论著·“神经外科疾病诊疗新进展”重点号

3 mL低剂量钆对比剂联合3D-TWIST序列在<70 kg人群中CE-MRV诊断准确率与标准剂量等效:一项非随机对照研究

孙 岩,陈 劼,张羽生,陈 林,谭伟月,庄启湘,刘可夫 南京医科大学附属苏州医院放射科,江苏苏州

[摘要] **目的** 针对常规剂量钆对比剂在颅脑对比增强磁共振静脉成像(contrast enhanced-MRV,CE-MRV)中存在的体内沉积风险与安全性问题,探讨低剂量钆对比剂联合3D-时间分辨交叉随机轨迹成像(time-resolved angiography with interleaved stochastic trajectories,TWIST)序列在颅内静脉窦成像中的可行性,评估该方案对图像质量及诊断准确率的影响。**方法** 采用前瞻性单中心的非随机对照研究,纳入2022年11月至2024年5月在南京医科大学附属苏州医院放射科西门子Skyra 3.0 T磁共振上接受检查的196名患者,所有受检者随机分为A组(n=20)、B组(n=78)、C组(n=98)。B组和C组按体质量分层以10 kg为间隔(40~<100 kg),分别对应B4~B9及C4~C9亚组。A组作为金标准:常规剂量(0.1 mmol/kg)钆喷酸葡胺原液,扫描参数为K空间中心区10%/周围区20%的3D-TWIST序列。B组:3 mL钆剂稀释至15 mL注射,扫描参数同A组。C组:3 mL钆剂稀释至15 mL注射,扫描参数为K空间中心区40%/周围区20%的3D-TWIST序列。分别客观比较B组和C组的不同亚组与A组在颅内静脉窦最大信号强度的信噪比(signal-to-noise ratios,SNR)。主观比较由2名资深放射诊断医生进行评分,分别对A组及B组、C组不同亚组间的颅脑CE-MRV成像质量采用3分标准:1分表示不可见或无法辨别出颅静脉窦血管段,2分表示颅静脉窦血管段中等图像质量显示,3分表示图像对颅静脉窦血管段的高质量显示。进一步分别比较B组、C组不同亚组的颅静脉窦诊断正确率是否与A组间存在差异。**结果** A组与B组比较,除B4、B7亚组的下矢状窦外,A组各静脉窦的SNR均高于B组各亚组。A组与C组比较,在C4、C5、C6亚组中,除C4亚组的下矢状窦SNR高于A组(P<0.002 8),其余静脉窦SNR差异均无统计学意义(P均>0.002 8);在C7、C8、C9亚组中,除C7亚组的下矢状窦外,各静脉窦SNR均低于A组。C组各亚组SNR均高于同体质量B组各亚组。主观图像质量全部评分≥2分,A组与B4~B6、C4~C8各亚组均无差异(P均>0.004 17)。A组、B组、C组诊断正确率分别为100.00%、98.71%、100.00%,两两比较均无统计学差异(P均>0.016 7)。**结论** 低剂量(3 mL)钆对比剂联合优化3D-TWIST序列(K空间中心区40%)在颅脑CE-MRV中可行,可显著降低钆沉积风险。推荐用于体质量<70 kg患者,可替代常规标准剂量方案;70~89 kg患者图像质量主观满足诊断需求,但需进一步提升SNR。

[关键词] 磁共振成像;TWIST序列;颅内静脉窦;低剂量;钆对比剂
[中图法分类号] R445.2;R743;R981.1 [文献标志码] A

A 3 mL low-dose gadolinium-based contrast agent combined with 3D-TWIST sequence yields diagnostic accuracy equivalent to standard-dose CE-MRV in patients weighing <70 kg: a non-randomized controlled study

Sun Yan, Chen Jie, Zhang Yusheng, Chen Lin, Tan Weiyue, Zhuang Qixiang, Liu Kefu Department of Radiology, Affiliated Suzhou Hospital of Nanjing Medical University, Suzhou, Jiangsu, China

[**Abstract**] **Objective** To address the safety concerns regarding gadolinium deposition associated

[基金项目] 苏州市体育局体育科研局管课题(TY2025-422)
[通信作者] 刘可夫,E-mail:lkf77@126.com

2097-0927/Copyright © 2026, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循CC BY许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
引用格式:孙岩,陈劼,张羽生,等.3 mL低剂量钆对比剂联合3D-TWIST序列在<70 kg人群中CE-MRV诊断准确率与标准剂量等效:一项非随机对照研究[J].陆军军医大学学报,2026,48(17):2408-2417.DOI:10.16016/j.2097-0927.202604075.
Citation:Sun Y,Chen J,Zhang Y S,*et al*. A 3 mL low-dose gadolinium-based contrast agent combined with 3D-TWIST sequence yields diagnostic accuracy equivalent to standard-dose CE-MRV in patients weighing <70 kg: a non-randomized controlled study[J]. J Army Med Univ,2026,48(17):2408-2417. DOI:10.16016/j.2097-0927.202604075.

with standard-dose gadolinium-based contrast agents in cerebral contrast-enhanced magnetic resonance venography (CE-MRV), this study aims to investigate the feasibility of a low-dose gadolinium protocol combined with a 3D time-resolved angiography with stochastic trajectories (TWIST) sequence for intracranial venous sinus imaging, and to evaluate its impact on image quality and diagnostic accuracy. **Methods** A prospective, single-center, non-randomized controlled study was conducted on 196 patients who underwent examinations on a Siemens Skyra 3.0 T MR scanner at Department of Radiology of Suzhou Hospital Affiliated to Nanjing Medical University from November 2022 to May 2024. All participants were divided into 3 groups: Group A (n=20), Group B (n=78), and Group C (n=98). Groups B and C were further stratified by body weight at 10 kg intervals (40 to <100 kg) into subgroups B4–B9 and C4–C9, respectively. Group A served as the reference standard: standard-dose (0.1 mmol/kg) gadopentetate dimeglumine administered undiluted, with a 3D-TWIST sequence using 10% central/20% peripheral k-space sampling. Group B received 3 mL of gadolinium-based contrast agent diluted to a total volume of 15 mL, with the same acquisition parameters as Group A. Group C received 3 mL of gadolinium-based contrast agent diluted to 15 mL, with a 3D-TWIST sequence using 40% central/20% peripheral k-space sampling. Objective comparison of the signal-to-noise ratio (SNR) of the maximum signal intensity in intracranial venous sinuses was conducted between different body weight subgroups of Groups B and C versus Group A. Subjective image quality was independently assessed by 2 senior radiologists using a 3-point scoring scale: 1=intracranial venous sinus segments not visible or indistinguishable; 2=moderate image quality with discernible venous sinus segments; 3=high-quality delineation of intracranial venous sinus segments. Furthermore, pairwise comparisons of diagnostic accuracy for intracranial venous sinus evaluation were performed between different subgroups of Group B and Group C versus Group A, respectively. **Results** Comparison between Group A and Group B: Except for the inferior sagittal sinus in subgroups B4 and B7, the SNR of all venous sinuses in Group A was higher than that in each subgroup of Group B. Comparison between Group A and Group C showed that among the C4, C5, and C6 subgroups, the SNR of the inferior sagittal sinus in the C4 subgroup was higher than that in group A (P<0.002 8), while the differences in SNR for the remaining venous sinuses were not statistically significant (all P>0.002 8). In the C7, C8, and C9 subgroups, the SNR of each venous sinus was lower than that in group A, except for the inferior sagittal sinus in the C7 subgroup. The SNR of all subgroups within group C was higher than that of the corresponding subgroups in group B with the same body weight. All subjective image quality scores were ≥2, with no significant differences were found between group A and subgroups B4–B6 and C4–C8 (all P>0.004 17). The diagnostic accuracy rates for groups A, B, and C were 100.00%, 98.71%, and 100.00%, respectively, with no statistically significant differences between any 2 groups (all P>0.016 7). **Conclusion** A low-dose (3 mL) gadolinium-based contrast agent combined with an optimized 3D-TWIST sequence (40% central k-space sampling) is feasible for cerebral CE-MRV and may substantially reduce the risk of gadolinium deposition. This protocol is recommended for patients weighing <70 kg as an alternative to the conventional standard-dose regimen. For patients weighing 70–89 kg, subjective image quality meets diagnostic requirements, however, further improvements in SNR are warranted.

[**Key words**] magnetic resonance imaging; TWIST sequence; intracranial venous sinus; low dose; gadolinium-based contrast agent

Supported by the Sports Research Project of Suzhou Sports Bureau (TY2025-422). Corresponding author: Liu Kefu, E-mail: lkf77@126.com

颅脑静脉血管疾病在临床上确诊人数逐年增多,相比于颅脑的CT静脉成像(computed tomography venography,CTV),无辐射的MR影像学检查方法更易于广泛地被临床医生和患者接受,临床常用非增强方法如相位对比静脉血管成像(phase contrast-MRV,PC-MRV)和二维时间飞跃法静脉成像(two-dimension time of flight-MRV,2D TOF-MRV),但二者都有较高的假阳性率和假阴性率[1]。为了减少伪影、提高显示可靠性,对比增强磁共振静脉成像(contrast enhanced-MRV,CE-MRV)应用广泛。经研究证实,颅脑3D CE-MRV与诊断金标准数字减影血管造影(digital subtraction angiography,DSA)的一致性优于2D TOF-MRV[2]。CE-MRV是通过注射顺磁性钆对比剂Gd-DTPA缩短血液T1值,使静脉在T1WI上呈高亮显示、易于观察病灶[3],目前主流采用透视触发法,即在快速动态扫描中实时监测对比剂到达目标血管后切换至3D Flash采

集,但该方法需按标准剂量(0.1~0.2 mmol/kg)注射钆剂,钆对比剂已被证实会在肝脏骨骼及脑部特别是苍白球和齿状核沉积[4],对明显肾功能损害患者会导致肾源性系统性纤维化风险,安全性备受关注[5-6]。同时仅单期采集,对技术操作人员要求较高,对操作者依赖性强,易因主观判断导致失败。为此本研究弃用传统透视触发法,改用较新的三维时间分辨交叉随机轨迹成像(time-resolved angiography with interleaved stochastic trajectories,TWIST)序列进行4D CE-MRV扫描。TWIST序列具备高时间与空间分辨率,可多时相连续采集,允许使用低剂量对比剂,对多数主要血管病变的诊断敏感性及特异性堪比DSA,尤其适用于动静脉畸形、瘘管、分流及多种先天性血管病变,特别是疾病中典型的非对称性充盈缺损。该技术的主要缺点是采集数据量大,对细小血管分支的时间分辨率有限。因此,它常用于血流速度极快或流速不可预测的情况,尤其是无法屏气的患者和儿童[7]。

本研究旨在最大程度降低对比剂风险,重点探索采用少剂量钆剂,同时通过提高3D-TWIST序列K空间中心区域数据采集比例来补偿低钆剂用量信号损失,提高CE-MRV显示效果,力求在满足临床诊断需求的前提下,以更低剂量获得满意的颅脑静脉成像。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究为前瞻性的单中心非随机对照研究,纳入2022年11月至2024年5月在南京医科大学附属苏州医院放射科接受颅脑CE-MRV成像的受检者。纳入标准:顺利完成3D-TWIST扫描并获得可进行临床诊断评估的颅脑静脉影像者。排除标准:①受检者无法配合导致磁共振成像模糊至无法评估;②第一组测量的图像最大密度投影(maximum intensity projection,MIP)后颅脑区域有造影剂出现。按上述标准未发现第一组原始像MIP后有颅内血管显示病例,最终共纳入196名受检者,其中男性102名,女性94名,平均年龄(56.73±17.20)岁。研究已经过南京医科大学附属苏州医院伦理委员会批准(KL901391),所有受试者了解检查过程并签署知情同意书。

1.2 影像检查方法

1.2.1 受检者分组及扫描序列 全部受检者使用Skyra 3.0 T磁共振(西门子,德国)完成检查,采用头先进仰卧位扫描,且扫描均使用20通道相控阵专用头颈联合线圈。对所有受检者行注射对比剂钆喷酸葡胺原液[化学结构为线性螯合物,离子型浓度0.5 mol/L,3.0 T弛豫率为3.7/(mmol·s)],经肾脏血清消除半衰期90 min)的矢状位3D-TWIST序列扫描。所有受检者有同等机会被随机分配至A组、B亚组或C亚组,各组抽签预设分配比例为1∶6∶6(A组1个、B亚组6个、C亚组6个,共13组),最终纳入分析的有效样本为A组20例、B亚组78例、C亚组98例。B组和C组按体质量分层以10 kg为间隔(40~<100 kg),分别对应B4~B9及C4~C9亚组。A组:常规剂量(0.1 mmol/kg)钆喷酸葡胺原液,扫描参数为K空间中心区10%/周围区20%的3D-TWIST序列。B组:3 mL钆剂稀释至15 mL注射,扫描参数同A组。C组:3 mL钆剂稀释至15 mL注射,扫描参数为K空间中心区40%/周围区20%的3D-TWIST序列。

1.2.2 注射方案及图像后处理 所有受检者使用双筒高压注射器,对比剂注射结束后均连续注射20 mL生理盐水且对比剂和生理盐水均先后经同一通路注射到人体,钆剂和生理盐水注射流速均为3 mL/s,3D-TWIST序列扫描在时间轴上进行共20次测量,由于3组的第一期全部K空间采集时间均为6.21 s,叠加3.9 s准备时间,所以3D-TWIST序列开始扫描后延迟约10.1 s后立即开始注射钆对比剂,扫描后自动创建颅脑血管动态减影3D MIP,显示每个不同时间分辨率节点的脑血管区域钆剂的流入,最后生成融合所有时间分辨率节点的3组标准解剖方位(矢状位、冠状位、横断位)最大信号投影3D MIP影像,每组标准方位均包含19幅不同时间脑血管静态视图,以描绘整个径流脉管系统。其中A组和B组成像3D-TWIST序列参数完全相同,仅存在钆剂用量单因素差异;B组和C组钆剂用量用法完全相同,仅3D-TWIST序列的K空间中心区数据采集比例由10%(B组)增加到40%(C组)的单因素差异。A组、B组和C组的不同颅脑静脉成像序列扫描参数见表1。

1.3 计算颅内静脉窦最大信号强度信噪比(signal-to-noise ratios,SNR)

1.3.1 感兴趣区(region of interest,ROI)选取及噪声测量 在西门子syngo后处理工作站,一名放射科资深技师分别将3组扫描后生成的融合所有时间节点的MR矢状位和冠状位MIP影像发送到测量曲线(mean curve)界面进行最大信号强度值测量,所有测量ROI位置选取均在颅内静脉窦相对固定点位上进行,其中上矢状窦、下矢状窦、直窦的最大信号强度在矢状位的MIP图组时间信号曲线上测量;左右横窦、左右乙状窦的最大信号强度在冠状位MIP图组时间信号曲线上测量。由于存在一侧横窦优势或变异的

表1 磁共振3D-TWIST序列扫描参数

Table 1 Scan parameters of the 3D-TWIST magnetic resonance sequence

Parameters	Group A	Group B	Group C
Voxel size/mm^3	1.0×1.0×1.0	1.0×1.0×1.0	1.0×1.0×1.0
Slices	160	160	160
3D block partial fourier factor	6/8	6/8	6/8
TR/ms	2.27	2.27	2.27
TE/ms	0.93	0.93	0.93
Flip angle/°	16	16	16
Sampling rate A/B	10%/20%	10%/20%	40%/20%
Temporal resolution/s	1.74	1.74	3.23
Temporal footprint/s	6.21	6.21	6.21
Acquisition time/(min:s)	0:48	0:48	1:14
FOV/mm^2	256×256	256×256	256×256
GRAPPA imaging factor	6	6	6
Bandwidth/(Hz/Px)	750	750	750

TR: repetition time; TE: echo time; A/B: (K-space sampling rate) central region/peripheral region; FOV: field of view; GRAPPA: generalized autocalibrating partially parallel acquisitions

受检者会造成2侧信号强度较大差异,故此左右横窦和左右乙状窦均取2侧测量结果平均值进行比较;其次背景噪声标准差分别在矢状位和冠状位2组颅静脉窦最大信号强度对应显影时间的MIP影像上测量,测量ROI位置严格选择远离颅脑静脉血管中心显示区,即所有噪声测量在MIP图像2侧上方边缘的空气区域位置进行,且背景噪声标准差全部测量3次取其平均值。本研究噪声测量虽在MIP图像上进行,但测量区域严格限定于双侧上方空气区,与临床阅片时背景噪声评估区域一致,可反映实际诊断场景下的信噪比感知水平。

1.3.2 组间比较及SNR计算公式 由于A组受检者是按照临床推荐剂量0.1 mmol/kg和默认3D-TWIST序列(K空间数据采集比例中心区10%/周围区20%)进行成像[8],故此本项研究将A组颅脑MRV静脉窦最大信号强度SNR测量结果作为金标准,分别比较B组(单纯降低钆剂量)和C组(降低钆剂量同时增加3D-TWIST序列K空间中心区数据采集比例至40%)中不同体质量亚组受检者颅静脉窦最大信号强度SNR与金标准间是否存在差异。SNR计算公式如下:SNR=SIV/SD,其中SIV代表不同颅静脉最大信号强度,SD为其所对应背景噪声的标准差。

1.4 图像质量主观评定

由从事磁共振工作10年以上的2名诊断医生对所有受检者颅脑MRV静脉窦图像行盲法评估,2名医生作为观察者共同给出评分意见不一致时协商后给出一致意见。评分基于1~3分的Likert量表:1分表示不可见或无法从背景噪声中辨别出颅静脉窦血管段;2分表示颅静脉窦血管段中等图像质量显示,进行可靠的临床诊断信心不充足;3分表示图像对颅静脉窦的高质量显示,诊断信心十足。分别比较B组与C组的不同体质量亚组和A组间在3D-TWIST序列影像质量主观评分方面是否存在差异,2分及以上满足诊断要求。2周后由其中1名资深诊断医生再复审一遍以消除观察者自身偏差。

1.5 颅静脉窦诊断正确率的比较

由上述2名资深诊断医生共同对全部受检者的颅脑MR静脉窦影像进行盲法评估,并且给出诊断结论,意见不一致由另外1名资深诊断医生进行裁决后给出最终诊断结论。由多模态成像(如DSA、随访MRI等)和临床表现共同得出的临床最终诊断结果作为参考金标准,并以此为标准来比较3种不同MRV扫描方法中A组分别与B组、C组在判断颅静脉窦异常(评估仅针对静脉窦主干血管包括血管畸形、静脉窦栓塞)方面的正确率(正确的样本占总样本的比例)是否存在差异。计算公式为:正确率(accuracy)=[真阳性例数(true positives,TP)+真阴性例数(true negatives,TN)]/总例数×100%。

1.6 统计学分析

采用SPSS 24.0软件进行,计数资料采用频数(%)进行统计描述,计量资料符合正态分布时采用$\bar{x}\pm s$进行统计描述。B组和C组的不同亚组间体质量的客

观比较采用Mann-Whitney秩和检验,P<0.05表示差异具有统计学意义;A组分别与B组的6个亚组、C组的6个亚组,以及B组与C组相同体质量亚组间脑静脉窦最大信号强度SNR的客观比较,均分别采用Mann-Whitney检验并行Bonferroni校正调整,P<0.05/18=0.002 8表示差异具有统计学意义;A组分别与B组和C组不同亚组间主观成像质量评分采用Mann-Whitney检验并行Bonferroni校正调整,P<0.05/12=0.004 17表示差异具有统计学意义;A组分别与B组、C组间正确率两两比较使用Fisher精确概率检验并采用Bonferroni校正调整,P<0.05/3=0.016 7表示差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 低剂量组间体质量比较

196名受检者中,颅内静脉畸形16例,静脉栓塞23例,未见明显异常157例。A组20人,平均体质量(61.29±8.43)kg,共注射钆喷酸葡胺原液232.9 mL;B组78人,共注射234 mL;C组98人,共注射294 mL。B组与C组相对应亚组的体质量比较,差异均无统计学意义(P均>0.05)。详见表2。

2.2 提升中心区采样率使低剂量钆剂与常规剂量在<70 kg时SNR等效

A组与B组比较,除B4、B7亚组的下矢状窦外,A组各静脉窦的SNR均高于B组各亚组。A组与C组比较,在C4、C5、C6亚组中,除C4亚组的下矢状窦SNR高于A组(P<0.002 8),其余静脉窦SNR差异均无统计学意义(P均>0.002 8);在C7、C8、C9亚组中,除C7亚组的下矢状窦外,各静脉窦SNR均低于A组。此外,C组各亚组所有静脉窦的SNR均值均高于同体质量对应的B组各亚组。具体数据见表3。

2.3 提升中心区采样率可改善主观图像质量

与A组比较,B4、B5、B6及C4、C5、C6、C7、C8亚组颅脑MRV图像质量主观评分均值差异均无统计学意

表2 不同K空间采样率组间体质量比较(例,$\bar{x}\pm s$)

Table 2 Comparison of body weight among groups with different K-space sampling ratios (n,$\bar{x}\pm s$)

Subgroup body weight/kg	Group B (n=78)		Group C (n=98)		Z	P
	Number	body weight/kg	Number	body weight/kg		
40 to <50	5	46.40±2.70	8	44.38±2.45	−1.552	0.121
50 to <60	18	56.06±2.73	20	54.75±2.20	−1.611	0.107
60 to <70	25	63.32±3.00	26	64.08±2.80	−0.925	0.355
70 to <80	19	73.26±2.21	23	73.04±2.69	−0.511	0.610
80 to <90	7	86.27±6.37	16	82.69±2.18	−0.553	0.581
90 to <100	4	93.50±3.70	5	91.40±2.19	−1.028	0.304

表3 3 mL剂量钆剂与0.1 mmol/kg钆剂组间SNR比较($\bar{x}\pm s$)

Table 3 Comparison of SNR between a fixed 3-mL gadolinium dose and a weight-based 0.1 mmol/kg regimen($\bar{x}\pm s$)

Group	Superior sagittal sinus	Inferior sagittal sinus	Straight sinus	Left|Right transverse sinus	Left|Right sigmoid sinus
Group A	878.65±190.57	193.32±59.35	584.47±135.70	663.66±173.14	615.35±172.60
Subgroup B4	714.50±228.49	210.22±135.72	468.12±114.83	479.54±75.61	487.57±105.07
Subgroup B5	706.55±118.88	181.90±41.16	450.25±94.69[a]	526.93±105.20	481.33±79.70
Subgroup B6	702.27±202.90	191.03±61.33	458.75±145.38	497.68±166.32[a]	452.82±155.90[a]
Subgroup B7	607.80±105.04[a]	203.19±62.37	398.44±68.91[a]	458.70±101.40[a]	422.00±81.84[a]
Subgroup B8	552.14±80.98[a]	163.15±21.60	329.56±30.74[a]	339.46±88.75[a]	316.86±75.67[a]
Subgroup B9	463.58±98.75	176.34±23.68	283.79±51.93[a]	315.02±112.51	312.04±123.33
subgroup C4	1 116.67±231.25	329.87±96.96[a]	716.77±151.73	920.08±291.18	885.83±286.42
Subgroup C5	922.90±193.38[b]	232.77±74.05	575.21±131.26	692.23±215.21	619.61±203.90
Subgroup C6	842.97±213.46	239.61±70.61	536.37±148.77	605.59±185.61	557.49±168.13
Subgroup C7	735.03±150.98	215.19±83.18	448.57±89.55[a]	503.54±114.63	477.09±133.84
Subgroup C8	610.74±122.83[a]	180.13±50.43	384.58±69.90[ab]	427.74±107.51[a]	392.09±89.37[a]
Subgroup C9	575.09±193.47	187.29±72.56	359.45±99.09	357.27±83.04[a]	342.81±91.49[a]

a: P<0.002 8, compared with Group A; b: P<0.002 8, compared with Group B

义(P均>0.004 17)。A组和C4亚组的评分均值最高,均为3.00±0.00;且C亚组评分均值均高于相应体质量的B亚组。全部图像质量主观评分均为2分及以上,图1、图2分别为2例患者采用3D-TWIST序列(K空间中心区采样率40%,周围区采样率20%)扫描后重建的颅脑静脉三维CE-MRV MIP图像,分别展示了该序列参数下颅内静脉窦栓塞与静脉畸形的显示效果。见表4及图1、2。

2.4 低剂量钆剂诊断正确率无明显变化

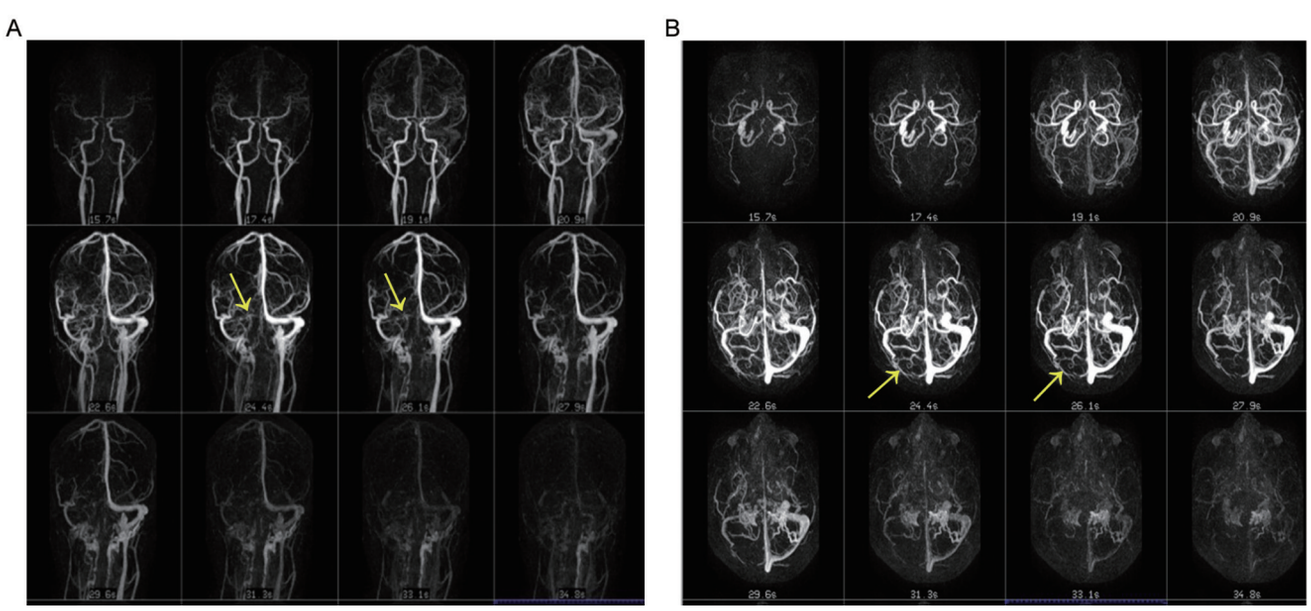
A组、B组、C组正确率结果分别为100.00%、98.71%、100.00%,A组和B组、A组和C组间比较差异均无统计学意义(P均>0.016 7),见表5。

表4 各组间颅脑MRV影像质量的主观评分比较与分布情况(例,$\bar{x}\pm s$)

Table 4 Comparison and distribution of subjective image quality scores for cranial MR venography (MRV) among groups (n, $\bar{x}\pm s$)

Group	Number			Score	Z	P
	1 point	2 points	3 points			
Group A	0	0	20	3.00±0.00	–	–
Subgroup B4	0	1	4	2.80±0.45	−2.000	0.046
Subgroup B5	0	5	13	2.72±0.46	−2.496	0.013
Subgroup B6	0	7	18	2.72±0.46	−2.546	0.011
Subgroup B7	0	7	12	2.63±0.50	−2.958	0.003[a]
Subgroup B8	0	4	3	2.43±0.53	−3.594	<0.001[a]
Subgroup B9	0	3	1	2.25±0.50	−4.053	<0.001[a]
Subgroup C4	0	0	8	3.00±0.00	0.000	1.000
Subgroup C5	0	1	19	2.90±0.22	−1.000	0.317
Subgroup C6	0	3	23	2.88±0.33	−1.554	0.120
Subgroup C7	0	5	18	2.78±0.42	−2.192	0.028
Subgroup C8	0	5	11	2.69±0.48	−2.656	0.008
Subgroup C9	0	3	2	2.40±0.55	−3.618	<0.001[a]

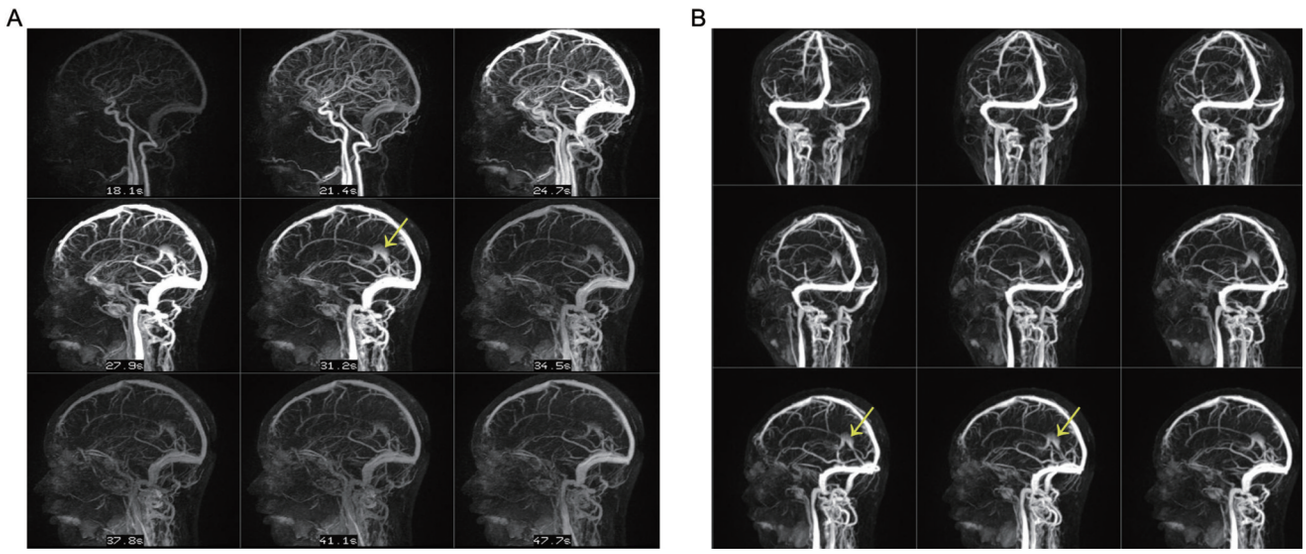
a: P<0.004 17, compared with Group A



A and B: Coronal (A) and axial (B) TWIST venous-phase images at sequential time points after 3 mL gadolinium; Arrow indicates an abrupt interruption of the right transverse sinus, suggestive of thrombosis. Maximum SNRs: superior sagittal 450.49, inferior sagittal 197.02, straight 321.36, transverse (bilat.) 338.36, sigmoid (bilat.) 322.13. The subjective image quality score is 2 points

图1 3 mL钆剂对颅脑静脉栓塞患者的3D-TWIST MR成像(K空间中心/周围采样率=40%/20%)

Figure 1 Cranial 3D-TWIST MR venography after injection of 3 mL gadolinium-based contrast agent in patients with cerebral venous thrombosis (k-space central/peripheral sampling fraction =40%/20%)



A: Sagittal TWIST cerebral venous images at serial time points post-3 mL gadolinium; B: Rotated multi-angle sagittal TWIST cerebral venous images post-3 mL gadolinium. Arrows indicate venous hemangioma-like dilatation of the straight sinus. Maximum SNRs: superior sagittal sinus 978.82, inferior sagittal sinus 213.37, straight sinus 535.00, left and right transverse sinuses 452.20, left and right sigmoid sinuses 454.87. The subjective image quality score is 3 points

图2 3 mL钆剂对颅脑静脉畸形患者的3D-TWIST MR成像(K空间中心/周围采样率=40%/20%)

Figure 2 3D-TWIST MR imaging with 3 mL gadolinium-based contrast agent in patients with cerebral venous malformation (k-space central/peripheral sampling ratio=40%/20%)

表5 3组间颅静脉窦异常检测正确率比较(例)

Table 5 Comparison of diagnostic accuracy for cerebral venous sinus abnormalities(n)

Group	TP	TN	FP	FN	Accuracy/%
A(n=20)	4	16	0	0	100.00
B(n=78)	14	63	0	1	98.71
C(n=98)	19	79	0	0	100.00

TP: true positives; TN: true negatives; FP: false positives; FN: false negatives

3 讨论

3.1 低剂量安全导向下的技术权衡

钆对比剂在长期应用过程中出现了许多不良反应,由于钆会与大分子结合,不仅在大脑中长期滞留沉积,还会诱发肾功能不全患者出现肾源性系统纤维化(nephrogenic systemic fibrosis, NSF)。研究显示,NSF更多见于接受高剂量钆对比剂患者,无论是单次高剂量还是多次累积高剂量,注射剂量越多风险越大,目前尚无有效治疗方法[9-10],因此我国专家建议高危患者使用钆对比剂时每次检查剂量不应高于0.1 mmol/kg[11]。目前行业关注焦点已转向开发低钆剂量MRI技术[12-15]。3D-TWIST序列与传统对比增强MR血管造影术相比,时间分辨率(速度)得到了改进,但在空间分辨率(细节)方面有所妥协,本项研究在平衡时间分辨率的情况下,采用各向同性1.0 mm×1.0 mm×1.0 mm空间分辨率(从临床角度来看这通常被视为较高分辨率),尤其是在评估管径较粗(对比颅内动脉)的静脉血管动态活动时,倘若以此评估管径较细的颅内动脉血管显示则分辨率不足的矛盾就会尤为突显,这也是本项研究未纳入颅内动脉血管的原因。

3.2 基于体质量分层的诊断等效性分析

K空间是以频率为坐标系、用于填充MR原始数据的傅里叶空间,其中心低频区决定图像主要对比度,周围高频区决定解剖结构细节[16]。3D-TWIST序列在造影剂通过期间的整个采集过程中,对中心区K空间实施更频繁的重复采样而周围区欠采样,故其时间分辨率较传统全K空间采集显著提高。扫描过程中,减影及MIP重建均以第一次测量值作为蒙片,因此第一次测量必须在对比剂到达前完成,且第一次测量因需采集周围区完整全矩阵耗时最长。基于此本研究中所有3D-TWIST序列启动扫描后采取延迟注射,以确保首次测量无造影剂干扰。本研究以临床最常用的0.1 mmol/kg标准剂量钆剂,联合序列库默认推荐且临床广泛应用的K空间中心区10%/周围区20%采样方案进行颅脑MRV成像并作为诊断金标准(A组),与之对比的是3 mL低剂量钆剂联合中心区采

样40%/周围区20%的3D-TWIST序列(C组)。该参数调整使时间分辨率由1.74 s增至3.23 s(即时间分辨率下降),但增强了图像对比度。客观评价方面,C组体质量<70 kg受检者在上矢状窦、下矢状窦、直窦、左右横窦及左右乙状窦的最大信号强度SNR与金标准均无统计学差异;主观评分方面,体质量<90 kg受检者的图像质量评分与金标准亦无统计学差异,且主观评价所覆盖的适用体质量范围较客观评价更广。此外,C组中体质量≥70 kg的亚组受检者在部分静脉窦SNR上与金标准出现统计学差异,这可能是由于体质量较大者循环血容量较多,对造影剂浓度的稀释作用更为明显所致。

3.3 高中心区采样提升成像质量

TWIST序列的静脉结构显示依赖于T1WI扰相梯度回波信号,该信号与钆浓度呈非线性饱和关系,即当钆浓度处于中高水平时,信号强度对浓度变化的响应显著减弱[17-18]。此外,该序列的数据共享(view-sharing)机制会产生5~7 s的有效时间跨度(temporal footprint),导致信号增强延迟被拉长;对于被稀释的钆剂在静脉期本就平缓的浓度曲线而言,相当于施加了进一步的时间低通滤波,使得不同时间点、不同静脉分支间的真实钆浓度差异在重建图像中被平滑处理[19-21],最终导致各帧图像间静脉信号趋于相似。与此同时,人眼对医学灰阶图像的辨别能力依赖于局部背景亮度,存在对比度检测阈值[22-23],因此在视觉上静脉亮度对钆浓度变化的表观敏感性进一步降低。尽管如此,本研究发现在3 mL钆剂下,K空间中心区采样40%的3D-TWIST序列较10%设置可获得普遍更高的颅静脉窦最大信号强度SNR。这表明,适当提高K空间中心区采集比例,能够在一定程度上补偿因低剂量钆剂(3 mL)导致的颅静脉窦SNR下降,尤其在体质量<70 kg的受检者中展现出良好的应用前景。所以3D-TWIST序列通过优化K空间中心区采样,实现了颅脑CE-MRV的低剂量钆剂成像,有效降低了对比剂相关副作用风险。

3.4 诊断正确率分析及同类研究比较

本研究中,3 mL低剂量组(B组、C组)与常规剂量组(A组)的诊断正确率均无统计学差异,表明3 mL低剂量3D-TWIST序列与常规方法具有近乎一致的诊断效能。值得注意的是,B组出现1例假阴性,该例MRI显示上矢状窦中末端静脉突然变细,后经国内权威医疗机构确诊为颅内静脉窦非脓性血栓形成。回顾该假阴性病例,有以下原因:①患者合并多系统自身免疫性疾病,而临床实践中少数先天发育纤细或局部狭窄且长期无症状者,其影像表现极易被误判为"个体差异";②非脓性血栓在经历退缩、再通及纤维化后,静脉窦由完全闭塞转为"管腔细而仍通"的状态,影像上缺乏急性血栓典型的高信号及明显充盈缺损,仅表现为"窦管纤细",导致放射诊断医生倾向于保守描述为"局部显影较细或发育异常",而不愿直接做出血栓诊断[24]。在同类研究中,Raczeck等[25]采用动态3D-TWIST序列进行外周血管低剂量成像,在减少50%钆基造影剂用量的情况下仍获得满意的诊断表现;Endler等[26]在1.5 T动物实验中也证实,显著降低钆剂量后3D-TWIST序列仍可实现高质量的动脉MRA成像。与上述既往研究相比,本研究的创新之处在于,通过优化序列参数尤其是K空间中心区采集比例来增强信号对比,从而进一步改善低剂量钆剂条件下的成像效果。本研究虽基于西门子Skyra 3.0 T磁共振设备完成,但其方法与结论具有良好的可推广性,可适用于配置3D-TWIST序列的其他3.0 T MR设备,且对线圈、梯度等硬件无特殊要求。

3.5 研究的局限性与未来展望

本研究存在以下局限性:①样本量相对较少,后续需扩大样本量进一步验证;②研究范围仅限于颅脑静脉,未纳入动脉系统进行对比分析;③参数设置方面,仅对比了3 mL钆剂下TWIST序列K空间中心区10%与40% 2种采集比例,未对其他剂量钆剂及不同采集比例进行探讨;④3 mL造影剂的抽取均由同一名护士手工完成,难以完全避免操作误差;⑤本研究未对静脉窦解剖变异(如横窦优势型、发育纤细)进行亚组分析,此类变异可能在低剂量条件下影响静脉窦的显示效果,因此后续研究应纳入该影响因素;⑥在剂量设计上,本研究旨在降低钆对比剂的负面效应,故对所有患者采用固定低剂量模式而非按体质量调整剂量,这导致低体质量患者成像效果更优,而高体质量患者获益相对有限。此外,已有研究证实7.0 T超高场强MRI的SWI序列在脉络丛静脉成像质量上显著优于常规3.0 T MRI[27],因此我们计划在后续工作中探索7.0 T场强下进一步降低钆剂用量的可行性,以期获得更优的成像效果或实现更低剂量成像。

综上所述,通过提高TWIST序列K空间中心采集比例达40%,联合低剂量(3 mL)钆对比剂在颅脑CE-MRV中可行,能有效克服低剂量对比剂引起的SNR损失,可显著降低钆沉积风险。上述方案推荐用于体质量<70 kg患者,可替代常规标准剂量方案;70~89 kg患者图像质量主观满足诊断需求,但需进一步提升SNR。

利益冲突 本文所有作者声明不存在利益冲突

参考文献:

[1] Lim R P, Hornsey E, Ranatunga D, *et al*. Upper extremity non-contrast magnetic resonance venography (MRV) compared to contrast enhanced MRV and ultrasound[J]. Clin Imaging, 2017, 45: 51-57. DOI: 10.1016/j.clinimag.2017.05.020.

[2] 戴艳芳, 叶明, 吉训明, 等. 不同方法的磁共振静脉成像对颅内静脉窦疾病诊断的比较[J]. 中国脑血管病杂志, 2012, 9(6): 302-306. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2012.06.005.
Dai Y F, Ye M, Ji X M, *et al*. Comparison of the diagnosis of intracranial venous sinus disease with different methods of magnetic resonance venography[J]. Chin J Cerebrovascular Dis, 2012, 9(6): 302-306. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5921.2012.06.005.

[3] 汤光宇, 李懋. 磁共振成像技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2023: 193-197.
Tang G Y, Li M. Magnetic resonance imaging technology and application[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publication, 2023: 193-197.

[4] 孔莹, 李梦双, 陈柱典, 等. 多次使用钆对比剂后MRI平扫小脑齿状核T1WI信号增高的初步研究[J]. 中华放射学杂志, 2018, 52(12): 892-896. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2018.12.002.
Kong Y, Li M S, Chen Z D, *et al*. Increased signal intensity in the dentate nucleus on unenhanced T1-weighted MR images after multiple gadolinium-based contrast material administrations: a preliminary study[J]. Chin J Radiol, 2018, 52(12): 892-896. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2018.12.002.

[5] 袁思殊, 夏黎明, 杨朝霞, 等. 磁共振钆对比剂有关安全性研究现状[J]. 磁共振成像, 2020, 11(8): 717-720. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2020.08.030.
Yuan S S, Xia L M, Yang Z X, *et al*. Research status of gadolinium-based contrast on safety[J]. Chin J Magn Reson Imaging, 2020, 11(8): 717-720. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2020.08.030.

[6] Mallepally A, Kidd J M, Grizzard J D, *et al*. Nephrogenic systemic fibrosis in patients with advanced renal dysfunction following gadolinium-based contrast agents[J]. Radiology, 2025, 317(3): e251794. DOI: 10.1148/radiol.251794.

[7] Chandrashekhara S H, Gulati G S, Sharma S, *et al*. Comparison between time-resolved magnetic resonance angiography and diagnostic digital subtraction angiography in the vascular assessment of nonspecific aorto-arteritis patients: a prospective study[J]. Vasc Endovasc Surg, 2021, 55(6): 586-592. DOI: 10.1177/15385744211010593.

[8] Voth M, Haneder S, Huck K, *et al*. Peripheral magnetic resonance angiography with continuous table movement in combination with high spatial and temporal resolution time-resolved MRA with a total single dose (0.1 mmol/kg) of gadobutrol at 3.0 T[J]. Invest Radiol, 2009, 44(9): 627-633. DOI: 10.1097/RLI.0b013e3181b4c26c.

[9] 中华医学会放射学分会磁共振学组, 中华医学会放射学分会质量控制与安全工作委员会. 钆对比剂临床安全性应用中国专家建议[J]. 中华放射学杂志, 2019, 53(7): 539-544. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2019.07.002.
Magnetic Resonance Group of Chinese Radiology Society, Quality Control and Safety Working Committee of Chinese Radiology Society. Clinical application recommendations on safety of gadolinium contrast agents[J]. Chin J Radiol, 2019, 53(7): 539-544. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2019.07.002.

[10] Woolen S A, Shankar P R, Gagnier J J, *et al*. Risk of nephrogenic systemic fibrosis in patients with stage 4 or 5 chronic kidney disease receiving a group Ⅱ gadolinium-based contrast agent: a systematic review and meta-analysis[J]. JAMA Intern Med, 2020, 180(2): 223-230. DOI: 10.1001/jamainternmed.2019.5284.

[11] 中华医学会放射学分会质量控制与安全管理专业委员会, 卢光明, 王培军, 等. 肾病患者静脉注射钆对比剂应用中国专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(3): 221-230. DOI: 10.3760/cma.j.cn112149-20210330-00294.
Quality Control and Safety Management Committee of Chinese Radiology Society, Lu G M, Wang P J, *et al*. Chinese expert consensus of gadolinium contrast agent use in patients with renal disease[J]. Chin J Radiol, 2022, 56(3): 221-230. DOI: 10.3760/cma.j.cn112149-20210330-00294.

[12] Domingo J L, Semelka R C. Gadolinium toxicity: mechanisms, clinical manifestations, and nanoparticle role[J]. Arch Toxicol, 2025, 99(10): 3897-3916. DOI: 10.1007/s00204-025-04124-x.

[13] Vymazal J, Rulseh A M. MRI contrast agents and retention in the brain: review of contemporary knowledge and recommendations to the future[J]. Insights Imaging, 2024, 15(1): 179. DOI: 10.1186/s13244-024-01763-z.

[14] van der Molen A J, Quattrocchi C C, Mallio C A, *et al*. Ten years of gadolinium retention and deposition: ESMRMB-GREC looks backward and forward[J]. Eur Radiol, 2024, 34(1): 600-611. DOI: 10.1007/s00330-023-10281-3.

[15] Mahmood F, Bernchou U, Harboe F S G, *et al*. Feasibility of a reduced gadolinium dose protocol for MRI-guided radiotherapy in glioblastoma[J]. Acta Oncol, 2025, 64: 1185-1193. DOI: 10.2340/1651-226X.2025.44022.

[16] 李少蕊. Syngo TWIST：动态时间分辨的MR血管造影技术[J]. 磁共振成像，2012，3(5)：387-391. DOI:10.3969/j.issn.1674-8034.2012.05.015.
Li S R. Syngo TWIST for dynamic time-resolved MR angiography[J]. Chin J Magn Reson Imaging，2012，3(5)：387-391. DOI:10.3969/j.issn.1674-8034.2012.05.015.

[17] Schabel M C，Parker D L. Uncertainty and bias in contrast concentration measurements using spoiled gradient echo pulse sequences[J]. Phys Med Biol，2008，53(9)：2345-2373. DOI:10.1088/0031-9155/53/9/010.

[18] Tofts P S. Modeling tracer kinetics in dynamic Gd-DTPA MR imaging[J]. J Magn Reson Imaging，1997，7(1)：91-101. DOI:10.1002/jmri.1880070113.

[19] Donahue K M，Weisskoff R M，Parmelee T J，*et al*. Relaxometry of native blood and blood doped with Gd contrast agents[J]. Magn Reson Med，1995，33(5)：694-701. DOI：10.1002/mrm.1910330507.

[20] Rapacchi S，Natsuaki Y，Plotnik A，*et al*. Reducing view-sharing using compressed sensing in time-resolved contrast-enhanced magnetic resonance angiography[J]. Magn Reson Med，2015，74(2)：474-481. DOI:10.1002/mrm.25414.

[21] Korosec F R，Frayne R，Grist T M，*et al*. Time-resolved contrast-enhanced 3D MR angiography [J]. Magn Reson Med，1996，36(3)：345-351. DOI:10.1002/mrm.1910360304.

[22] Hennig J，Scheffler K，Laubenberger J，*et al*. Time-resolved projection angiography after bolus injection of contrast agent[J]. Magn Reson Med，1997，37(3)：341-345. DOI:10.1002/mrm.1910370306.

[23] Laub G，Kroeker R. Syngo TWIST for dynamic time-resolved MR angiography[J]. MAGNETOM Flash，2006，34(3)：92-95.

[24] 颜雨暄，岳姣，姜永莉，等. 丹参酮ⅡA与灯盏乙素协同抑制PKCδ/NLRC4/Caspase-1通路改善缺血性脑卒中的机制[J]. 空军军医大学学报，2026，47(2)：273-283. DOI：10.13276/j.issn.2097-1656.2026.02.016.
Yan Y X，Yue J，Jiang Y L，*et al*. Mechanism of tanshinone ⅡA and scutellarin in synergistically ameliorating ischemic stroke via inhibition of the PKCδ/NLRC4/Caspase-1 pathway [J]. J Air Force Med Univ，2026，47(2)：273-283. DOI：10.13276/j.issn.2097-1656.2026.02.016.

[25] Raczeck P，Fries P，Massmann A，*et al*. Diagnostic performance of a lower-dose contrast-enhanced 4D dynamic MR angiography of the lower extremities at 3 T using multisegmental time-resolved maximum intensity projections [J]. Magn Reson Imaging，2021，54(3)：763-774. DOI：10.1002/jmri.27631.

[26] Endler C H，Jost G，Pietsch H，*et al*. Effect of contrast agent dose reduction on vascular enhancement and image quality in thoracoabdominal dynamic 3-dimensional magnetic resonance angiography：a systematic intraindividual analysis in pigs[J]. Invest Radiol，2022，57(10)：689-695. DOI:10.1097/RLI.0000000000000882.

[27] 甄志铭，肖诗蕾，刘晨，等. 7.0T MRI SWI序列对脉络丛静脉成像质量的评估价值[J]. 陆军军医大学学报，2023，45(15)：1651-1655. DOI：10.16016/j.2097-0927.202302042.
Zhen Z M，Xiao S L，Liu C，*et al*. Evaluation value of SWI with 7.0T MRI for choroid plexus vein imaging[J]. J Army Med Univ，2023，45(15)：1651-1655. DOI：10.16016/j.2097-0927.202302042.

（**收稿**:2026-04-21;**修回**:2026-06-06）
（编辑 严 涵）