z, et al. Advantages of 3D registration technology (3DRT) in clinical application of unruptured intracranial aneurysm follow-up: a novel method to judge aneurysm growth[J]. J Neurosurg, 2023, 50(2): 209-216. DOI: 10.1016/j.neurad.2022.08.004.
- [127] Naggara ON, White PM, Guilbert F, et al. Endovascular treatment of intracranial unruptured aneurysms: systematic review and meta-analysis of the literature on safety and efficacy[J]. Radiology, 2010, 256(3): 887-897. DOI: 10.1148/radiol.10091982.
- [128] Schaafsma JD, Koffijberg H, Buskens E, et al. Cost-effectiveness of magnetic resonance angiography versus intra-arterial digital subtraction angiography to follow-up patients with coiled intracranial aneurysms[J]. Stroke, 2010, 41(8): 1736-1742. DOI: 10.1161/STROKEAHA.110.585083.
- [129] Xiang S, Fan F, Hu P, et al. The sensitivity and specificity of TOF-MRA compared with DSA in the follow-up of treated intracranial aneurysms[J]. J Neurointerv Surg, 2021, 13(12): 1172-1179. DOI: 10.1136/neurintsurg-2020-016788.
- [130] Jiang L, He ZH, Zhang XD, et al. Value of noninvasive imaging in follow-up of intracranial aneurysm[J]. Acta Neurochir Suppl, 2011, 110(Pt 2): 227-232. DOI: 10.1007/978-3-7091-0356-2_41.
- [131] Dehdashti AR, Binaghi S, Uske A, et al. Comparison of multislice computerized tomography angiography and digital subtraction angiography in the postoperative evaluation of patients with clipped aneurysms[J]. J Neurosurg, 2006, 104(3): 395-403. DOI: 10.3171/jns.2006.104.3.395.
- [132] 李彬, 汪阳. 静音磁共振血管成像在血管内治疗颅内动脉瘤随访中的应用进展[J]. 中华神经外科杂志, 2022, 38(12): 1285-1288. DOI: 10.3760/cma.j.cn112050-20211218-00597.
- [133] Tan S, Lu Y, Li B, et al. Diagnostic performance of silent

- magnetic resonance angiography for endovascularly-treated intracranial aneurysm follow-up: a prospective study [J]. *J Neurointerv Surg*, 2023, 15 (6): 608-613. DOI: 10.1136/neurintsurg-2022-018726.
- [134] Pierot L, Costalat V, Moret J, et al. Safety and efficacy of aneurysm treatment with WEB; results of the WEBCAST study [J]. *J Neurosurg*, 2016, 124 (5): 1250-1256. DOI: 10.3171/2015.2.JNSI42634.
- [135] Pierot L, Gubucz I, Buhk JH, et al. Safety and efficacy of aneurysm treatment with the WEB; results of the WEBCAST 2 study [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017, 38 (6): 1151-1155. DOI: 10.3174/ajnr.A5178.
- [136] Pierot L, Szikora I, Barreau X, et al. Aneurysm treatment with the Woven EndoBridge (WEB) device in the combined population of two prospective, multicenter series: 5-year follow-up [J]. *J Neurointerv Surg*, 2023, 15 (6): 552-557. DOI: 10.1136/neurintsurg-2021-018414.
- [137] Ozpeynirci Y, Braun M, Schmitz B. CT Angiography in occlusion assessment of intracranial aneurysms treated with the WEB device [J]. *J Neuroimaging*, 2019, 29 (4): 481-486. DOI: 10.1111/jon.12622.
- [138] Algin O, Yuce G, Koc U, et al. A comparison between the CS-TOF and the CTA/DSA for WEB device management [J]. *Interv Neuroradiol*, 2022, 28 (1): 29-42. DOI: 10.1177/15910199211014708.
- [139] Saqib R, Wuppalapati S, Sonwalkar H, et al. Can further subdivision of the Raymond-Roy classification of intracranial aneurysms be useful in predicting recurrence and need for future retreatment following endovascular coiling? [J]. *Surg Neurol Int*, 2022, 13: 170. DOI: 10.25259/SNI_991_2021.
- [140] O'Kelly CJ, Krings T, Fiorella D, et al. A novel grading scale for the angiographic assessment of intracranial aneurysms treated using flow diverting stents [J]. *Interv Neuroradiol*, 2010, 16 (2): 133-137. DOI: 10.1177/159101991001600204.
- [141] 中国医师协会神经外科医师分会神经介入专业委员会, 中国医师协会介入医师分会神经介入专业委员会. 血流导向装置治疗颅内动脉瘤中国指南 [J]. *中华神经外科杂志*, 2022, 38 (5): 433-441. DOI: 10.3760/cma.j.cn112050-20220117-00036.
- [142] Kamran M, Yarnold J, Grunwald IQ, et al. Assessment of angiographic outcomes after flow diversion treatment of intracranial aneurysms: a new grading schema [J]. *Neuroradiology*, 2011, 53 (7): 501-508. DOI: 10.1007/s00234-010-0767-5.
- [143] Grunwald IQ, Kamran M, Corkill RA, et al. Simple measurement of aneurysm residual after treatment: the SMART scale for evaluation of intracranial aneurysms treated with flow diverters [J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2012, 154 (1): 21-26; discussion 26. DOI: 10.1007/s00701-011-1177-0.
- [144] Park MS, Mazur MD, Moon K, et al. An outcomes-based grading scale for the evaluation of cerebral aneurysms treated with flow diversion [J]. *J Neurointerv Surg*, 2017, 9 (11): 1060-1063. DOI: 10.1136/neurintsurg-2016-012688.
- [145] Guédon A, Thépenier C, Shotar E, et al. Predictive score for complete occlusion of intracranial aneurysms treated by flow-diverter stents using machine learning [J]. *J Neurointerv Surg*, 2021, 13 (4): 341-346. DOI: 10.1136/neurintsurg-2020-016748.
- [146] Kang H, Luo B, Liu J, et al. A novel score for evaluating cerebral aneurysms treated with flow diversion: 4F-flow diversion predictive score [J]. *Ther Adv Neurol Disord*, 2021, 14: 17562864211039336. DOI: 10.1177/17562864211039336.
- [147] Caroff J, Mihalea C, Klisch J, et al. Single-layer WEBs: intrasaccular flow disrupters for aneurysm treatment—feasibility results from a European study [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2015, 36 (10): 1942-1946. DOI: 10.3174/ajnr.A4369.
- [148] Lubicz B, Klisch J, Gauvrit JY, et al. WEB-DL endovascular treatment of wide-neck bifurcation aneurysms: short- and midterm results in a European study [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2014, 35 (3): 432-438. DOI: 10.3174/ajnr.A3869.
- [149] Pierot L, Costalat V, Moret J, et al. Safety and efficacy of aneurysm treatment with WEB; results of the WEBCAST study [J]. *J Neurosurg*, 2016, 124 (5): 1250-1256. DOI: 10.3171/2015.2.JNSI42634.
- [150] Caroff J, Janot K, Soize S, et al. Management of aneurysmal recurrence after Woven EndoBridge (WEB) treatment [J]. *J Neurointerv Surg*, 2023, 15 (10): 939-942. DOI: 10.1136/jnis-2022-019645.
- [151] Wang S, Summers RM. Machine learning and radiology [J]. *Med Image Anal*, 2012, 16 (5): 933-951. DOI: 10.1016/j.media.2012.02.005.
- [152] Mensah E, Pringle C, Roberts G, et al. Deep learning in the management of intracranial aneurysms and cerebrovascular diseases: a review of the current literature [J]. *World Neurosurg*, 2022, 161: 39-45. DOI: 10.1016/j.wneu.2022.02.006.
- [153] Yang J, Xie M, Hu C, et al. Deep learning for detecting cerebral aneurysms with CT angiography [J]. *Radiology*, 2021, 298 (1): 155-163. DOI: 10.1148/radiol.2020192154.
- [154] Zheng Y, Xu F, Ren J, et al. Assessment of intracranial aneurysm rupture based on morphology parameters and anatomical locations [J]. *J Neurointerv Surg*, 2016, 8 (12): 1240-1246. DOI: 10.1136/neurintsurg-2015-012112.
- [155] Jin H, Geng J, Yin Y, et al. Fully automated intracranial aneurysm detection and segmentation from digital subtraction angiography series using an end-to-end spatiotemporal deep neural network [J]. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12 (10): 1023-1027. DOI: 10.1136/neurintsurg-2020-015824.
- [156] Ueda D, Yamamoto A, Nishimori M, et al. Deep learning for MR angiography: automated detection of cerebral aneurysms [J]. *Radiology*, 2019, 290 (1): 187-194. DOI: 10.1148/radiol.2018180901.
- [157] Lang S, Hoelter P, Schmidt M, et al. Artificial intelligence-based 3D angiography for visualization of complex cerebrovascular pathologies [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2021, 42 (10): 1762-1768. DOI: 10.3174/ajnr.A7252.
- [158] Ghosh S, Dey S, Tjoumakaris S, et al. Association of morphologic and demographic features of intracranial aneurysms with their rupture: a retrospective analysis [J]. *Acta Neurochir Suppl*, 2013, 115: 275-278. DOI: 10.1007/978-3-7091-1192-5_48.
- [159] Hernandez M, Frangi AF. Non-parametric geodesic active regions: method and evaluation for cerebral aneurysms segmentation in 3DRA and CTA [J]. *Med Image Anal*, 2007, 11 (3): 224-241. DOI: 10.1016/j.media.2007.01.002.
- [160] Larrabide I, Villa-Urriol MC, Cárdenas R, et al. AngioLab—a software tool for morphological analysis and endovascular treatment planning of intracranial aneurysms [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2012, 108 (2): 806-819. DOI: 10.1016/j.cmpb.2012.05.006.
- [161] Balakrishnan G, Zhao A, Sabuncu MR, et al. VoxelMorph: a learning framework for deformable medical image registration [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2019. DOI: 10.1109/tmi.2019.2897538.
- [162] Geng J, Wang Y, Ji Z, et al. Advantages of 3D registration technology (3DRT) in clinical application of unruptured intracranial aneurysm follow-up: a novel method to judge aneurysm growth [J]. *J Neuroradiol*, 2023 Mar; 50 (2): 209-216 DOI: 10.1016/j.neurad.2022.08.004.
- [163] Silva MA, Patel J, Kavouridis V, et al. Machine learning models can detect aneurysm rupture and identify clinical features associated with rupture [J]. *World Neurosurg*, 2019, 131: e46-e51. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.06.231.

[164] Liu Q, Jiang P, Jiang Y, et al. Prediction of aneurysm stability using a machine learning model based on pyradiomics-derived morphological features[J]. Stroke, 2019, 50 (9) : 2314-2321. DOI: 10. 1161/STROKEAHA. 119. 025777.

[165] Wang Y, Yang X, Zhu W, et al. Verification of software-based preoperative simulation of flow diverters in clinical cases [J]. Interv Neuroradiol, 2023, 29 (5) : 510-519. DOI: 10. 1177/15910199221097264.

[166] Mantilla D, Ferreira-Prada CA, Galvis M, et al. Clinical impact of Sim & Size® simulation software in the treatment of patients with cerebral aneurysms with flow-diverter Pipeline stents [J]. Interv Neuroradiol, 2023, 29 (1) : 47-55. DOI: 10. 1177/15910199211068668.

[167] Regli L, Dehdashti AR, Uske A, et al. Endovascular coiling compared with surgical clipping for the treatment of unruptured middle cerebral artery aneurysms: an update[J]. Acta Neurochir Suppl, 2002, 82:41-46. DOI: 10. 1007/978-3-7091-6736-6_8.

[168] 刘权, 张绪新, 李彦钊, 等. 剖面 3D 打印技术辅助微导管塑形在颅内动脉瘤介入栓塞术中的应用[J]. 中华神经创伤外科电子杂志, 2019, 5 (5) : 284-288. DOI: 10. 3877/ema. j. issn. 2095-9141. 2019. 05. 007.

[169] Ohshima T, Nagano Y, Miyachi S. A novel technique of microcatheter shaping using real image display for endovascular aneurysmal coil embolization [J]. Asian J Neurosurg, 2021, 16 (3) : 645-647. DOI: 10. 4103/ajns. AJNS_90_21.

[170] Namba K, Higaki A, Kaneko N, et al. Microcatheter shaping for intracranial aneurysm coiling using the 3-dimensional printing rapid prototyping technology: preliminary result in the first 10 consecutive cases [J]. World Neurosurg, 2015, 84 (1) : 178-186. DOI: 10. 1016/j. wneu. 2015. 03. 006.

[171] Yang H, Ni W, Xu L, et al. Computer-assisted microcatheter shaping for intracranial aneurysm embolization: evaluation of safety and efficacy in a multicenter randomized controlled trial [J]. J Neurointerv Surg, 2024, 16 (2) : 177-182. DOI: 10. 1136/jnis-2023-020104.

[172] Liu C, Shen Y, Wu X, et al. Artificial intelligence-assisted microcatheter shaping for intracranial aneurysm coiling: a preliminary study [J]. Ann Vasc Surg, 2022, 85:228-236. DOI: 10. 1016/j. avsg. 2022. 03. 013.

[173] 耿介文, 胡鹏, 何川, 等. 术前智能化微导管塑形模拟技术辅助颅内未破裂动脉瘤栓塞术的安全性和有效性研究[J]. 中国脑血管病杂志, 2023, 20 (7) : 441-448. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-5921. 2023. 07. 002.

(收稿: 2024 - 04 - 30 修回: 2024 - 06 - 06)

(本文编辑: 张学锋)

· 启事 ·

欢迎微信订阅《中华神经外科杂志》

本刊已经开通微信公众号,推介最新的期刊内容和重点文章,以方便作者和读者与编辑部建立快捷的联系渠道,从而更好地发挥学术传播作用。

欢迎广大读者订阅!

中华神经外科杂志编辑部

扫描下方二维码关注微信公众号,直接微店订阅



微信公众号: zhsjwkzz