DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250048

· 专题报道 ·

影像组学及新兴影像学特征在脑动静脉畸形诊疗中的应用

肖祥俊[1]，张雨杭[1]，李　喆[1]，吴　奇[2]，段国礼[1]，刘建民[1]，李　强[1*]
1. 海军军医大学（第二军医大学）第一附属医院脑血管病中心，上海 200433
2. 上海理工大学健康科学与工程学院，上海 200093

［**摘要**］　影像组学通过高通量分析影像学数据，为脑动静脉畸形（bAVM）的诊断、治疗策略制定及预后评估提供了定量化支持，并在临床症状预测、个体化治疗及临床结局预测中展现出显著优势。新兴影像技术如血氧水平依赖脑血管反应性成像和超声技术，为评估 bAVM 相关血流动力学变化和癫痫易感性提供了新视角。此外，深度学习算法在 bAVM 病灶自动分割中的进步大幅提高了分割的准确性和效率。随着成像技术、数据分析算法及软件的不断进步，影像组学预计将在精准医疗和个体化治疗中发挥更加关键的作用，为 bAVM 患者带来更优质的诊疗服务和更好的治疗效果。

［**关键词**］　脑动静脉畸形；影像组学；精准医学；自动分割
［**引用本文**］　肖祥俊，张雨杭，李喆，等. 影像组学及新兴影像学特征在脑动静脉畸形诊疗中的应用[J]. 海军军医大学学报，2025，46（9）：1103-1107. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250048.

Application of radiomics and emerging imaging features in diagnosis and treatment of cerebral arteriovenous malformations

XIAO Xiangjun[1], ZHANG Yuhang[1], LI Zhe[1], WU Qi[2], DUAN Guoli[1], LIU Jianmin[1], LI Qiang[1*]
1. Neurovascular Center, The First Affilated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China
2. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

［**Abstract**］　Radiomics provides quantitative support for the diagnosis, treatment strategy and prognosis evaluation of brain arteriovenous malformation (bAVM) through high-throughput analysis of imaging data, and it also shows significant advantages in clinical symptom prediction, personalized treatment and clinical outcome prediction. Emerging imaging techniques, such as blood oxygen level-dependent cerebrovascular reactivity imaging and ultrasound technology, provide a new perspective for evaluating the hemodynamic changes and epilepsy susceptibility associated with bAVM. In addition, advances in deep learning algorithms in automatic segmentation of bAVM lesions have greatly improved the accuracy and efficiency of segmentation. With the continuous progress of imaging technology, data analysis algorithms and software, radiomics is expected to play a greater role in precision medicine and individualized treatment, bringing better diagnosis and treatment services and better treatment effects for bAVM patients.

［**Key words**］　brain arteriovenous malformation; radiomics; precision medicine; automatic segmentation
［**Citation**］　XIAO X, ZHANG Y, LI Z, et al. Application of radiomics and emerging imaging features in diagnosis and treatment of cerebral arteriovenous malformations[J]. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(9): 1103-1107. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20250048.

脑动静脉畸形（brain arteriovenous malformation，bAVM）作为一种先天性的脑血管发育异常性疾病，年发病率为 1.12/10 万～1.42/10 万，常被视为青壮年群体出血性脑卒中的主要病因[1-3]。bAVM 主要由异常动静脉连接构成的畸形血管网络组成，这些畸形血管导致了颅内血流动力学严重紊乱，可

［收稿日期］　2025-01-21　　［接受日期］　2025-05-19
［基金项目］　上海市科学技术委员会项目（23Y11906700），上海申康医院发展中心三年行动计划（SHDC2023CRT007）. Supported by Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (23Y11906700) and Three-year Action Plan of Shanghai Hospital Development Center (SHDC2023CRT007).
［作者简介］　肖祥俊，博士生. E-mail: xiangjunxiao@smmu.edu.cn
*通信作者（Corresponding author）. E-mail: lqeimm@126.com

能引发自发性颅内出血、癫痫等严重临床症状[4-5]。由于 CT、MRI 等传统成像技术的局限性，bAVM 的诊断和治疗长期以来依赖于侵入性数字减影血管造影（digital subtraction angiography，DSA）。然而，随着医学影像识别技术和数据分析算法的持续进步以及医工交叉的深度融合，医学图像数据的深度挖掘和高通量分析得以实现。影像组学技术通过其高通量影像特征分析的优势，能够从传统 CT、MRI、DSA 及衍生的 CT 血管造影（CT angiography，CTA）、磁共振血管造影（magnetic resonance angiography，MRA）等数据中提取出更多有价值的信息，为 bAVM 的诊断和治疗提供全新的视角。本文旨在讨论传统和新兴影像组学技术在 bAVM 诊疗中的应用价值，并阐述这些技术如何辅助 bAVM 临床决策制定、推动个体化治疗策略的进展。

1 利用常规影像组学技术预测 bAVM 患者临床症状及临床结局

影像组学技术在 bAVM 的临床症状预测和治疗策略制定中扮演着至关重要的角色。影像组学通过深入分析影像学特征，为 bAVM 的早期诊疗提供了定量检测的新方法，显著提升了预测的准确性。Lin 等[6]利用时间飞跃法磁共振血管成像（time of flight-magnetic resonance angiography，TOF-MRA）数据，通过影像组学分析提取了 73 个高维特征，发现畸形团低球形度与 bAVM 患者癫痫发作高度相关（OR＝4.16，95%CI 1.29～13.37），区分度较高。Zhao 等[7]结合临床特征与影像组学特征构建的联合模型在预测癫痫发作方面表现卓越，其 AUC 值达到 0.82（95%CI 0.74～0.90），高于单独使用临床特征的 0.71（95%CI 0.62～0.80），显示出融合模型的优越性，并通过列线图（nomogram）实现了预测效果的直观展示。Zhang 等[8]的研究则通过对 T2 加权 MRI 数据进行分析，构建了癫痫发作预测模型，其 AUC 值高达 0.866，进一步证实了影像组学特征在预测癫痫发作中的重要作用。

在临床实践中，快速无创地鉴别由畸形团破裂引起的颅内出血对于制定 bAVM 治疗策略至关重要。尽管常规 CT 平扫的鉴别效果有限，但本科研团队通过影像组学技术从平扫 CT 中提取 576 个影像组学特征，并运用多种特征筛选和监督机器学习算法构建分类模型，最终发现 RELF-Ada 模型在鉴别颅内血肿类型方面效果最佳，AUC 值达到 0.988，RSD 为 0.062，实现了颅内血肿的快速无创鉴别[9]。此外，Zhang 等[10]在对 586 例未破裂 bAVM 患者的大队列研究中，通过建立传统危险因素、CTA 影像组学特征及融合模型，运用机器学习预测畸形团破裂风险，最终模型在训练集和测试集中的 AUC 值分别高达 0.975 和 0.895，为临床提供了强有力的预测工具。

综合患者的临床数据和影像组学特征构建的预测模型能够更全面、准确地预测 bAVM 患者的临床结局。Meng 等[11]利用 T1 和 T2 加权 MRI 数据，通过最小绝对收缩和选择算子回归筛选出的影像组学特征结合立体定向放射外科（stereotactic radiosurgery，SRS）剂量学特征建模，发现支持向量机（support vector machine，SVM）模型在预测部分栓塞 bAVM 的 SRS 结果方面表现良好，AUC 值为 0.78。Gao 等[12]基于多参数 MRI 数据的研究发现，通过随机森林算法构建的预测模型对伽玛刀外科（gamma knife surgery，GKS）治疗后畸形团闭塞程度的预测效果最佳，证实了多参数 MRI 在治疗前预测 GKS 治疗结局方面的临床应用价值。这些研究成果不仅提高了 bAVM 临床症状和临床结局预测的准确性，也为临床治疗决策提供了科学依据，推动了 bAVM 的诊疗向更精准、个体化的方向发展。

2 利用 DSA 及 DSA 衍生影像组学特征预测 bAVM 患者临床症状

DSA 作为诊断 bAVM 的金标准，不仅能够提供畸形团的形态学信息，还能捕获详尽的血流动力学数据。尽管针对 DSA 数据的影像组学分析尚处于起步阶段，但已有研究显示其在预测 bAVM 患者临床症状方面的潜力。Shi 等[13]利用卷积神经网络进行了对 bAVM 诊断与 Spetsler-Martin 分级的初步探索。Zhu 等[14]通过血管造影参数成像（angiographic parametric imaging，API）等影像组学特征构建的线性模型有效预测了畸形团破裂出血的风险，并揭示了破裂畸形团血流动力学失衡的主要特征，即过量流入和限制流出。进一步的分析显示，主供血动脉达峰时间延长（OR＝11.836，95%CI 1.388～100.948，P＝0.024）和畸形团的平均通过时间缩短（OR＝0.174，95%CI 0.039～0.766，P＝0.021）与 bAVM 破裂风险的增加显著相关。有研究团队通过直接微导管血管内压力

监测（microcatheter intravascular pressure monitoring，MIPM）和颜色编码的定量数字减影血管造影（quantitative digital subtraction angiography，QDSA）分析发现，较高的跨病灶压力梯度（transnidal pressure gradient，TPG）、供血动脉压力（feeding artery pressure，FAP）及较高的病灶淤滞指数与畸形团破裂显著相关[15]。Loo 等[16]定义了修正脑循环时间（modified cerebral circulation time，mCCT），即颈内动脉海绵窦段感兴趣区（region of interest，ROI）和顶叶静脉 ROI 之间的造影剂团到达时间（bolus arrival time，BAT）差值，研究结果显示 mCCT 与癫痫发作独立相关，当 mCCT＜2 s 时在区分癫痫发作和非癫痫发作中表现出最佳效果。Shakur 等[17]通过 iFlow 数据分析发现，静脉淤滞的 bAVM 患者具有更高的颅内出血风险，且通过时间较短的患者癫痫发作频率较高；此外，利用定量磁共振血管造影术（quantitative magnetic resonance angiography，QMRA）验证了 DSA 评估的 bAVM 患者血流动力学变化的一致性，进一步证实了 DSA 衍生数据的临床价值。这些研究成果不仅证实了 DSA 衍生数据分析在 bAVM 诊疗中的可行性和临床价值，还强调了开发更直接针对 DSA 数据的影像组学分析方案的必要性，以期在未来的 bAVM 诊疗中发挥更大的作用。

3　针对 bAVM 病灶的精准分割技术在 bAVM 影像组学中的开发应用

影像组学研究中，ROI 的准确划分是最基础也是最关键的步骤。由于 bAVM 的复杂血管结构，畸形团的精确分割一直是影像组学技术应用中的一个挑战。传统的人工勾画方法虽然准确，但存在耗时、操作复杂和主观性强等缺点，尤其在处理畸形病灶时更为明显。为了克服手动分割的局限性，图像分割技术越来越依赖机器学习训练，尤其是深度学习算法[18]在 bAVM 的影像组学研究中有极大潜力。Clarençon 等[19]利用半自动分割算法对 3D 旋转血管造影（three-dimensional rotational angiography，3D RA）数据进行分割，可以更清晰地描绘病灶结构，区分供血动脉、畸形团和引流静脉的效果良好，但分割时间相对较长。Jiao 等[20]开发了基于 U-Net 的神经网络用于自动识别并分割 TOF-MRA 中的 bAVM 病变，提高了 3D TOF-MRA 图像中畸形团弥散程度的判断效率。Wang 等[21]则利用深度学习开发了针对颅脑 CT 影像的自动分割模型，大幅简化了 bAVM 的诊治过程。DSA 作为 bAVM 诊断的金标准，提供了血管分布和血流灌注的详细信息，但其诊断结果很大程度上依赖于医生的专业水平和经验。Shi 等[13]将基于区域的快速卷积神经网络（faster region-based convolutional neural network，Faster-RCNN）模型应用于 DSA 数据，通过提取动脉早期到静脉晚期的时间特征，并结合这些时间特征与 DSA 静态帧中的影像组学特征训练 SVM 分类模型，实现了 bAVM 的诊断与分级。尽管精准分割技术在 bAVM 的影像组学研究中尚处于起步阶段，但已经带来了极为明显的受益，自动分割不仅提高了分割的准确性和效率，也为临床诊断和治疗提供了更为可靠的技术支持。随着机器学习和深度学习算法的不断进步，预计未来将有更多的创新算法被开发出来，以进一步提升 bAVM 的分割技术和诊疗效果。

4　新兴影像学特征在个体化诊疗策略中的应用

定量磁敏感成像（quantitative susceptibility mapping，QSM）在 bAVM 的诊断、术前规划、术后监测等方面具有应用价值和独特优势。bAVM 的动脉－静脉分流导致引流静脉的静脉血氧饱和度（venous oxygen saturation，SvO_2）显著高于正常静脉。QSM 通过检测脱氧血红蛋白的顺磁性特性，可无创测量 SvO_2 变化。研究发现，bAVM 引流静脉的 SvO_2 较对侧健康静脉升高，验证了分流的血流动力学特征。同时 QSM 结合 TOF-MRA 或动态对比增强 MRA 可辅助区分供血动脉与引流静脉。虽然血流伪影可能干扰分割，但 QSM 仍能反映畸形血管团的氧代谢状态，尤其在复杂结构中优于传统成像[22]。

bAVM 的治疗策略包括显微手术、血管内栓塞、立体定向放射外科及保守治疗[23]，每种方法都存在一定的局限性。显微手术是 bAVM 治愈率最高的方法[24]，但由于畸形团复杂的血管构筑，手术实施难度较高。Mandel 等[25]通过 3D TOF-MRA 和 3D 增强 T1 加权 MRI 重建 bAVM 血管结构，在术前对畸形团供血动脉和引流静脉进行识别，从而合理规划手术路径。Markl 等[26]利用 4D Flow MRI 对畸形团内血流变化进行 3D 重建，全面监测血管内栓塞在治疗期间的血流动力学变化，以降低栓塞后潜在出血风险。对于介入治疗中使用的栓塞材料（如含钽的 Onyx 胶），QSM 可用于检测术后金属

伪影，但需注意钽的顺磁性可能干扰磁化率测量。未来若采用非金属栓塞材料（如生物降解材料），QSM 可更精确地监测栓塞效果。在 GKS 或栓塞治疗后，QSM 可动态监测到引流静脉 SvO_2 的下降，提示畸形血管闭塞和血流正常化；治疗后患者病灶侧静脉密度和 SvO_2 的不对称性消失说明治疗有效[22]。QSM 对术后残留或新发出血高度灵敏，能定量追踪含铁血黄素沉积的演变。例如，QSM 值突然升高可能提示无症状性出血，需进行临床干预[27]。此外，多平面重建、表面遮盖、容积重现等医学影像后处理技术也为 bAVM 的治疗提供了更详细的解剖学特征，能够辅助医生进行手术规划，提高手术成功率。

超声技术可测量脑血流速度、流量和阻力系数等指标，在 bAVM 的诊断、治疗和临床随访中具有重要价值。术中超声（intraoperative ultrasound，ioUS）能够提供实时数据，辅助手术入路规划，定量评估血流量，并间接评估脑灌注水平[28]。术前通过彩色多普勒超声（color Doppler ultrasound，CDUS）和超声造影（contrast-enhanced ultrasound，CEUS）评估 bAVM 的结构特征，可初步判断畸形团与周围大脑区域的解剖学关系，以及供血动脉和静脉引流的位置。术中使用 CDUS 和 CEUS 识别病灶内动静脉信号强度的变化及畸形团内的整体增强程度，结合电生理监测，有助于降低围手术期并发症。手术切除完成后，根据 CEUS 无充盈进入病灶、CDUS 无动脉血流进入病灶以及引流静脉中静脉信号的恢复情况，能够评估畸形团切除的完整性[29]。血氧水平依赖脑血管反应性（blood oxygenation level dependent-cerebrovascular reactivity，BOLD-CVR）成像作为一种新兴技术，可以测量动脉盗血现象和周围区域的 BOLD-CVR 受损情况。Sebök 等[30]通过分析 bAVM 患者的 BOLD-CVR 图像发现，bAVM 患者全脑 BOLD-CVR 受损，且合并癫痫的患者 BOLD-CVR 受损程度更高，表明全脑 BOLD-CVR 损伤和血流动力学改变可能与 bAVM 患者的癫痫易感性相关。这一发现不仅从血流动力学成像角度阐释了 bAVM 相关性癫痫的病理生理学机制，也提示无创 BOLD-CVR 可能成为预测 bAVM 患者癫痫的影像学标志物。

5 小　结

尽管影像组学和后处理影像信息在 bAVM 领域的研究尚处于起步阶段，但已显示出巨大的潜力和发展前景。随着机器学习和深度学习技术的不断进步，预计未来将有更多的先进模型被开发出来，使影像组学和后处理影像信息相关研究继续深化，为 bAVM 的诊疗提供更多创新的解决方案，推动 bAVM 诊疗向更精准、个体化方向发展。

［参 考 文 献］

［1］ AL-SHAHI R, BHATTACHARYA J J, CURRIE D G, et al. Prospective, population-based detection of intracranial vascular malformations in adults: the Scottish Intracranial Vascular Malformation Study (SIVMS)[J]. Stroke, 2003, 34(5): 1163-1169. DOI: 10.1161/01.STR.0000069018.90456.C9.

［2］ STAPF C, MAST H, SCIACCA R R, et al. The New York Islands AVM study: design, study progress, and initial results[J]. Stroke, 2003, 34(5): e29-e33. DOI: 10.1161/01.STR.0000068784.36838.19.

［3］ RUTLEDGE C, COOKE D L, HETTS S W, et al. Brain arteriovenous malformations[J]. Handb Clin Neurol, 2021, 176: 171-178. DOI: 10.1016/B978-0-444-64034-5.00020-1.

［4］ AL-SHAHI R, WARLOW C. A systematic review of the frequency and prognosis of arteriovenous malformations of the brain in adults[J]. Brain, 2001, 124(Pt 10): 1900-1926. DOI: 10.1093/brain/124.10.1900.

［5］ HILLMAN J. Population-based analysis of arteriovenous malformation treatment[J]. J Neurosurg, 2001, 95(4): 633-637. DOI: 10.3171/jns.2001.95.4.0633.

［6］ LIN J Y, LU C F, HU Y S, et al. Magnetic resonance radiomics-derived sphericity correlates with seizure in brain arteriovenous malformations[J]. Eur Radiol, 2024, 34(1): 588-599. DOI: 10.1007/s00330-023-09982-6.

［7］ ZHAO S, ZHAO Q, JIAO Y, et al. Radiomics analysis for predicting epilepsy in patients with unruptured brain arteriovenous malformations[J]. Front Neurol, 2021, 12: 767165. DOI: 10.3389/fneur.2021.767165.

［8］ ZHANG Y, YAN P, LIANG F, et al. Predictors of epilepsy presentation in unruptured brain arteriovenous malformations: a quantitative evaluation of location and radiomics features on T2-weighted imaging[J]. World Neurosurg, 2019, 125: e1008-e1015. DOI: 10.1016/j.wneu.2019.01.229.

［9］ ZHANG Y, ZHANG B, LIANG F, et al. Radiomics features on non-contrast-enhanced CT scan can precisely classify AVM-related hematomas from other spontaneous intraparenchymal hematoma types[J]. Eur Radiol, 2019, 29(4): 2157-2165. DOI: 10.1007/s00330-018-5747-x.

［10］ ZHANG S, WANG J, SUN S, et al. CT angiography radiomics combining traditional risk factors to predict brain arteriovenous malformation rupture: a machine learning, multicenter study[J]. Transl Stroke Res, 2024, 15(4): 784-794. DOI: 10.1007/s12975-023-01166-0.

[11] MENG X, GAO D, HE H, et al. A machine learning model predicts the outcome of SRS for residual arteriovenous malformations after partial embolization: a real-world clinical obstacle[J]. World Neurosurg, 2022, 163: e73-e82. DOI: 10.1016/j.wneu.2022.03.007.

[12] GAO D, MENG X, JIN H, et al. Assessment of gamma knife radiosurgery for unruptured cerebral arterioveneus malformations based on multi-parameter radiomics of MRI[J]. Magn Reson Imaging, 2022, 92: 251-259. DOI: 10.1016/j.mri.2022.07.008.

[13] SHI K, XIAO W, WU G, et al. Temporal-spatial feature extraction of DSA video and its application in AVM diagnosis[J]. Front Neurol, 2021, 12: 655523. DOI: 10.3389/fneur.2021.655523.

[14] ZHU H, ZHANG Y, LI C, et al. Quantitative evaluation of the hemodynamic differences between ruptured and unruptured cerebral arteriovenous malformations using angiographic parametric imaging-derived radiomics features[J]. Neuroradiology, 2023, 65(1): 185-194. DOI: 10.1007/s00234-022-03030-8.

[15] ZHANG Y, CHEN Y, LI R, et al. Overloaded transnidal pressure gradient as the hemodynamic mechanism leading to arteriovenous malformation rupture: a quantitative analysis using intravascular pressure monitoring and color-coded digital subtraction angiography[J]. J Neurointerv Surg, 2025, 17(2): 186-191. DOI: 10.1136/jnis-2023-021348.

[16] LOO J K, HU Y S, LIN T M, et al. Shortened cerebral circulation time correlates with seizures in brain arteriovenous malformation: a cross-sectional quantitative digital subtraction angiography study[J]. Eur Radiol, 2022, 32(8): 5402-5412. DOI: 10.1007/s00330-022-08690-x.

[17] SHAKUR S F, BRUNOZZI D, HUSSEIN A E, et al. Validation of cerebral arteriovenous malformation hemodynamics assessed by DSA using quantitative magnetic resonance angiography: preliminary study[J]. J Neurointerv Surg, 2018, 10(2): 156-161. DOI: 10.1136/neurintsurg-2017-012991.

[18] COLOMBO E, FICK T, ESPOSITO G, et al. Segmentation techniques of brain arteriovenous malformations for 3D visualization: a systematic review[J]. Radiol Med, 2022, 127(12): 1333-1341. DOI: 10.1007/s11547-022-01567-5.

[19] CLARENÇON F, MAIZEROI-EUGÈNE F, BRESSON D, et al. Elaboration of a semi-automated algorithm for brain arteriovenous malformation segmentation: initial results[J]. Eur Radiol, 2015, 25(2): 436-443. DOI: 10.1007/s00330-014-3421-5.

[20] JIAO Y, ZHANG J Z, ZHAO Q, et al. Machine learning-enabled determination of diffuseness of brain arteriovenous malformations from magnetic resonance angiography[J]. Transl Stroke Res, 2022, 13(6): 939-948. DOI: 10.1007/s12975-021-00933-1.

[21] WANG T, LEI Y, TIAN S, et al. Learning-based automatic segmentation of arteriovenous malformations on contrast CT images in brain stereotactic radiosurgery[J]. Med Phys, 2019, 46(7): 3133-3141. DOI: 10.1002/mp.13560.

[22] BIONDETTI E, ROJAS-VILLABONA A, SOKOLSKA M, et al. Investigating the oxygenation of brain arteriovenous malformations using quantitative susceptibility mapping[J]. Neuroimage, 2019, 199: 440-453. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.05.014.

[23] ASIF K, LESCHKE J, LAZZARO M A. Cerebral arteriovenous malformation diagnosis and management[J]. Semin Neurol, 2013, 33(5): 468-475. DOI: 10.1055/s-0033-1364212.

[24] 国家神经疾病医学中心,中国医师协会神经介入专业委员会,世界华人神经外科医师协会放射神经外科专家委员会. 脑动静脉畸形多学科诊疗专家共识[J]. 中华医学杂志,2024,104(15):1280-1309. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20240109-00061.

[25] MANDEL M, LI Y, FIGUEIREDO E G, et al. Presurgical planning with open-source horos software for superficial brain arteriovenous malformations[J]. World Neurosurg, 2022, 157: 3-12. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.09.081.

[26] MARKL M, WU C, HURLEY M C, et al. Cerebral arteriovenous malformation: complex 3D hemodynamics and 3D blood flow alterations during staged embolization[J]. J Magn Reson Imaging, 2013, 38(4): 946-950. DOI: 10.1002/jmri.24261.

[27] ZEINEDDINE H A, GIRARD R, CAO Y, et al. Quantitative susceptibility mapping as a monitoring biomarker in cerebral cavernous malformations with recent hemorrhage[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 47(4): 1133-1138. DOI: 10.1002/jmri.25831.

[28] PRADA F, DEL BENE M, MAURI G, et al. Dynamic assessment of venous anatomy and function in neurosurgery with real-time intraoperative multimodal ultrasound: technical note[J]. Neurosurg Focus, 2018, 45(1): E6. DOI: 10.3171/2018.4.FOCUS18101.

[29] DELLA PEPA G M, DI BONAVENTURA R, LATOUR K, et al. Combined use of color Doppler ultrasound and contrast-enhanced ultrasound in the intraoperative armamentarium for arteriovenous malformation surgery[J]. World Neurosurg, 2021, 147: 150-156. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.12.076.

[30] SEBÖK M, GERMANS M R, NIFTRIK C H B V, et al. More pronounced hemodynamic alterations in patients with brain arteriovenous malformation-associated epilepsy[J]. Neurosurg Focus, 2022, 53(1): E4. DOI: 10.3171/2022.4.FOCUS22117.

[**本文编辑**]　杨亚红