·临床研究·

5.0 T 磁共振 T2-MX3D-FS 与 3D-TOF-MRA 融合序列在识别原发性三叉神经痛责任血管中的应用价值

王宇晗[1,2] 陈昊[2] 刘梦秋[2] 陈国澳[1,2] 孙思琦[1,2] 刘影[1,2*]

［1.皖南医科大学研究生学院，芜湖 241002；2.中国科学技术大学附属第一医院（安徽省立医院）影像科，合肥 230036］

【摘要】 目的 探讨5.0 T超高场强磁共振三维快速自旋回波T2加权压脂成像（T2-weighted 3D fast spin echo with fat suppression, T2-MX3D-FS）与三维时间飞跃法磁共振血管成像（three dimensional time of flight magnetic resonance angiography, 3D-TOF-MRA）序列图像融合的新方法在识别原发性三叉神经痛（primary trigeminal neuralgia, PTN）责任血管中的应用价值，为临床确定神经血管压迫（neurovascular compression, NVC）提供更精准的影像诊断依据。**方法** 回顾性分析2024年9月至2025年8月在中国科学技术大学附属第一医院诊断为PTN并行微血管减压术（microvascular decompression, MVD）的26例患者的临床及影像资料。所有患者术前均采用联影uMR Jupiter 5.0 T超导磁共振成像系统进行T2-MX3D-FS序列及3D-TOF-MRA序列扫描，并将原始图像传输至后处理工作站进行图像融合分析。以MVD术中所见责任血管作为判断的“金标准”，评估T2-MX3D-FS序列、3D-TOF-MRA序列以及二者融合序列判断NVC的能力和识别责任血管的准确性。**结果** 26例患者中，有24例患者可见明确的NVC，MVD术中共发现责任血管39条。T2-MX3D-FS序列、3D-TOF-MRA序列与融合序列正确判断有无NVC的准确率分别为84.62%（22/26）、65.38%（17/26）及100%（26/26）。融合序列对判断NVC的准确率最高，高于任一单一序列，三种序列间的比较差异具有统计学意义（P=0.003 0）。T2-MX3D-FS序列、3D-TOF-MRA序列与融合序列正确识别责任血管的准确率为58.97%（23/39）、48.72%（19/39）及89.74%（35/39）。融合序列对责任血管的定性准确率显著高于单一序列，3种序列间比较差异具有统计学意义（P=0.000 2）。**结论** 5.0 T超高场强磁共振凭借其极高的信噪比和空间分辨率，能够更清晰地显示三叉神经与周围微小血管的解剖关系。T2-MX3D-FS序列与3D-TOF-MRA序列在显示神经和血管方面具有互补性，将二者进行图像融合能显著提高对PTN责任血管的检出率、定性的准确性，为术前精准评估NVC的责任血管、制定个体化MVD手术方案提供了更为可靠的影像学依据，具有重要的临床转化价值及应用前景。

【关键词】 5.0 T磁共振；三叉神经痛；融合序列；责任血管；神经血管压迫；T2-MX3D-FS；3D-TOF-MRA

【中图分类号】 R445.2；R745.11 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202602008

Application value of 5.0 T MRI T2-MX3D-FS and 3D-TOF-MRA fusion sequence in identifying responsible vessels in primary trigeminal neuralgia

Wang Yuhan[1,2], Chen Hao[2], Liu Mengqiu[2], Chen Guoao[1,2], Sun Siqi[1,2], Liu Ying[1,2]*

［*1.Graduate School of Wannan Medical University, Wuhu 241002, China; 2.Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of USTC(Anhui Provincial Hospital), Hefei 230036, China*］

【Abstract】 Objective To investigate the application value of a novel image fusion method based on T2-weighted 3D fast spin echo with fat suppression (T2-MX3D-FS) and three dimensional time of flight magnetic resonance angiography

第一作者：王宇晗，男，本科，研究方向：颅脑磁共振成像

通信作者：刘影，女，博士研究生，主任医师，研究方向：神经影像

(3D−TOF−MRA) sequences from 5.0 T ultra−high field magnetic resonance imaging in identifying the responsible vessels of primary trigeminal neuralgia (PTN), so as to provide more accurate imaging diagnostic evidence for the clinical confirmation of neurovascular compression (NVC). **Methods** A retrospective analysis was performed on the clinical and imaging data of 26 patients who were diagnosed with PTN and underwent microvascular decompression (MVD) at the First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China from September 2024 to August 2025. All patients underwent preoperative T2−MX3D−FS and 3D−TOF−MRA sequence scanning using a United Imaging uMR Jupiter 5.0 T superconducting MRI system, and the original images were transmitted to a post−processing workstation for image fusion analysis. Taking the responsible vessels identified during MVD as the diagnostic gold standard, we evaluated the ability of the T2−MX3D−FS sequence, 3D−TOF−MRA sequence, and the fusion sequence of the two to detect NVC, as well as their accuracy in identifying the responsible vessels. **Results** Among the 26 patients, definite NVC was observed in 24 patients, and a total of 39 responsible vessels were identified during MVD. The accuracy of the T2−MX3D−FS sequence, 3D−TOF−MRA sequence, and fusion sequence in correctly determining the presence or absence of NVC was 84.62% (22/26), 65.38% (17/26), and 100% (26/26), respectively. The fusion sequence had the highest accuracy for NVC detection, which was higher than that of any single sequence. The difference among the three sequences was statistically significant (P=0.003 0). The accuracy of the T2−MX3D−FS sequence, 3D−TOF−MRA sequence, and fusion sequence in correctly identifying responsible vessels was 58.97% (23/39), 48.72% (19/39), and 89.74% (35/39), respectively. The qualitative accuracy of the fusion sequence for responsible vessels was significantly higher than that of the single sequences, the difference among the three sequences was statistically significant (P=0.000 2). **Conclusion** 5.0 T ultra−high−field MRI, by virtue of its extremely high signal−to−noise ratio and spatial resolution, allows for clearer visualization of the anatomical relationship between the trigeminal nerve and surrounding microvessels. The T2−MX3D−FS and 3D−TOF−MRA sequences complement each other in displaying nerves and blood vessels. Image fusion of these two sequences significantly improves the detection rate and characterization accuracy of the responsible vessels in PTN, providing a more reliable imaging basis for the precise preoperative assessment of NVC and the formulation of individualized MVD surgical plans, demonstrating significant clinical translational value and promising application prospects.

【Key words】 5.0 T MRI; Trigeminal neuralgia; Fusion sequence; Responsible vessel; Neurovascular compression; T2−MX3D−FS; 3D−TOF−MRA

原发性三叉神经痛（primary trigeminal neuralgia, PTN）是一种发生于三叉神经走行区的反复发作的、以阵发性剧烈疼痛为特征的神经系统疾病，中老年女性多见，其疼痛常被描述为“电击样”“刀割样”或“撕裂样”[1]。患者常因触摸、洗脸、刷牙、咀嚼甚至说话等刺激便可诱发疼痛发作，严重影响患者的日常生活与社会功能。PTN的病因及发病机制尚未完全阐明，目前被广泛接受的仍是Jannetta提出的“神经血管压迫（neurovascular compression, NVC）”学说，即迂曲、扩张或走行异常的颅内血管（多为动脉，少数为静脉）在三叉神经根进入区（root entry zone, REZ）或其周围造成机械性压迫，导致神经纤维发生脱髓鞘改变，进而引起神经元间异常“短路”，诱导痛觉过敏，产生阵发性剧痛[2]。在此基础上，近年来已有研究进一步发现了神经受压后中枢敏化、离子通道的表达与失调以及活性氧与神经炎症标志物表达等复杂的分子和电生理机制[3-4]。微血管减压术（microvascular decompression, MVD）是目前治疗PTN的主要方法，术后复发率低，大部分患者术后即刻能得到明显缓解[5-6]。MVD手术成功的关键在于术前精准识别并定位压迫神经的责任血管，明确血管与三叉神经之间的关系，包括压迫部位、程度、血管类型及来源等。因此，术前通过影像学方法无创、精准地评估识别NVC对于临床手术方式及手术路径的选择至关重要[7-8]。磁共振已成为PTN术前评估的首选方法，其中，三维快速自旋回波T2加权压脂成像（T2−weighted 3D fast spin echo with fat suppression, T2−MX3D−FS）采用重T2加权序列，能够提供优异的脑脊液−神经−血管信号对比，神经和血管均

呈低信号，在高信号脑脊液背景的衬托下，神经和血管的形态和两者之间的毗邻关系显示极为清晰。三维时间飞跃法磁共振血管成像（three dimensional time of flight magnetic resonance angiography, 3D–TOF–MRA）能够清晰显示快速流动的动脉血流，使其呈现显著高信号，常用于展示责任动脉[9]。然而，常规1.5 T或3.0 T场强的磁共振在显示细小血管，特别是流速缓慢的静脉或小动脉方面仍存在局限性，单一序列的应用可能导致漏诊或误诊[10]。5.0 T超高场强磁共振是近年来投入临床应用的先进成像设备，研究[11–13]证实5.0 T及7.0 T超高场强磁共振在神经系统疾病、人脑血管周围间隙的可视化方面明显强于传统的1.5 T或3.0 T设备，能够提供卓越的信噪比（signal–to–noise ratio, SNR）、空间分辨率、对比度和灵敏度，从而能够更清晰地观察神经结构、代谢和功能。本研究旨在充分利用5.0 T磁共振的这一优势，将T2–MX3D–FS序列优异的脑脊液–神经–血管信号对比与3D–TOF–MRA序列卓越的动脉血管显示能力相结合，通过图像融合及三维多平面重建（multi–planar reconstruction, MPR）技术，探究其在识别PTN责任血管中的综合应用价值，为临床确定NVC提供更精准的影像诊断依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性纳入2024年9月至2025年8月在中国科学技术大学附属第一医院临床诊断为PTN的患者26例，均为单侧发病。其中，男性13例，女性13例；年龄33～64岁，平均年龄（52.8 ± 8.2）岁；左侧疼痛9例，右侧疼痛17例；病程2个月至20年。纳入标准：①符合PTN临床诊断标准；②顺利完成5.0 T设备T2–MX3D–FS与3D–TOF–MRA序列扫描；③检查后均行MVD治疗，临床手术资料完整；④所有患者均知情同意并签署知情同意书。排除标准：①颅内占位性病变等引起的继发性三叉神经痛患者；②合并其他严重神经系统疾病；③图像质量差。本研究获得医院伦理委员会批准（批件号：2025–RE–391）。

1.2 检查方法

使用联影uMR Jupiter 5.0 T超导磁共振成像系统，采用双通道传输和48通道头部接收线圈进行图像采集。患者取仰卧位，头部先进，固定头部防止运动伪影。常规序列：先行常规T1WI、T2WI扫描，排除颅内其他占位或结构性病变的影响。T2–MX3D–FS序列扫描范围以三叉神经脑池段为中心，自枕骨大孔至中脑水平，包含Willis环。主要扫描参数：TR为1 500 ms，TE为226.18 ms，层厚为0.3 mm，读出FOV为212 mm，相位FOV为200 mm，扫描时间为4 min3 s。3D–TOF–MRA序列扫描范围与T2–MX3D–FS序列一致。主要扫描参数：TR为23.3 ms，TE为5.1 ms，层厚为0.3 mm，翻转角为15°，读出FOV为230 mm，相位FOV为180 mm，扫描时间为2 min58 s。

1.3 图像后处理及分析

将T2–MX3D–FS与3D–TOF–MRA序列的原始横断面图像数据传输至联影后处理工作站。由两名具有10年以上神经影像诊断经验的神经放射科医师独立进行后处理分析，利用工作站的图像融合软件，将T2–MX3D–FS的神经影像（低信号）与3D–TOF–MRA的血管影像（高信号）进行透明化融合处理，生成同时清晰显示高信号血管、低信号神经及高信号脑脊液背景的融合图像。可调节上下图层间的融合比例，并使用MPR技术对融合图像进行斜矢状位、斜冠状位重建，从不同角度及方向观察神经与血管的关系。两名医师诊断意见不一致时，由两人协商后决定。采用Sindou等[14]提出的神经血管压迫分级方法对患者血管压迫程度进行分级，分级标准如下。①0级：血管与三叉神经未接触，两者之间存在脑脊液间隙；②Ⅰ级：血管与三叉神经接触，其间脑脊液间隙消失；③Ⅱ级：血管压迫三叉神经，可见压迹，伴或不伴有神经轻度移位；④Ⅲ级：血管严重压迫三叉神经使其变形或偏离正常位置。最终将0级定义为无压迫，Ⅰ～Ⅲ级定义为血管压迫。

1.4 统计学方法

采用GraphPad Prism 10统计学软件进行数据分析。分析比较T2–MX3D–FS、3D–TOF–MRA及二者融合序列判断NVC的能力和识别责任血管的准确性。计数资料以例数（n）和百分比（%）表示。采用*Fisher*精确检验比较3种不同序列之间正确判断NVC及正确识别责任血管的差异。以P<0.05表示差

异有统计学意义。使用 *kappa* 系数来检验两位医师间判断的一致性，*kappa*>0.61 表示有较强的一致性。

2 结果

2.1 MVD 术中所见情况

26 例患者均顺利完成 MVD 手术。除 2 例患者术中未发现确切 NVC 外，其余 24 例患者均可见明确的血管压迫三叉神经，责任血管为单纯动脉的有 14 例（58.33%），动静脉混合的有 7 例（29.17%），单纯静脉的有 3 例（12.50%）。术中共探查到 39 条责任血管，具体构成为：小脑上动脉（superior cerebellar artery, SCA）16 条（41.03%），小脑前下动脉（anterior inferior cerebellar artery, AICA）10 条（25.64%），静脉 10 条（25.64%），椎动脉（vertebral artery, VA）3 条（7.69%）。如图 1 所示为右侧三叉神经被动脉、静脉混合压迫。

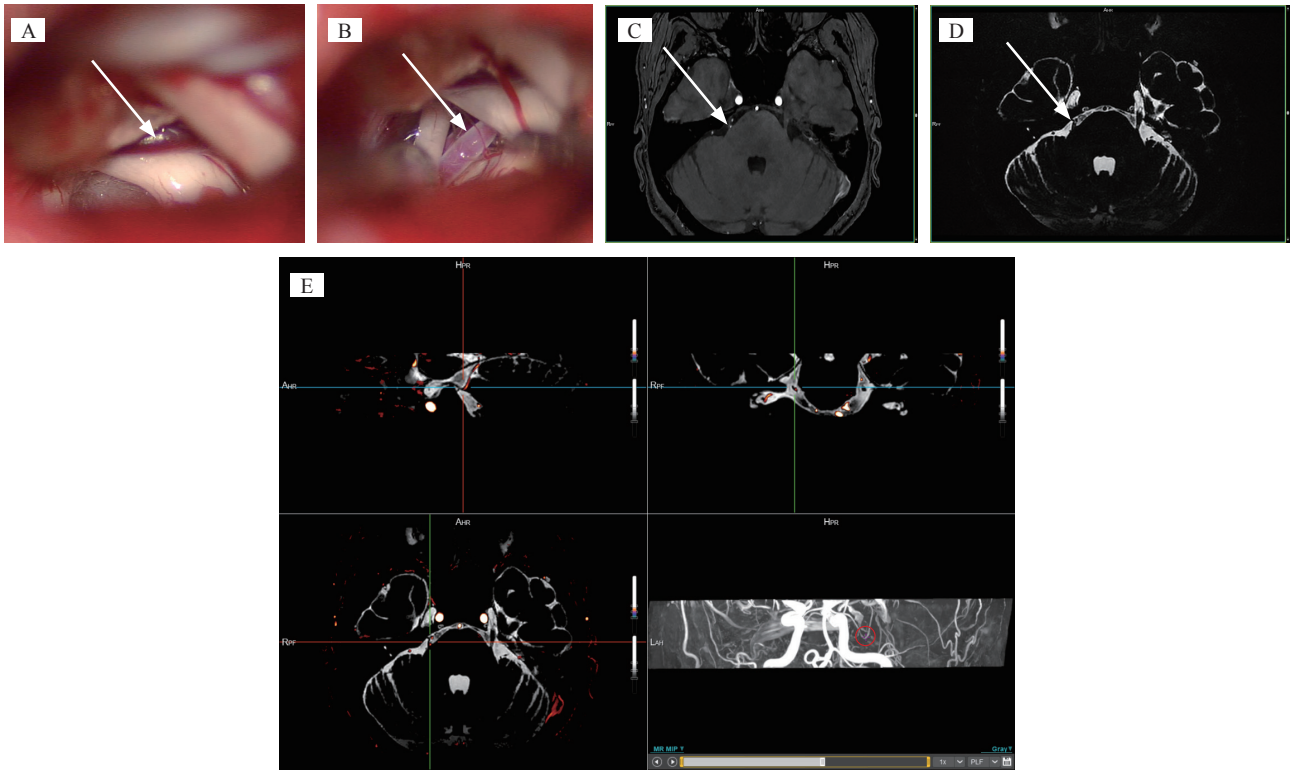


图 1 一名 62 岁三叉神经痛行多次射频消融术后复发的女性患者的手术及 MRI 图像 A 为术中显示右侧三叉神经被岩上静脉一属支（黑色箭头所示）压迫；B 为术中显示右侧三叉神经被右侧小脑上动脉（黑色箭头所示）压迫；C 为 3D-TOF-MRA 序列可显示右侧三叉神经根部两根高信号血管影压迫（白色箭头所示），无法分辨起源；D 为 T2-MX3D-FS 序列显示右侧三叉神经根部紊乱血管影（白色箭头所示），无法辨识；E 为融合图，上排两张图可清晰观察到血管（显示为红色）与三叉神经的关系，下排可清晰观察血管的起源，并与 TOF 后处理图像对照，可识别出具体血管（红色圆圈标记为小脑上动脉）

注：3D-TOF-MRA 为三维时间飞跃法磁共振血管成像；T2-MX3D-FS 为三维快速自旋回波 T2 加权压脂成像。

2.2 3 种序列判断 NVC 的能力

T 2-MX3D-FS 序列判定 4 例为无压迫，22 例为血管压迫。3D-TOF-MRA 序列判定 9 例为无压迫，17 例为血管压迫。T 2-MX3D-FS 与 3D-TOF-MRA 融合序列（以下简称融合序列）判定 2 例为无压迫，24 例为血管压迫。以 MVD 术中所见的责任血管作为判断的“金标准”，T2-MX3D-FS 序列、3D-TOF-MRA 序列与融合序列正确判断有无 NVC 的准确率分别为 84.62%（22/26）、65.38%（17/26）及 100%（26/26）。见表 1。融合序列对判断 NVC 的准确率最高，显著高于单独的 T2-MX3D-FS 序列及 3D-TOF-MRA 序列，3 种序列间的比较差异具有统计学意义（P=0.003 0）。其中，3D-TOF-MRA 序列与融合序列比较差异有统计学意义（P=0.001 7），

T2–MX3D–FS序列与融合序列比较差异无统计学意义（P=0.110 4）。另外，T2–MX3D–FS序列的准确率也高于3D–TOF–MRA序列，但差异无统计学意义（P=0.199 4）。采用3种序列判断NVC时，两位医师之间具有较强的一致性，T2–MX3D–FS序列、3D–TOF–MRA序列和融合序列的*kappa*值分别为0.77、0.75、0.78。

表1 3种序列判断NVC的准确率比较

序列	无压迫（n）	血管压迫（n）			准确率（%）
	0级	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	
T2–MX3D–FS序列	4	7	10	5	84.62[a,b]
3D–TOF–MRA序列	9	6	8	3	65.38[c]
融合序列	2	6	11	7	100

注：NVC为神经血管压迫；T2–MX3D–FS为三维快速自旋回波T2加权压脂成像；3D–TOF–MRA为三维时间飞跃法磁共振血管成像；3种序列判断NVC的准确率比较，行*Fisher*精确检验，P<0.05；[a]表示与3D–TOF–MRA序列比较，行*Fisher*精确检验，P=0.199 4；[b]表示与融合序列比较，行*Fisher*精确检验，P=0.110 4；[c]表示与融合序列比较，行*Fisher*精确检验，P=0.001 7。

2.3 3种序列识别责任血管的准确性

在检出的39条责任血管中，统计3种序列正确识别动静脉血管及其来源的数量。其中，T2–MX3D–FS序列的定性准确率为58.97%（23/39），其误判血管的原因主要是动静脉血管信号相似，且均显示为低信号，因此难以判断其来源；3D–TOF–MRA序列的定性准确率为48.72%（19/39），其误判的血管中，大多为静脉，因3D–TOF–MRA序列未能显示静脉，导致被漏诊，少部分为动脉的细小分支，因管腔狭窄、血流缓慢而使信号减低，与神经对比不佳，导致判断困难；融合序列对责任血管的定性准确率为89.74%（35/39），其对责任血管的定性准确率显著高于单一序列，差异有统计学意义（融合序列*vs.*T2–MX3D–FS，P=0.003 7；融合序列*vs.*3D–TOF–MRA，P=0.000 2）。3种序列间的比较差异也具有统计学意义（P=0.000 2）。见表2。两位医师通过3种序列对责任血管定性的结果也具有较强的一致性，T2–MX3D–FS序列、3D–TOF–MRA序列和融合序列的*kappa*值分别为0.71、0.67、0.75。

表2 3种序列识别责任血管的准确率比较

责任血管	术中例数	正确识别例数		
		T2–MX3D–FS序列	3D–TOF–MRA序列	融合序列
小脑上动脉	16	13	12	14
小脑前下动脉	10	4	4	9
椎动脉	3	3	3	3
静脉	10	3	0	9
准确率（%）	—	58.97[a]	48.72[b]	89.74

注：T2–MX3D–FS为三维快速自旋回波T2加权压脂成像；3D–TOF–MRA为三维时间飞跃法磁共振血管成像；3种序列对责任血管定性的准确率比较，行*Fisher*精确检验，P<0.05；[a]表示与融合序列比较，行*Fisher*精确检验，P=0.003 7；[b]表示与融合序列比较，行*Fisher*精确检验，P=0.000 2。

3 讨论

既往研究[15]表明，多数PTN与神经血管压迫有关，责任血管所致三叉神经萎缩和变性是其重要病理基础。MVD可有效解除血管压迫，显著缓解疼痛，被证明是治疗PTN的最佳手段，有显著效果[5, 16]。手术成功的前提是存在血管压迫，关键在于术前准确判断神经血管间的关系以及术中可靠的减压。MVD术后颅内出血和感染是导致患者死亡的主要原因，有研究[17–19]发现老年人小脑组织相对萎缩使得桥小脑区的视野更加清晰，从而减少了术中探查，术后并发症反而较少。因此，术前通过融合序列的新方法无创地显示责任血管，为临床医师提供精确的术前指导，避免不必要的术中探查，对于提升手术效果、缩短手术时间、减少术后并发症和改善患者的预后显得尤为重要。然而，三叉神经的解剖结构复杂，周围小血管分布密集，传统1.5 T或3.0 T磁共振在显示神经与邻近细小血管关系方面存在一定局限，难以清晰辨别微小血管及其压迫程度，无法为临床提供直观的影像学依据[10, 20]。本研究采用5.0 T超高场强磁共振，在人脑影像学研究中，其平均SNR值是3.0 T设备的1.6倍，空间分辨率显著提升[11–12, 21]，能够更清晰地显示三叉神经与周围微血管的解剖细节，为实现精准诊断提供了便利。同时，高SNR也使得融合图像的边界更清晰，伪影更少，显示效果更佳。

T2–MX3D–FS是一种高空间分辨率的三维快速自旋回波序列，图像信号的强度主要依赖组织T2/T1的比值。脑脊液的T2值较长，T2/T1值较大，在

影像上呈现出高信号，神经与血管呈中、低信号，二者之间产生强烈的信号对比，从而能够提供准确的三叉神经解剖及病变信息，并精细分析三叉神经与周围血管的关系[9, 22]。同时，该序列是三维容积数据采集，亚毫米级层厚，不仅提高了分辨率，更实现了各向同性扫描，为后期 MPR 等后处理技术创造了条件，本研究中该序列判断责任血管准确率高即得益于此。然而，血管、神经、纤维束等结构在 T2–MX3D–FS 序列中均呈低信号，导致无法有效区分，血管与神经往往关系密切，当两者紧密并行或粘连时，难以判断低信号条带究竟是血管还是三叉神经的一部分，更无法准确判断血管的具体来源，只能根据形态及走形大致推断，导致在定性具体责任血管方面存在不确定性[23–24]，本研究中 T2–MX3D–FS 序列误判的病例多源于此。与 T2–MX3D–FS 序列相反，3D–TOF–MRA 的原理是流入增强，快速流动的动脉血流流入成像层面形成高信号，其周围静止组织因受射频脉冲的多次激励而呈低信号，增加了血流和静止组织间的对比度。然而，该序列的局限性在于对流动缓慢的静脉和迂曲的小血管显示不清，大多只能显示椎基底动脉、小脑上动脉及小脑前下动脉等较为粗大的血管。这说明无论是 T2–MX3D–FS 序列还是 3D–TOF–MRA 序列的二维图像，在判断 NVC 和识别责任血管上都存在一定的局限性。

三维图像融合技术是一种新的诊断方法，它利用后处理软件对不同序列的原始图像进行多模态融合分析，并调节融合比例，将 T2–MX3D–FS 序列清晰的神经血管形态轮廓显示能力与 3D–TOF–MRA 序列优异的神经血管对比度相结合并进行取长补短，充分发挥各自的优势，实现既能识别神经受压情况又能判断具体的动脉血管，达到单一序列无法提供的显示效果。相关研究[12, 23, 25]使用 3.0 T 磁共振已经发现三维快速自旋回波序列联合 3D–TOF 可以达到三叉神经与周围血管的可视化。本研究利用 5.0 T 超高场强磁共振和融合序列精细的显示能力，实现了对细小动脉的准确显示，与单一使用 T2–MX3D–FS 和 3D–TOF–MRA 序列比较，其在显示 NVC 方面与术中的符合率更高。本研究中，有两例患者术中未发现明确的 NVC。其一术中结果为 SCA 与三叉神经伴行，在 T2–MX3D–FS 序列中显示 SCA 横跨三叉神经，二者有血管接触，3D–TOF–MRA 序列则未识别出责任血管。通过在融合序列中多角度、多平面地查找，最终在斜矢状位上发现，SCA 与三叉神经平行相伴，其中间可见脑脊液间隙，二者无接触，与术中结果相符。其二术中结果为 SCA 与三叉神经伴行的同时岩静脉分支自三叉神经感觉支与运动支之间穿行，T2–MX3D–FS 序列未识别出具体的责任血管而 3D–TOF–MRA 序列错误地判断为 SCA 与三叉神经接触。在融合序列中，斜矢状位上可以清晰地显示高信号红色背景的 SCA 与三叉神经伴行，斜冠状位上显示仍为低信号黑色背景的静脉血管穿行三叉神经之中，与术中一致。三叉神经与责任血管之间的关系往往比较复杂，仅在轴位图像上难以发现所有的压迫或特定角度的接触，尤其是在二者平行走行时[26]。但本研究中发现，当神经与血管平行走行时，斜矢状位有很好的显示效果；当神经与血管垂直走行时，则斜冠状位有更好的显示效果。

研究中还发现，虽然动脉是 PTN 最常见的责任血管，但静脉仍占有相当一部分的比例，这与郝杨等[27]的发现一致。3D–TOF–MRA 判断责任血管来源准确率低的原因也大多是不显示静脉而导致无法判断。对于 3D–TOF–MRA 序列不显示的静脉，虽然在融合序列中也无法直接展示，但在红色高信号动脉血管的衬托下，可以识别出仍为黑色低信号的血管影，结合其走行、位置及形态可经验性判断为静脉，从而大幅提高静脉血管的检出能力以及定性的准确率[15, 28]。

本研究还存在一定的局限性。首先，这是一项单中心回顾性研究，样本量较少，可能存在选择偏倚，未来需要多中心、多因素的大样本研究以进一步验证融合序列的诊断效能。其次，本研究中发现静脉血管的压迫不在少数，虽然融合序列能够对某些静脉血管作出经验性的判断，但对于细小静脉的显示效果不佳，没有直接定性到具体静脉血管的准确依据，未来将探索纳入磁共振静脉血管成像（magnetic resonance venography, MRV）等序列，构建更多模态的融合方案来提升对静脉血管的检出能力，这可能是未来优化和研究的方向。再次，本研究尚停留在探索使用新方法诊断发现结构性 NVC 的阶段，近年来发现神经压迫后引起的一系列病理生理过程可能是一种更加全面理解 PTN 的方向，未来随着磁共振设备的不断发展，可以尝试探索通过磁共振脑功能成像来揭示复杂神经疾病的内在机制。

综上所述，随着超高场强磁共振设备的不断发展，对神经等细微结构的显示能力逐步提高，为临床揭示某些疾病的病理生理机制提供了新方法。基

于5.0 T磁共振的超高分辨率，将T2-MX3D-FS与3D-TOF-MRA序列融合，是一种有效的新方法，结合多平面重组技术，能够无创、精准、直观地显示三叉神经与周围血管的复杂空间关系，显著提高了对PTN责任血管的检出率以及定性的准确性，优于任何单一序列的应用。这为临床医师术前精准评估NVC的责任血管、制定个体化MVD手术方案提供了更为可靠的影像学依据，有望帮助减少术中探查时间，具有重要的临床转化价值及应用前景，是未来PTN术前影像学评估的发展方向，值得进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] Bendtsen L, Zakrzewska J M, Abbott J, et al. European Academy of Neurology guideline on trigeminal neuralgia [J]. Eur J Neurol, 2019, 26(6): 831-849.

[2] Jannetta P J. Arterial compression of the trigeminal nerve at the pons in patients with trigeminal neuralgia [J]. Journal of Neurosurgery, 1967, 26(1): 159-162.

[3] Dong B, Xu R, Lim M. The pathophysiology of trigeminal neuralgia: a molecular review [J]. Journal of Neurosurgery, 2023, 139(5): 1471-1479.

[4] Chen Q, Yi D I, Perez J N J, et al. The molecular basis and pathophysiology of trigeminal neuralgia [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(7): 3604.

[5] Holste K, Chan A Y, Rolston J D, et al. Pain outcomes following microvascular decompression for drug-resistant trigeminal neuralgia: a systematic review and meta-analysis [J]. Neurosurgery, 2020, 86(2): 182-190.

[6] Haller S, Etienne L, Kövari E, et al. Imaging of neurovascular compression syndromes: trigeminal neuralgia, hemifacial spasm, vestibular paroxysmia, and glossopharyngeal neuralgia [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2016, 37(8): 1384-1392.

[7] Song H D, Yang F J, Liu R E. Efficacy of microvascular decompression on the vascular compression type of neurogenic hypertension: a meta-analysis [J]. Rev Neurol (Paris), 2020, 176(10): 763-769.

[8] Louges M A, Kleiber J C, Bazin A, et al. Efficacy of microsurgical vascular decompression in trigeminal neuralgia [J]. Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis, 2020, 137(4): 285-289.

[9] 王在然, 卢鹏超, 刘秀颖, 等. 三维高分辨率磁共振成像技术在三叉神经痛诊断中的应用进展 [J]. 磁共振成像, 2022, 13(7): 152-155.

[10] Leal P R L, Hermier M, Froment J C. Preoperative demonstration of the neurovascular compression characteristics with special emphasis on the degree of compression, using high-resolution magnetic resonance imaging: a prospective study, with comparison to surgical findings, in 100 consecutive patients who underwent microvascular decompression for trigeminal neuralgia [J]. Acta Neurochir (Wien), 2010, 152(5): 817-825.

[11] Shi Z, Zhao X, Zhu S, et al. Time-of-flight intracranial MRA at 3 T versus 5 T versus 7 T: visualization of distal small cerebral arteries [J]. Radiology, 2023, 306(1): 207-217.

[12] Liu S, Li J, Hua R, et al. Visualization of perivascular spaces in the human brain with 5-T magnetic resonance imaging [J]. BMC Neuroscience, 2025, 26(1): 18.

[13] de Vries E, Hagbohm C, Ouellette R, et al. Clinical 7 Tesla magnetic resonance imaging: impact and patient value in neurological disorders [J]. Journal of Internal Medicine, 2025, 297(3): 244-261.

[14] Sindou M, Leston J, Howeidy T, et al. Micro-vascular decompression for primary trigeminal neuralgia (typical or atypical). long-term effectiveness on pain; prospective study with survival analysis in a consecutive series of 362 patients [J]. Acta Neurochir (Wien), 2006, 148(12): 1235-1245.

[15] 罗星, 邓浩, 杨汉丰. 原发性三叉神经痛患者神经血管压迫特征及其周围结构变化 [J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(11): 1621-1625.

[16] Sindou M, Brinzeu A. Topography of the pain in classical trigeminal neuralgia: insights into somatotopic organization [J]. Brain, 2020, 143(2): 531-540.

[17] Safi A A, Afridi E A K, Javed F. Immediate pain relief in patients of trigeminal neuralgia after microvascular decompression (MVD) [J]. Pakistan Journal of Neurological Surgery, 2025, 29(2): 113-120.

[18] Go K O, Hwang K, Han J H. Surgical nuances to reduce and manage cerebrospinal fluid leaks after microvascular decompression [J]. J Clin Med, 2020, 9(4): 902.

[19] Guo Z , Zhang X, Zhao B. Analysis of risk factors of intracranial infection after microvascular decompression [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 11540.

[20] Graff-Radford S, Gordon R, Ganal J, et al. Trigeminal neuralgia and facial pain imaging [J]. Curr Pain Headache Rep, 2015, 19(6): 19.

[21] Wei Z, Chen Q, Han S, et al. 5T magnetic resonance imaging: radio frequency hardware and initial brain imaging [J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(5): 3222-3240.

[22] Ors S, Inci E, Turkay R, et al. Retrospective comparison of three-dimensional imaging sequences in the visualization of posterior Fossa cranial nerves [J]. European Journal of Radiology, 2017, 97: 65-70.

[23] Leal P R L, Hermier M, Souza M A, et al. Visualization of vascular compression of the trigeminal nerve with high-resolution 3T MRI: a prospective study comparing preoperative imaging analysis to surgical findings in 40 consecutive patients who underwent microvascular decompression for trigeminal neuralgia [J]. Neurosurgery, 2011, 69(1):15-25.

[24] 李馨, 金大永, 朱寅虎, 等. MRI融合技术提高三叉神经痛伽马刀治疗术前定位的准确性探讨 [J]. 延安大学学报（医学科学版）, 2022, 20(2): 65-68.

[25] Pham H D, Dang T H, Duong T K, et al. Predictability of fused 3D-T 2-SPACE and 3D-TOF-MRA images in identifying conflict in trigeminal neuralgia [J]. J Pain Res, 2021, 14: 3421-3428.

[26] Han K W, Zhang D F, Chen J G, et al. Presurgical visualization of the neurovascular relationship in trigeminal neuralgia with 3D modeling using free Slicer software [J]. Acta Neurochir (Wien), 2016, 158(11): 2195-2201.

[27] 郝杨, 于炎冰, 张瑜廉, 等. 非动脉压迫因素导致三叉神经痛的显微外科手术治疗 [J]. 中华神经外科杂志, 2019, 35(3): 255-258.

[28] 王清, 张振光, 李宗芳, 等. 血管压迫性原发性三叉神经痛压迫位点与面部痛区关系的MRI研究 [J]. 中国医学影像技术, 2018, 34(4): 499-503.