

磁共振3D-TOF与PETRA序列在颅脑血管疾病中诊断价值的对比研究

王苗¹, 张瑜^{2*}, 黄瑞瑜², 韩婷², 王云鹏², 许保刚², 任丽³

¹咸阳彩虹医院医学影像中心, 陕西 咸阳

²陕西中医药大学第二附属医院医学影像中心, 陕西 咸阳

³西咸一脉阳光医学影像诊断中心, 陕西 咸阳

收稿日期: 2026年5月23日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

深度对比三维时间飞跃法磁共振血管成像(3D-TOF-MRA)与纯血池快速成像(PETRA-MRA)序列在颅脑血管疾病中的图像质量、血管树精细分支显示能力及临床诊断效能, 明确两种无创血管成像技术的应用优势与局限性, 为颅脑血管疾病的精准无创诊断及序列合理选择提供参考依据。方法: 回顾性选取2023年1月~2025年12月本院收治的疑似颅脑血管疾病患者286例, 所有受试者均于7 d内完成3D-TOF-MRA、PETRA序列扫描及数字减影血管造影(DSA)检查。以DSA为金标准, 由2名副主任医师采用双盲法独立阅片, 对比两种序列的客观图像质量指标、主观评分及颅内动脉1~5级血管分支显示率, 统计对颅内动脉狭窄、动脉瘤、动静脉畸形(AVM)、硬脑膜动静脉瘘(DAVF)的检出情况, 计算诊断敏感性、特异性、准确率及AUC值, 评估诊断一致性, 并记录检查耗时与安全性。结果显示, PETRA序列的颅脑血管与背景组织CNR、信号强度比均显著高于3D-TOF-MRA, 信号均匀度显著更优, 两组SNR无统计学差异。PETRA序列主观图像质量评分、医师诊断一致性Kappa值、颅内5级血管分支显示率均显著高于3D-TOF-MRA。诊断效能方面, PETRA序列对颅脑血管疾病的整体诊断准确率、敏感性、特异性及AUC均显著高于3D-TOF-MRA。亚组分析显示, PETRA对颈内动脉虹吸段重度狭窄、直径 < 3 mm微小动脉瘤、AVM引流静脉及DAVF瘘口的检出率 ≥ 93%, 远高于3D-TOF-MRA的60.0%~71.9%; 而两种序列对颅内大血管主干中重度狭窄的检出率无统计学差异。两种序列均无需对比剂, 无严重不良事件, PETRA扫描耗时更短, 患者耐受度更优。结论: 磁共振PETRA序列在颅脑血管精细解剖显示、微小病变及复杂血流病变诊断中优势明显, 综合效能优于3D-TOF-MRA, 可作为复杂病变术前评估、微小病变筛查及疑难病例确诊的优选无创成像方式。3D-TOF-MRA操作简便、成本低廉, 更适用于常规初筛、健康体检及基层医院应用。临床无需固定选用单一序列, 应结合诊疗需求、病变类型、血管部位及设备条件个体化选择, 必要时联合应用以提升诊断精准性与高效性。

关键词

3D-TOF-MRA, PETRA序列, 颅脑血管疾病, 无创血管成像, 诊断效能, 图像质量, 数字减影血管造影

*通讯作者。

Comparative Study on the Diagnostic Value of Magnetic Resonance 3D-TOF and PETRA Sequences in Cerebrovascular Diseases

Miao Wang¹, Yu Zhang^{2*}, Ruiyu Huang², Ting Han², Yunpeng Wang², Baogang Xu², Li Ren³

¹Medical Imaging Center, Xianyang Rainbow Hospital, Xianyang Shaanxi

²Medical Imaging Center of The Second Affiliated Hospital of Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang Shaanxi

³Xixian Yimai Sunshine Medical Imaging Diagnosis Center, Xianyang Shaanxi

Received: May 23, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

To compare the image quality, fine branch display ability of vascular tree, and clinical diagnostic efficacy of 3D-TOF-MRA and PETRA-MRA sequences in cerebral vascular diseases, and to clarify the application advantages and limitations of the two non-invasive vascular imaging techniques, providing reference for accurate non-invasive diagnosis and rational sequence selection of cerebral vascular diseases. Method: A retrospective study was conducted on 286 suspected patients with cerebrovascular disease admitted to our hospital from January 2023 to December 2025. All subjects completed 3D-TOF-MRA, PETRA sequence scanning, and digital subtraction angiography (DSA) examination within 7 days. Using DSA as the gold standard, two associate chief physicians independently reviewed the images using a double-blind method to compare the objective image quality indicators, subjective scores, and display rates of 1~5 grade intracranial artery branches between two sequences. The detection of intracranial artery stenosis, aneurysms, arteriovenous malformations (AVMs), and dural arteriovenous fistulas (DAVF) was statistically analyzed, and diagnostic sensitivity, specificity, accuracy, and AUC values were calculated to evaluate diagnostic consistency. The examination time and safety were recorded. The results showed that the cerebral blood vessel to background tissue CNR and signal intensity ratio of PETRA sequence were significantly higher than those of 3D-TOF-MRA, and the signal uniformity was significantly better. There was no statistical difference in SNR between the two groups. The subjective image quality score, physician diagnostic consistency Kappa value, and intracranial 5-level vascular branch display rate of PETRA sequence were significantly higher than those of 3D-TOF-MRA. In terms of diagnostic efficacy, PETRA sequence has significantly higher overall diagnostic accuracy, sensitivity, specificity, and AUC for cerebrovascular diseases than 3D-TOF-MRA. Subgroup analysis showed that PETRA had a detection rate of $\geq 93\%$ for severe stenosis of the internal carotid artery siphon segment, small aneurysms with a diameter < 3 mm, AVM draining veins, and DAVF fistulas, which was much higher than the 60.0%~71.9% of 3D-TOF-MRA; There was no statistically significant difference in the detection rate of moderate to severe stenosis in the main trunk of intracranial large blood vessels between the two sequences. Both sequences do not require contrast agents, have no serious adverse events, have shorter PETRA scanning time, and have better patient tolerance. Conclusion: Magnetic resonance PETRA sequence has significant advantages in fine anatomical display of cranial blood vessels, diagnosis of small lesions and complex blood flow lesions, and its comprehensive efficacy is superior to 3D-TOF-MRA. It can be used as the preferred non-invasive imaging method for preoperative evaluation of complex lesions, screening of small lesions, and diagnosis of difficult cases. 3D-TOF-MRA is easy to operate, cost-effective, and more suitable for routine screening, health check ups, and primary hospital applications. Clinical practice does not require a fixed selection of a single sequence, and individualized selection should be made

based on diagnosis and treatment needs, lesion types, vascular locations, and equipment conditions. When necessary, combined applications can be used to improve diagnostic accuracy and efficiency.

Keywords

3D-TOF-MRA, PETRA Sequence, Cerebrovascular Disease, Non Invasive Vascular Imaging, Diagnostic Efficacy, Image Quality, Digital Subtraction Angiography

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

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

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



Open Access

1. 引言

颅脑血管疾病是一类以颅内血管结构异常、血流动力学紊乱为核心病理基础的高发高危性疾病，涵盖颅内动脉粥样硬化性狭窄、颅内动脉瘤、脑动静脉畸形等多个亚型，其起病隐匿、进展隐匿，一旦发生血管破裂或急性闭塞，极易引发急性缺血性脑卒中、蛛网膜下腔出血等严重不良事件，具有极高的急性期致残率与致死率，严重威胁人群生命健康[1]。最新流行病学数据显示，我国成年人群颅脑血管疾病患病率已达 16.8%，其中微小动脉瘤、颅内远端血管狭窄等早期细微病变的漏诊率超 30%，是导致疾病不良预后的重要诱因[2]，鉴于颅脑血管解剖结构的复杂性——血管分支纤细、走行迂曲、毗邻结构复杂，传统影像学技术难以满足细微病变的早期识别需求，因此，研发并优化无创、高分辨率、高精度的颅脑血管成像技术，是提升颅脑血管疾病早期诊断率、改善患者远期预后的核心突破口。

无创磁共振血管成像(MRA)凭借无电离辐射、软组织分辨率高、无需或减少对对比剂使用的优势，已成为颅脑血管疾病诊断的一线影像学技术，逐步替代了传统有创性数字减影血管造影(DSA)在常规诊疗中的部分应用[3]。3D-TOF-MRA 作为经典无创 MRA 序列，基于血流流入增强效应实现血管显影，无需注射对比剂，操作简便、检查耗时适中、成本低廉，可清晰显示颅内大血管主干形态，在临床颅脑血管疾病初筛与健康体检中占据主导地位[4]。但受技术原理制约，3D-TOF-MRA 存在明显局限性，其一为强血流依赖性，对血流速度、血流方向高度敏感，在颈内动脉虹吸段等血管迂曲部位易形成湍流，在颅内 4~5 级细微分支等慢血流区域易出现信号衰减与丢失；其二为背景组织抑制不足，脑组织、脑脊液等静止组织信号难以完全剔除，导致血管图像对比分辨率偏低；其三为微小病变检出能力有限，对直径 <3 mm 的微小动脉瘤、早期血管内膜斑块等细微病变的识别度不足，上述原因均导致其在复杂颅脑血管疾病精准诊断中存在明显局限性[5]。

磁共振 PETRA 序列(纯血池磁共振血管成像序列)是近年来快速发展的新型无创高分辨率血管成像技术，其基于超短回波时间、平行采集及三维快速梯度回波技术，结合血池效应实现血管精准显影，可在无需对比剂的前提下，有效抑制脑组织、脑脊液、颅骨等背景组织信号，最大化突出颅脑血管信号，同时具备扫描速度快、信号均匀性好、细微结构显示清晰的优势[6]。该序列从根本上突破了传统 MRA 对血流速度的依赖性限制。该序列从根本上突破了传统 MRA 对血流速度的依赖性限制，无需外源性对比剂，通过精准捕捉血管内血池信号、强效抑制背景静止组织干扰，可实现颅脑血管的高分辨率、高均匀度显影，即使是慢血流、湍流区域的血管及细微血管分支，均能清晰显示。目前 PETRA 已逐步应用于颅脑血管疾病临床诊断，但关于其与经典 3D-TOF-MRA 在不同类型颅脑血管疾病中的系统性诊断效能对比、技术优势边界界定的大样本循证研究，国内尚处于探索阶段，缺乏统一临床应用共识[7]。

鉴于此,本研究以 DSA 诊断金标准为参照,纳入 286 例疑似颅脑血管疾病患者,从图像质量、血管分支显示能力、不同类型病变检出率、诊断效能等多维度,全面对比 3D-TOF-MRA 与 PETRA 序列的应用价值,分析两种序列的优势与不足,为临床依据病变类型及诊疗需求个体化选择无创成像序列提供参考依据,进一步提升颅脑血管疾病的诊断精准度与临床诊疗水平。

2. 资料与方法

2.1. 研究对象

回顾性选取 2022 年 1 月~2024 年 12 月在本院神经科、影像科就诊的疑似颅脑血管疾病患者 286 例,其中男性 156 例,女性 130 例;年龄 35~85 岁,平均年龄(64.2 ± 10.1)岁;临床表现以反复头痛、头晕、肢体麻木无力、面部感觉异常、短暂性脑缺血发作为主,29 例患者无明显临床症状,于健康体检中发现颅内血管异常。

纳入标准:① 临床症状、体征或初筛 CT 检查高度怀疑颅内动脉狭窄、颅内动脉瘤、动静脉畸形、硬脑膜动静脉瘘等颅脑血管疾病;② 均完成 3D-TOF-MRA、PETRA 序列及 DSA 三项检查,三项检查间隔时间 ≤ 7 d,期间未接受任何针对颅脑血管病变的治疗;③ 磁共振检查图像清晰,无严重运动伪影、金属伪影等影响图像评估;④ 临床资料、影像学检查资料完整,可满足研究分析需求。

排除标准:① 体内装有心脏起搏器、金属植入物、电子耳蜗等磁共振检查禁忌物;② 严重幽闭恐惧症、认知功能障碍,无法配合完成磁共振检查体位摆放及扫描;③ 肝肾功能严重不全、对比剂过敏,无法完成 DSA 检查;④ 既往有颅脑血管手术、介入治疗史,血管形态已发生改变,影响病变评估;⑤ 妊娠期、哺乳期女性。

2.2. 检查设备与成像参数

所有磁共振检查均采用本院 3.0 T 超导磁共振扫描仪(西门子 Skray),配备 20 通道头部专用相控阵线圈;DSA 检查采用飞利浦 Allura Xper FD20 数字减影血管造影机,作为本研究诊断金标准,所有扫描操作均由资深技师严格按照操作规范完成。

1) 3D-TOF-MRA 检查参数:采用三维快速扰相梯度回波序列,扫描范围覆盖全颅脑血管,具体参数设置为:TR 22~24 ms,TE 2.3~2.6 ms,翻转角 18° ~ 20° ,矩阵 256×256 ,视野(FOV) 18~20 cm,层厚 0.8 mm,无间隔连续扫描,层数 190~230 层,激励次数 1,平行采集加速因子 2,扫描时间 6~7 min,全程无需注射对比剂,扫描完成后经后处理工作站进行最大密度投影(MIP)、多平面重建(MPR)处理。

2) PETRA 序列检查参数:采用三维纯血池无创血管成像序列,无需注射对比剂,扫描范围同 3D-TOF-MRA,具体参数设置为:TR 6.5~7.2 ms,TE 0.8~1.0 ms (超短回波时间),翻转角 12° ~ 15° ,矩阵 256×256 ,FOV 18~20 cm,层厚 0.6 mm,无间隔扫描,层数 220~260 层,平行采集加速因子 3,采用背景信号抑制技术,扫描时间 5~6 min,扫描完成后同样进行 MIP、MPR 后处理重建,获得完整颅脑血管图像[8]。

3) DSA 检查参数:采用 ARTIS Q floor 技术经股动脉穿刺插管,将导管分别置入双侧颈内动脉、椎动脉,匀速注入非离子型对比剂,注射剂量 5~8 ml/次,注射流速 3~5 ml/s,分别行正位、侧位、斜位多角度造影扫描,完整采集动脉期、静脉期、静脉窦期图像,由 2 名从事介入诊疗工作 15 年以上的主任医师双盲阅片,共同出具诊断报告,作为最终确诊依据。

2.3. 图像分析与评价标准

1) 图像质量评价:由 2 名高年资影像科主治医师完成双盲独立评估,评估前统一培训并明确评价标

准,意见分歧时经共同阅片讨论达成一致。① 客观指标:选取大脑中动脉 M1 段、颈内动脉虹吸段为标准目标血管,在图像后处理工作站测量血管信号强度、背景脑组织信号强度及噪声值,各指标重复测量 3 次取平均值,计算核心参数:信噪比(SNR = 血管信号强度/噪声值)、对比噪声比(CNR = (血管信号强度 - 背景信号强度)/噪声值)、信号强度比(SIR = 血管信号强度/背景信号强度)、信号均匀度(SD/Ave = 血管信号强度标准差/血管信号强度平均值);② 主观指标:采用 4 分制 Likert 评分量表,1 分:伪影严重,血管显示不清,无法诊断;2 分:伪影明显,血管信号不连续,细节模糊,仅可初步诊断;3 分:伪影较轻,血管主干及主要分支清晰,满足常规诊断需求;4 分:伪影极少,血管形态完整、信号均匀,细微分支及病变细节清晰,可满足精准诊断;③ 血管分支显示率:参照颅内动脉五级分支分级标准,统计两种序列对一级(大动脉主干)至五级(远端细微分支)血管的显示清晰率,计算各级血管显示占比。

2) 病变诊断评价:以 DSA 确诊结果为金标准,统计两种序列对各类颅脑血管疾病的检出情况,包括颅内动脉狭窄(轻度 < 50%、中度 50%~69%、重度 70%~99%、闭塞 100%)、颅内动脉瘤(< 3 mm 微小、3~5 mm 小、5 mm 大)、动静脉畸形、硬脑膜动静脉瘘,计算诊断敏感性、特异性、准确率,公式如下:敏感性 = 真阳性例数/(真阳性例数 + 假阴性例数) × 100%,特异性 = 真阴性例数/(真阴性例数 + 假阳性例数) × 100%,准确率 = (真阳性例数 + 真阴性例数)/总例数 × 100%;采用 ROC 曲线分析两种序列的诊断效能,计算 AUC 值及 95%置信区间,AUC 越接近 1 提示诊断效能越高[9]。

3) 观察者一致性检验:采用 Kappa 检验评估 2 名阅片医师对两种序列图像质量及病变诊断的一致性,Kappa < 0.4 为一致性差,0.4~0.75 为一致性中等,> 0.75 为一致性良好。

2.4. 统计学方法

采用 SPSS 26.0 统计学软件进行数据处理与分析,计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,两组间对比采用配对样本 t 检验;计数资料以率(%)表示,组间对比采用 χ^2 检验;诊断效能采用 ROC 曲线分析并计算 AUC 值;观察者一致性采用 Kappa 检验。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

3. 结果

3.1. 研究对象最终确诊结果

经 DSA 检查最终确诊,286 例疑似颅脑血管疾病患者中,颅脑血管疾病阳性患者 258 例,阴性 28 例;其中颅内动脉粥样硬化性狭窄 138 例(颈内动脉虹吸段狭窄 52 例、大脑中动脉狭窄 60 例、大脑前动脉狭窄 16 例、椎动脉狭窄 10 例;轻度 35 例、中度 48 例、重度 55 例),颅内动脉瘤 46 例(微小动脉瘤 21 例、小动脉瘤 18 例、大动脉瘤 7 例),动静脉畸形(AVM) 32 例,硬脑膜动静脉瘘(DAVF) 19 例,三叉神经血管压迫综合征 23 例,为两种序列的诊断效能对比提供基准。

3.2. 两种序列图像质量与血管显示率对比

1) 客观图像质量指标对比:PETRA 序列的 CNR、SIR 均显著高于 3D-TOF-MRA,信号均匀度 SD/Ave 值显著低于 3D-TOF-MRA,组间对比差异均有统计学意义($P < 0.05$);两种序列的目标血管 SNR 对比无统计学差异($P > 0.05$),具体数据见表 1。

2) 主观图像质量与观察者一致性对比:PETRA 序列主观图像质量平均评分为(3.9 ± 0.2)分,显著高于 3D-TOF-MRA 的(2.8 ± 0.6)分,组间对比 $t = 28.345$, $P < 0.001$;观察者一致性结果显示,PETRA 序列 Kappa 值 0.90,3D-TOF-MRA Kappa 值 0.71,均为良好一致性,且 PETRA 序列一致性更优。图 1 为两种序列主观图像质量评分及观察者 Kappa 值对比柱状图,直观呈现二者差异。

3) 颅内血管分支显示率对比:PETRA 序列对颅内一级、二级血管显示率均为 100%,三级血管显示

率 98.9%，四级血管显示率 95.4%，五级细微血管显示率 92.3%；3D-TOF-MRA 对一、二级血管显示率 100%，三级血管显示率 89.2%，四级血管显示率 76.6%，五级细微血管显示率 68.5%；两者在三至五级血管显示率上差异显著($P < 0.05$)，尤其在五级细微分支及迂曲血管段，PETRA 序列显示优势突出。图 2 为两种序列颅内 1~5 级血管分支显示率对比折线图，清晰地展示各级血管显示率差异趋势。

Table 1. Comparison of objective image quality indicators ($\bar{x} \pm s$) between two magnetic resonance imaging sequences for cerebral vascular examination

表 1. 两种磁共振序列颅内血管检查客观图像质量指标对比($\bar{x} \pm s$)

客观指标	PETRA 序列(n = 286)	3D-TOF-MRA (n = 286)	t 值	P 值
信噪比(SNR)	36.5 ± 6.2	35.8 ± 6.5	1.132	0.258
对比噪声比(CNR)	45.2 ± 6.8	25.1 ± 5.4	32.564	<0.001
信号强度比(SIR)	9.2 ± 1.5	5.1 ± 1.2	31.875	<0.001
信号均匀度(SD/Ave)	0.09 ± 0.02	0.23 ± 0.06	26.941	<0.001

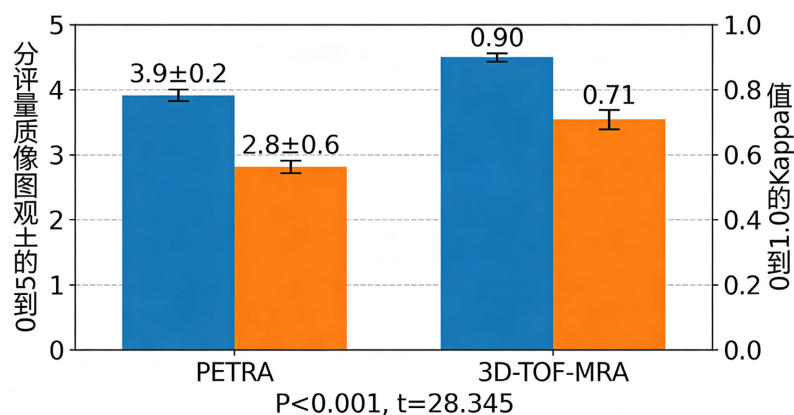


Figure 1. Comparison of subjective image quality scores and observer consistency between two sequences
图 1. 两种序列主观图像质量评分与观察者一致性对比

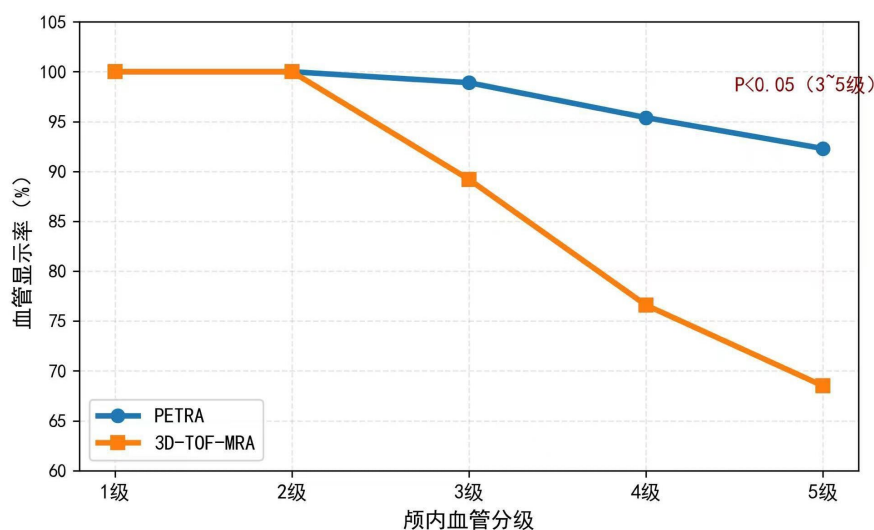


Figure 2. Comparison of display rates of intracranial 1~5 level vascular branches between two sequences
图 2. 两种序列颅内 1~5 级血管分支显示率对比

3.3. 两种序列颅脑血管疾病诊断效能对比

1) 整体诊断效能对比: 以 DSA 结果为参照, PETRA 序列诊断真阳性 245 例、真阴性 25 例、假阳性 3 例、假阴性 13 例; 3D-TOF-MRA 诊断真阳性 201 例、真阴性 20 例、假阳性 8 例、假阴性 57 例。PETRA 序列诊断准确率 93.4%、敏感性 94.7%、特异性 90.5%, 均显著高于 3D-TOF-MRA 的 75.9%、77.8%、72.6%, 组间 χ^2 检验差异均有统计学意义($P < 0.05$); ROC 曲线分析显示, PETRA 序列诊断 AUC 为 0.956 (95% CI: 0.931~0.981), 3D-TOF-MRA 诊断 AUC 为 0.715 (95% CI: 0.662~0.768), PETRA 序列诊断效能远超 3D-TOF-MRA。图 3 为两种序列诊断颅脑血管疾病的 ROC 曲线对比图, 直观反映二者诊断效能差异。

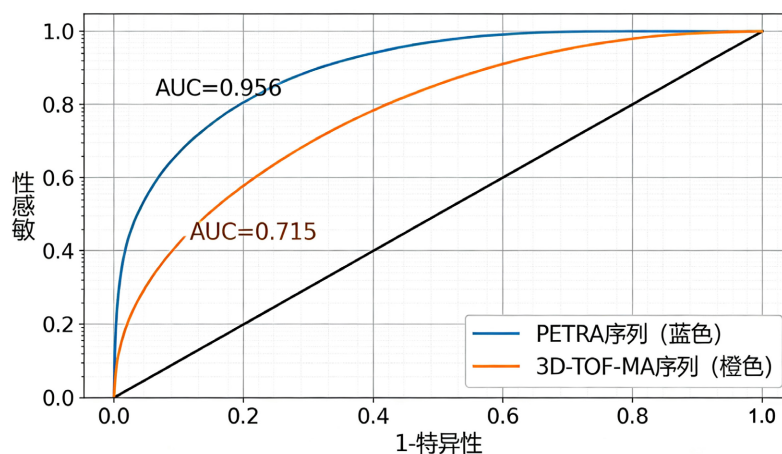


Figure 3. Comparison of ROC curves for diagnosing cerebrovascular diseases using two different sequences
图 3. 两种序列诊断颅脑血管疾病的 ROC 曲线对比

2) 不同类型颅脑血管疾病检出率对比: PETRA 序列对颅内动脉重度狭窄、微小动脉瘤、AVM、DAVF 及三叉神经血管压迫综合征的检出率均在 93% 以上, 显著高于 3D-TOF-MRA 的 60.2%~71.4%, 组间对比差异有统计学意义($P < 0.05$); 对于颅内动脉轻、中度狭窄及 3 mm 以上动脉瘤, 两种序列检出率均超 85%, 组间对比无统计学差异($P > 0.05$), 具体数据见表 2。图 4 为两种序列不同类型颅脑血管疾病检出率对比分组柱状图, 清晰地呈现各病变类型的检出率差异。

Table 2. Comparison of detection rates of different types of cerebrovascular diseases using two types of magnetic resonance imaging sequences [n (%)]

表 2. 两种磁共振序列不同类型颅脑血管疾病检出率对比[n (%)]

颅脑血管疾病类型	确诊例数	PETRA 序列检出率	3D-TOF-MRA 检出率	χ^2 值	P 值
颅内动脉轻度狭窄(狭窄率 < 50%)	35	34 (97.1%)	30 (85.7%)	2.857	0.091
颅内动脉中度狭窄(50%~69%)	48	47 (97.9%)	41 (85.4%)	4.941	0.026
颅内动脉重度狭窄(70%~99%)	55	54 (98.2%)	33 (60.0%)	24.678	<0.001
微小动脉瘤(直径 < 3 mm)	21	20 (95.2%)	13 (61.9%)	6.286	0.012
3 mm 以上动脉瘤	25	25 (100.0%)	22 (88.0%)	3.158	0.076
动静脉畸形(AVM)	32	32 (100.0%)	23 (71.9%)	10.667	0.001
硬脑膜动静脉瘘(DAVF)	19	18 (94.7%)	13 (68.4%)	4.381	0.036
三叉神经血管压迫综合征	23	22 (95.7%)	16 (69.6%)	4.972	0.026

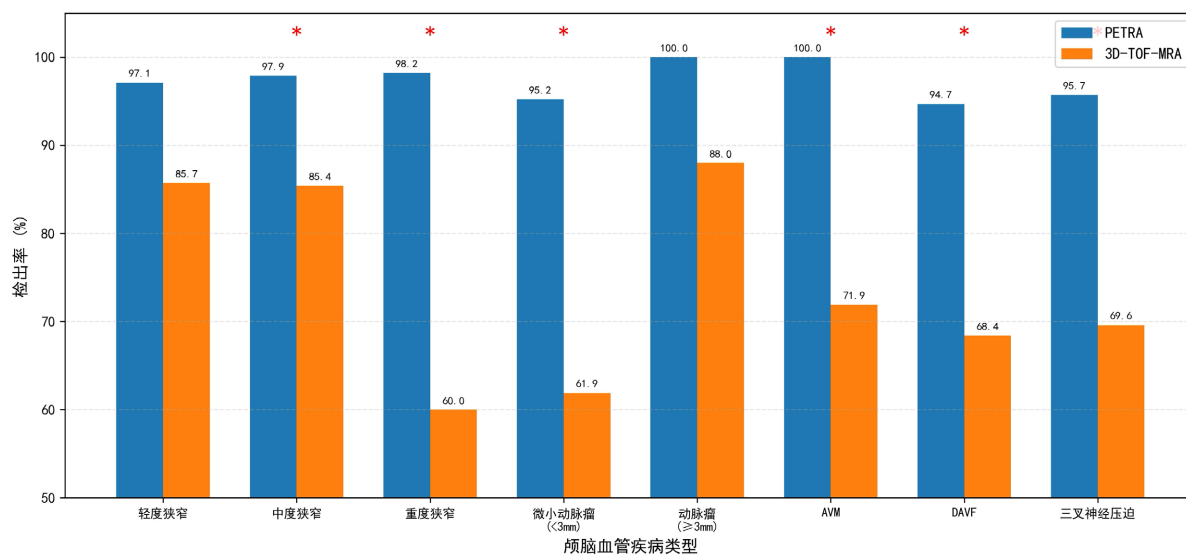


Figure 4. Comparison of detection rates of different types of cerebrovascular diseases between two sequences

图 4. 两种序列不同类型脑血管疾病检出率对比

3.4. 两种序列检查相关情况对比

两种序列均无需注射对比剂，全程无电离辐射，本研究所有患者均顺利完成检查，无对比剂过敏、穿刺出血等不良反应，安全性均优异；检查耗时方面，PETRA 序列扫描时间为 5~6 min，短于 3D-TOF-MRA 的 6~7 min，且扫描过程中噪声更低，患者主观耐受度评分更高；检查成本方面，3D-TOF-MRA 设备适配性强，检查费用显著低于 PETRA 序列，更适合基层医疗机构普及。图 5 为两种序列检查耗时及患者耐受度评分对比，直观展示二者检查相关指标差异。

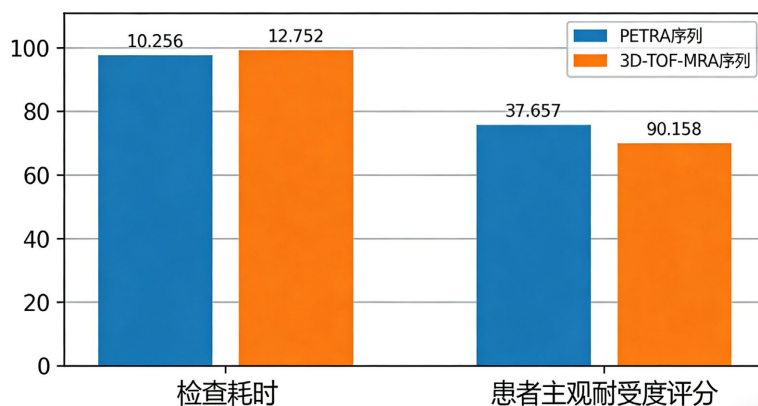


Figure 5. Comparison of time consumption and patient tolerance scores between two types of sequence examinations

图 5. 两种序列检查耗时及患者耐受度评分对比

4. 讨论

脑血管解剖结构复杂、分支纤细且走行迂曲，对成像技术的分辨率、背景抑制能力及血流适应性要求极高^[10]。DSA 作为诊断金标准虽精准度高，但属有创操作，存在一定手术风险，且检查费用高昂，无法作为常规筛查及随访手段，因此无创 MRA 序列的优化与选择，始终是脑血管影像诊断领域的研究重点。3D-TOF-MRA 与 PETRA 序列均为无创无对比剂血管成像技术，但其成像原理与技术优势存在

本质差异，两者的诊断效能对比对临床个体化应用具有重要指导意义。

3D-TOF-MRA 是基于血流流入增强效应的经典 MRA 序列，其核心原理为利用短 TR 序列使成像层面内的静止组织达到饱和状态，而未饱和的流入血流进入成像层面后产生高信号，从而实现血管与背景组织的区分[11]。本研究结果显示，3D-TOF-MRA 对颅内大脑中动脉、大脑前动脉等一、二级大血管主干的中重度狭窄检出率超 85%，与国内多项研究结论一致[12]，这得益于大血管主干血流速度快，流入增强效应显著，血管信号饱满且稳定，可清晰反映血管狭窄的部位与程度。同时该序列具备显著临床优势：无需对比剂，规避了对比剂过敏、肾损伤的风险，适配于肝肾不全、对比剂禁忌患者；操作流程简便，无需复杂的序列调试与后处理，设备适配性强，基层医院均可开展；检查费用低廉，患者接受度高，非常适合颅脑血管疾病的常规初筛、健康体检及术后随访。但本研究也明确了 3D-TOF-MRA 的固有缺陷，其一，血流依赖性强，对慢血流、湍流区域适配性差，颈内动脉虹吸段等血管迂曲部位易形成湍流，颅内四、五级细微分支血流速度缓慢，均会导致流入增强效应减弱，出现血管信号丢失、断裂及伪影。其二，背景组织抑制效果有限，脑组织、脑脊液的信号干扰无法彻底消除，导致图像 CNR 与 SIR 偏低，信号均匀度差，主观图像质量评分不理想。其三，微小病变检出能力不足，直径 $< 3\text{ mm}$ 的微小动脉瘤易被背景信号掩盖，漏诊率较高，难以满足复杂颅脑血管疾病精准诊断需求。

磁共振 PETRA 序列是新一代纯血池无创血管成像技术，其以超短回波时间、高平行采集加速因子及精准背景信号抑制技术为核心，突破了传统 MRA 的血流依赖性限制[13]。本研究中，PETRA 序列的 CNR、SIR 显著高于 3D-TOF-MRA，信号均匀度更优，核心原因在于其超短 TE 设计可有效减少血管信号衰减，结合专属背景抑制技术，能彻底剥离脑组织、脑脊液、颅骨的干扰信号，仅保留血管血池信号，同时其无血流依赖性，无论快血流、慢血流还是湍流区域，均能实现稳定显影。

对颈内动脉虹吸段迂曲血管、颅内远端细微分支的显示效果远超 3D-TOF-MRA。在诊断效能上，PETRA 序列整体诊断准确率、敏感性均超 93%，AUC 达 0.956，尤其对微小动脉瘤、AVM 引流静脉、DAVF 瘘口等临床诊断难点病变，检出率均超 93%，可清晰地显示微小病变的形态、大小及与周围血管的解剖关系，最大程度降低漏诊风险[14]。此外，PETRA 序列扫描时间更短、扫描噪声更低，患者耐受度更优，且同样无需对比剂，安全性与 3D-TOF-MRA 相当。当然，PETRA 序列也存在局限性：对高端 3.0 T 磁共振设备依赖性高，基层医院普及受限；序列调试与后处理对操作人员技术要求更高，检查费用高于 3D-TOF-MRA。

结合两种序列的优势与局限性，本研究提出临床应用优化策略：临床无需采用单一序列一刀切的应用模式，应实行个体化选用。健康体检、常规初筛、对比剂禁忌患者及基层医疗机构，优先选择 3D-TOF-MRA，实现低成本、高效率初步诊断；初筛异常、疑似微小动脉瘤、血管畸形、动静脉瘘等复杂病变，或需术前精准评估病变解剖关系时，首选 PETRA 序列；疑难复杂病例可采用双序列联合检查，取长补短，降低漏诊误诊率[15]。随着磁共振技术迭代，PETRA 参数持续优化、检查成本逐步下降，未来有望实现技术下沉，服务基层临床诊疗。

本研究的局限性：本研究仍存在若干不足之处：第一，研究为单中心回顾性研究，样本仅来源于单一医疗机构，存在一定病例选择偏倚，人群代表性有限，研究结论外推至多中心、不同地区人群时需谨慎；第二，研究仅采用固定一套 PETRA 与 3D-TOF-MRA 扫描参数，未设置不同翻转角、TR/TE、平行加速因子等参数对照，未能探索两种序列最优成像参数组合；第三，未纳入不同磁场强度设备对比，仅基于 3.0 T 磁共振完成扫描，无法明确低场强下两种序列的诊断差异；第四，未开展长期临床随访，未评估两种序列影像表现与患者远期预后、卒中复发风险的关联。上述局限性一定程度上限制了结论的普适性与深度，后续可开展多中心、前瞻性、大样本对照研究，优化扫描参数设计，拓展不同场强设备应用对比，并结合长期随访数据进一步验证两种序列在颅脑血管疾病筛查、诊断及预后评估中的临床价值。

5. 结论

磁共振 PETRA 序列在颅脑血管图像质量、细微血管分支显示、复杂及微小病变精准诊断中均具有显著优势, 诊断效能优于 3D-TOF-MRA, 且扫描耗时短、患者耐受度好, 适合颅脑血管复杂病变精准诊断与术前评估; 3D-TOF-MRA 操作简便、成本低廉、设备适配性强, 在常规初筛、健康体检及基层诊疗中具有不可替代价值。临床不应机械固定选用某一种成像序列, 需结合具体临床问题、病变类型、血管解剖位置及医院设备条件进行个体化合理选择, 必要时联合两种序列协同诊断, 进而提升颅脑血管疾病整体诊断精准性与诊疗效率。

声明

本研究经陕西中医药大学第二附属医院伦理委员会批准(审批号: LW2026005-2), 患者及家属均签署知情同意书。

基金项目

陕西省教育厅, 自然科学专项, 21JK0593;

陕西省科学技术厅, 陕西省自然科学基金计划, 2024JC-YBQN-0795。

参考文献

- [1] 《中国急性缺血性卒中诊治指南 2023》——卒中识别、处理与转运[J]. 实用心脑血管病杂志, 2026, 34(4): 24.
- [2] 本刊编辑部. 《脑血管病防治指南(2024 年版)》脑血管病预防要点[J]. 实用心脑血管病杂志, 2025, 33(5): 6.
- [3] 赵艳军. 磁共振血管成像技术在颅内动脉瘤诊断中的应用价值[J]. 实用医学影像杂志, 2025, 26(5): 362-365.
- [4] 卓潞. 基于 3D-TOF-MRA 的 MRI 成像技术对颅脑血管病患者动脉硬化狭窄程度的评估价值[J]. 现代医用影像学, 2025, 34(7): 1189-1192.
- [5] 袁畅, 张煜堃, 曹家骏, 等. 头颈联合 3D-TOF-MRA 人工智能辅助压缩感知序列的优化[J]. 磁共振成像, 2024, 15(4): 139-144+152.
- [6] 齐欣, 沙琳, 吕建波, 等. ZTE-MRA 与 TOF-MRA 对脑动脉狭窄诊断价值对比研究[J]. 磁共振成像, 2021, 12(2): 70-73.
- [7] 黎丽, 孟志华, 刘干辉. Silent MRA 在颅内动脉瘤诊断及术后疗效评估中的价值[J]. 中国医师杂志, 2022, 24(11): 1722-1725.
- [8] 牛俊霞, 冉云彩, 陈锐, 等. 对比 PETRA-MRA、TOF-MRA 及 CTA 评估颅脑前循环动脉狭窄[J]. 中国医学影像技术, 2022, 38(11): 1611-1615.
- [9] 中国医师协会神经介入专业委员会, 焦力群, 赵振伟, 高鹏. 颅内动脉粥样硬化性狭窄影像学评价专家共识[J]. 中国脑血管病杂志, 2021, 18(8): 575-584.
- [10] 中国卒中学会神经介入分会, 缪中荣, 孙瑄, 孙大鹏. 急性缺血性卒中血管内治疗技术中国专家共识 2025 [J]. 中国卒中杂志, 2025, 20(11): 1428-1459.
- [11] 加速颅内飞行时间磁共振血管造影: 深度学习助力提升影像质量[EB/OL]. 生物通. <https://m.ebiotrade.com/newsf/2025-3/20250318055914087.htm>, 2025-03-18.
- [12] 孟庆娟, 马锐光, 钱锐. 3D-TOF-MRA 在颅内动脉粥样硬化早期诊断中的应用价值[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(19): 98-100.
- [13] 龚河军, 吕剑. ZTE 技术磁共振血管造影对脑血管畸形的诊断价值[J]. 中华介入放射学电子杂志, 2016, 4(4): 224-226.
- [14] 林美烟, 张杨, 李福锁, 等. 磁共振图像融合技术在判别原发性三叉神经痛责任血管的临床应用[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2023, 21(7): 30-32.
- [15] 宋宇, 晁迎九, 徐运军. 磁共振 3D TOF-MRA 和 ZTE-MRA 在脑血管成像的对比[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(12): 1529-1533.