

54 mT超低场磁共振对脑血管疾病的初步临床研究

郭 轶¹, 徐 征², 孟凡钦², 毛海江¹, 徐姝文¹, 李传明^{1*}

¹重庆市急救医疗中心(重庆大学附属中心医院)医学影像科, 重庆

²重庆大学电气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月23日; 录用日期: 2025年10月16日; 发布日期: 2025年10月23日

摘 要

目的: 通过分析正常志愿者及脑血管疾病患者的MR图像, 评价ULF-MRI图像质量及其对脑血管疾病的诊断效能, 探讨ULF-MRI的临床价值。方法: 本研究纳入正常志愿者及脑血管疾病患者各20例。正常志愿者均行头颅HF-MRI及ULF-MRI扫描; 脑血管疾病组均行头颅CT平扫或HF-MRI及ULF-MRI扫描。评价两位影像医生之间各项主观测量及客观评价指标的一致性, 并对比两组受试者HF-MRI及ULF-MRI图像质量差异。评价医生基于ULF-MRI对脑血管疾病的诊断效能及诊断信心, 并于对照学习CT及HF-MRI后再次评价医生基于ULF-MRI对脑血管疾病的诊断效能及诊断信心。结果: ULF-MRI T1WI、T2WI图像质量测量值的组间ICC系数分别为0.996、0.986; HF-MRI T1WI、T2WI图像质量测量值的组间ICC系数分别为0.998、0.977。两组受试者ULF-MRI各序列的图像质量均低于HF-MRI或CT。正常志愿组ULF-MRI与HF-MRI之间, T1WI及T2WI图像的灰质SNR、白质SNR、脑室SNR及三种组织的两两间CNR差异有统计学意义($P < 0.05$); T2-液体衰减反转恢复(T2-weighted fluid-attenuated inversion recovery, T2-FLAIR)图像的灰质SNR、白质SNR、灰质/脑脊液CNR及白质/脑脊液CNR差异有统计学意义($P < 0.05$), 脑室SNR及灰质/白质的CNR差异无统计学意义($P = 0.088$)。脑血管疾病组ULF-MRI与HF-MRI或CT之间的图像质量差异均有统计学意义($P < 0.05$)。基于ULF-MRI, 影像医师对脑血管疾病的初次诊断敏感度为60%, 诊断信心评分为2.5 (1, 2.5); 在对照金标准图像学习后, 诊断敏感度为85%, 诊断信心评分为4 (3.625, 4), 学习前、后诊断信心评分差异有统计学意义($P < 0.05$), 诊断敏感度差异无统计学意义($P = 0.077$)。结论: 目前ULF-MRI的图像质量及其对脑血管疾病的诊断效能尚有待提高, 但能通过对照学习及经验总结显著提高脑血管疾病的诊断效能及医生诊断信心。

关键词

磁共振成像, 超低场磁共振, 高场磁共振, 信噪比, 对比度噪声比, 脑血管病

*通讯作者。

Preliminary Clinical Study of 54 mT Ultra-Low Field Magnetic Resonance Imaging in Cerebrovascular Diseases

Yi Guo¹, Zheng Xu², Fanqin Meng², Haijiang Mao¹, Shuwen Xu¹, Chuanming Li^{1*}

¹Medical Imaging Department, Chongqing Emergency Medical Center (Chongqing University Central Hospital), Chongqing

²School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing

Received: September 23, 2025; accepted: October 16, 2025; published: October 23, 2025

Abstract

Objective: To evaluate the image quality of ultra-low field magnetic resonance imaging (ULF-MRI) and its diagnostic efficacy for cerebrovascular diseases by analyzing MR images of healthy volunteers and patients with cerebrovascular diseases, and to explore the clinical value of ULF-MRI. **Methods:** A total of 20 normal volunteers and 20 patients with cerebrovascular diseases were enrolled in this study. All subjects in the normal volunteer group underwent cranial high field magnetic resonance imaging (HF-MRI) and ULF-MRI scans. For the cerebrovascular disease group, all patients underwent non-contrast cranial CT or HF-MRI (for patients with cerebral infarction) as well as ULF-MRI scan. The consistency of subjective measurements and objective evaluation indicators between the two observers was assessed, and the differences in image quality between HF-MRI and ULF-MRI were compared between the two groups. The diagnostic efficacy and diagnostic confidence of radiologists for cerebrovascular diseases based on ULF-MRI were evaluated. After the radiologists reviewed and learned from the gold standard images (CT and HF-MRI), their diagnostic efficacy and confidence based on ULF-MRI were re-evaluated. **Results:** The inter-observer reliability was good. The inter-observer intraclass correlation coefficients (ICC) for image quality measurements of ULF-MRI T1WI and T2WI were 0.996 and 0.986, respectively; while those for HF-MRI T1WI and T2WI were 0.998 and 0.977, respectively. The image quality of all ULF-MRI sequences in both groups was lower than that of HF-MRI or CT. In the normal volunteer group, there were statistically significant differences in the gray matter (GM) signal-to-noise ratio (SNR), white matter (WM) SNR, ventricular SNR, and pairwise contrast-to-noise ratios (CNR) among the three tissues on T1WI and T2WI images between ULF-MRI and HF-MRI (all $P < 0.05$); there were statistically significant differences in the gray matter SNR, white matter SNR, gray matter/cerebrospinal fluid (CSF) CNR, and white matter/cerebrospinal fluid CNR (GM SNR, WM SNR, GM/CSF CNR, and WM/CSF CNR) of T2-weighted fluid-attenuated inversion recovery (T2-FLAIR) ($P < 0.05$), while there were no statistically significant differences in the ventricular SNR and gray matter/white matter CNR (GM/WM CNR) ($P = 0.088$). In the group with cerebrovascular diseases, there were statistically significant differences in image quality between ULF-MRI and HF-MRI or CT ($P < 0.05$). Based on ULF-MRI, the initial diagnostic sensitivity of radiologists for patients with cerebrovascular diseases was 60%, and the diagnostic confidence score was 2.5 (1, 2.5). After learning with the gold standard images, the diagnostic sensitivity rate was 85%, and the diagnostic confidence score was 4 (3.625, 4). The difference in diagnostic confidence scores before and after learning was statistically significant ($P < 0.05$), while the difference in diagnostic sensitivity rates was not statistically significant ($P = 0.077$). **Conclusion:** At present, the image quality of ULF-MRI and its diagnostic performance for cerebrovascular diseases still need to be improved, but the diagnostic performance of cerebrovascular diseases and doctors' diagnostic confidence can be significantly enhanced through comparative learning and

experience summarization.

Keywords

Magnetic Resonance Imaging (MRI), Ultra-Low Field Magnetic Resonance Imaging (ULF-MRI), High Field Magnetic Resonance Imaging (HF-MRI), Signal-to-Noise Ratio (SNR), Contrast-to-Noise Ratio (CNR), Cerebrovascular Diseases (CD)

Copyright © 2025 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

脑血管病(Cerebrovascular diseases, CD)包括出血性脑卒中(Cerebral hemorrhagic stroke, CHS)及缺血性脑卒(Cerebral ischemic stroke, CIS), 其发病率、致残率、复发率、死亡率均非常高[1]。一项基于全国的纵向调查研究显示, 2020 年国人的 CD 发病率是 505.2/10 万人, 死亡率是 135.182/10 万人, 且逐年增长[1][2]。磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)能快速、精准地对脑血管病进行定位、定量、定性诊断, 与 CHS 及 CIS 的临床决策及预后评价密切相关[3]。现有的 MRI 系统存在体积及重量大(数吨到数十吨不等)、需要屏蔽、极不便携、成本高昂等不足, 这与脑血管病需要快速确诊、精准分类、密切随诊、定期评价的诊疗方案相悖, 严重制约了其在颅脑疾病中的应用。然而, 超低场 MRI 因其轻量化、便携化、灵活性、优廉性等特点, 不仅适用于移动场景(救护车), 也能长时间工作于急诊抢救室、ICU 或普通病房内, 还可以用于经济条件有限的国家或地区[4]。为脑血管病的及时诊断及病情监测提供了新的技术手段[5]。

美国 Hyperfine 公司于 2020 年推出了针对颅脑的超低场磁共振成像系统, 并被应用于 CHS、CIS、脑创伤等颅脑疾病的诊断与监测, 在提高诊疗效率、减少并发症、避免医疗安全不良事件、限制传染性疾病传播等诸多方面显示出不可替代的优势[5]-[7]。2019 年 8 月本团队研制的超低场磁共振成像系统面世, 并不断优化[8][9], 该设备重量约为 350 kg, 实现了磁共振成像设备的轻量化和便携化。但是, 目前国内外的研究都存在以下问题有待解决: 一方面, 超低场磁共振图像质量能否在常规情景下满足临床需求; 另一方面, 上述研究多数未将超低场磁共振诊断结果与其他成像方式(CT 或高场强 MRI)进行比较, 并且均未广泛应用于临床, 因此, 超低场磁共振及其对脑血管疾病的诊断效能及临床价值尚待进一步探索。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

本研究纳入 2023 年 3 月至 2024 年 9 月在重庆大学附属中心医院(重庆市急救医疗中心)就诊的脑血管病患者, 按照纳入、排除标准筛选入脑血管疾病组, 并收集相同数量的正常志愿者。

正常志愿者的纳入标准为: 年龄大于 18 岁, 且无颅脑疾病的正常志愿者。脑血管病患者的纳入标准为: ① 年龄大于 18 岁; ② 同意进行 ULF-MRI 扫描; ③ 符合《中国缺血性脑卒中急性期诊疗指导规范 2017》或《中国脑出血诊治指南(2019)》的诊断标准; ④ CHS 患者经头颅 CT 平扫确诊为脑出血, CIS 患者经 HF-MRI 确诊为脑梗死。所有受试者具有统一的排除标准: ① MRI 检查禁忌证(如装有心脏起搏器、人工心脏瓣膜、金属人工耳蜗及存在眶内异物、人工角膜、严重幽闭恐惧症等), 或其他原因不能配合完成检查者; ② 颅脑发育异常; ③ 颅内占位性病变; ④ 严重颅脑创伤病史; ⑤ 各种原因导致序列不全

或图像质量不佳,而影响分析结果者;⑥ 基本资料不全者。最终纳入 20 名健康受试者及 20 名脑血管疾病患者(图 1)均接受 ULF-MRI 扫描,并于 24 小时内进行头颅 HF-MRI 或 CT 扫描(数据作为诊断金标准,并用于对比)。

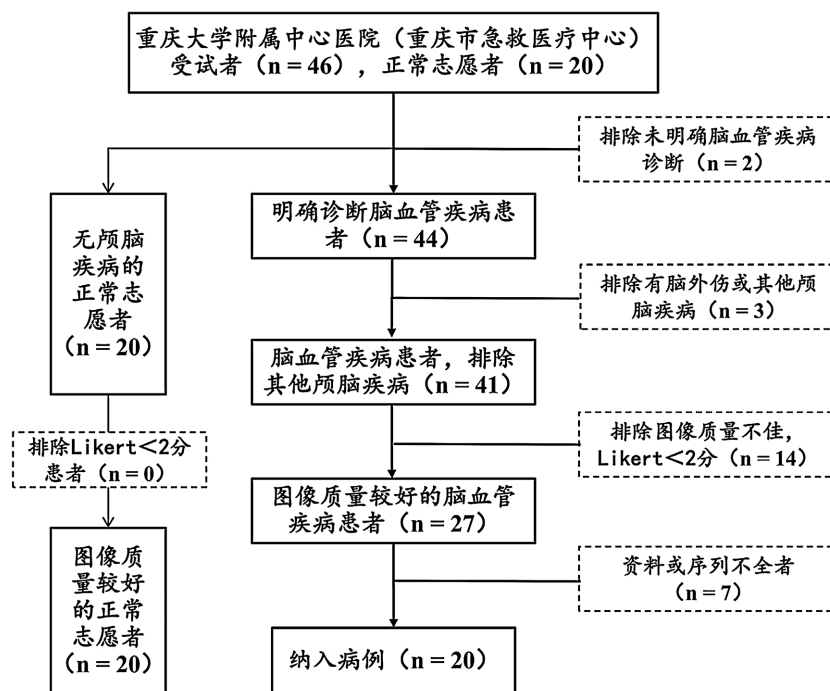


Figure 1. Flowchart of the screening process for the subjects

图 1. 受试者筛选流程图

2.2. 扫描方法

所有正常志愿者均进行头颅 HF-MRI 扫描及 ULF-MRI 横轴位扫描,两项检查时间间隔小于 24 小时。所有脑血管病患者均进行头颅 HF-MRI (脑梗死)或 CT 平扫(脑出血),并于 24 小时内进行头颅 ULF-MRI 横轴位扫描,随后分别以 HF-MRI 或 CT 平扫结果作为诊断金标准。

1) CT 扫描参数:

头颅 CT 平扫采用 256 排 512 层 GE 断层扫描系统 (New Revolution CT, GE Healthcare, Wisconsin, USA),探测器宽度 160 mm,旋转时间 1.0s,采集层厚 5.0 mm,层间距 5.0 mm,重建层厚 1.25 mm,层间距 1.25 mm;或采用联影 64 排 128 层断层扫描系统(uCT760, 上海联影医疗科技有限公司,上海,中国),探测器宽度 20 mm,旋转时间 1.0s,采集层厚 0.625 mm,层间距 0.625 mm;重建层厚 1.25 mm,层间距 1.25 mm。受试者均行头颅 CT 平扫横断面轴位扫描,扫描范围由下至上从枕骨大孔包全至头顶。

2) HF-MRI 数据采集使用 3.0 T 西门子 MR 扫描系统(MAGNETOM Prisma, Siemens Healthcare, Erlangen, Germany)扫描序列及参数如下:

T2WI 序列: TR = 4000 ms, TE = 95 ms, 层厚 5 mm, 层间距 1 mm, 共采集 25 层, 翻转角(Flip Angle, FA) = 150°, 平均次数(Number of Averages) = 2; 视野范围(Field of view, FOV) 256 mm × 256 mm, 矩阵 256 × 256。

T1WI 序列: TR = 250 ms, TE = 2.5 ms, FA = 70°, 层厚 5 mm, 层间距 1 mm, 共采集 25 层, 平均次数 = 1; FOV = 256 mm × 256 mm, 矩阵 256 × 256。

T2-FLAIR 序列: TR = 7500 ms, TE = 82 ms, 层厚 5 mm, 层间距 1 mm, 共采集 25 层, FA = 150°, 平均次数 = 1; FOV = 256 mm × 256 mm, 矩阵 256 × 256。

DWI 序列: TR = 3500 ms, TE = 85 ms, b = 1000 s/mm², 层厚 5 mm, 层间距 1 mm, 共采集 25 层, FOV = 256 mm × 256 mm, 矩阵 256 × 256。

3) ULF-MRI 数据采集使用本团队自研的 54mTMR 扫描系统, 扫描序列及参数如下:

T2WI 采用 FSE-T2 序列: TR = 3200 ms, TE = 140 ms, FOV = 256 mm × 256 mm, 频率/相位编码: 176 × 128; 层厚/间隔 5 mm/1 mm, 共采集 25 层。

T1WI 采用 T1-FLASH 序列: TR = 80 ms, TE = 20 ms, FOV = 256 mm × 256 mm, 频率/相位编码: 176 × 128; 层厚/间隔 5 mm/1 mm, 共采集 25 层。

2.3. 评价指标与方法

1) 图像质量评价

图像质量评价包括图像质量的客观评价和主观评价: 由 2 名具有 5 年以上工作经验的影像医师(医师 A、医师 B)采用盲法对所有 MR 图像所示感兴趣区图像质量进行评价, 若两名评估者间出现评价结果不一致, 则由第三名具有 20 年诊断经验的影像医师进行决断, 并对医师 A、医师 B 的图像质量评价参数分别进行可重复性分析, 探讨影像医生间评价结果的一致性。

图像质量的客观评价包括信噪比(SNR)及比度噪声比(CNR), 参考《医用磁共振成像(MRI)设备影像质量检测与评价规范》(WS/T 263-2006)结合《磁共振成像(MRI)质量控制手册》。基于所有受试者图像的信噪比(SNR): 选择相应的层面, 在感兴趣区(脑灰质、脑白质、脑脊液、脑血管疾病组的病变区), 测其信号均值为 S, 然后在图像的 FOV 内图像外背景区域的四个角选择较小区域(10%左右, 尽量避开伪影)测其信号的标准差, 最后取四个背景信号标准差的平均值为噪声标准差 SD, 根据公式 $SNR = S/SD$ 计算。基于所有受试者图像的对比度噪声比(CNR): 选择相应的层面, 在图像中选取感兴趣区(脑灰质、脑白质、脑脊液、脑血管疾病组的病变区)的两个区域并分别计算其信号均值, 将两者差的绝对值记为 C, 然后在图像的 FOV 内图像外背景区域的四个角选择较小区域(10%左右, 尽量避开伪影)测其信号的标准差, 最后取四个背景信号标准差的平均值为噪声标准差 SD, 根据公式 $CNR = C/SD$ 计算。

图像质量的主观评价采用 Likert5 分量表法分别对正常志愿者颅脑解剖结构成像效果和对脑血管疾病患者病灶的显示效果进行评价。对正常志愿者颅脑解剖结构成像效果评价, 主要针对正常解剖结构, 即感兴趣区(脑灰质、脑白质、脑脊液)进行评价: 1 分, 解剖结构显示不清, 图像质量差; 2 分, 解剖结构辨识困难, 边缘模糊不清, 图像质量较差; 3 分, 部分解剖结构欠清晰, 边缘比较模糊, 图像质量一般; 4 分, 解剖结构较清晰, 边缘容易辨别, 图像质量良好; 5 分, 解剖结构清晰, 边缘光滑清晰, 图像质量优。对脑血管疾病患者病灶的显示效果进行评价, 是对于有病变者针对病灶显示情况进行评价: 1 分, 病灶不可见, 无法诊断; 2 分, 病灶边界模糊但可见, 内外部征象显示少, 诊断受限; 3 分, 病灶可见, 内外部征象显示欠清, 基本满足诊断要求; 4 分, 病灶可见, 内外部征象基本显示, 不影响诊断; 5 分, 病灶清晰可见, 内外部征象显示清楚, 完全满足诊断要求。两名影像医师的诊断信心评分同样采用 Likert5 分量表标准: ① 毫无信心(1 分); ② 信心较低(2 分); ③ 信心中等(3 分); ④ 信心较高(4 分); ⑤ 非常确定(5 分) [10]。

2) 对脑血管疾病诊断效能及诊断信心的评价

选取图像质量主观评价高于 2 分的图像进行疾病诊断效能评价。以头颅 CT 平扫或 HF-MRI 诊断结果为金标准, 评估 ULF-MRI 对脑血管疾病的诊断效能, 同时评价两名影像医师仅通过 ULF-MR 图像确诊脑血管疾病的诊断信心。随后, 将每个患者的 ULF-MRI 图像与其头颅 CT 平扫或 HF-MRI 图像后进行

一一对照学习，并再次评价两名影像医师学习后基于 ULF-MRI 对脑血管疾病的诊断效能及诊断信心。

2.4. 统计学方法

所有统计分析均使用 SPSS 软件(版本 26.0, IBM SPSS Statistics, 美国纽约州阿蒙克市)完成。为评估本评价方法的可靠性,使用组内相关系数(ICC)来评价两位影像医生对图像质量(包括客观评价、主观评价)数据分析的一致性及可靠性(ICC 值解释标准如下: ICC > 0.75 一致性较好, 0.40~0.75 一致性一般, <0.40 为一致性较差)。

两组各序列的图像质量评价(SNR、CNR、Likert 评分)均为计量资料,当符合正态分布用均值±标准差表示,非正态分布用中位数(四分位数间距)表示。

数据资料符合正态分布且方差齐的参数采用配对样本 t 检验,数据资料不符合正态分布或方差不齐的参数采用 Mann-Whitney U 检验。P 值 <0.05 视为具有统计学意义。脑出血患者以头颅 CT 平扫为金标准,脑梗死患者以 HF-MRI 诊断结果为金标准,评价 ULF-MRI 对脑血管疾病的初始诊断效能;在对标金标准图像进行对照性学习之后,再次评价 ULF-MRI 对脑血管疾病的学习后诊断效能。

3. 结果

3.1. 临床资料

正常志愿组与脑血管疾病组年龄、性别组成:正常志愿组共 20 人(男性 6 名,女性 14 名),年龄中位数为 21 (Q1 = 21, Q3 = 28.5)。脑血管疾病组共 20 人(男性 8 名,女性 12 名),年龄为 66.15 ± 9.86 岁。

3.2. 图像质量分析的一致性检验结果

为评价两位影像医生测量的一致性,针对所有原始测量值进行 ICC 分析,超低场磁共振 T1WI、T2WI 图像的原始测量值组间 ICC 系数分别为 0.996、0.986; 3.0T 磁共振 T1WI、T2WI 图像的原始测量值组间 ICC 系数分别为 0.998、0.977;一致性良好。将两位影像医生对所有图像质量评价的结果取平均值(表 1)。

Table 1. Inter-rater consistency of ULF-MRI and HF-MRI measurements in the healthy group by two radiologists
表 1. 两位影像医生对健康组 ULF-MRI 及 HF-MRI 测量值的组间一致性

ICCs	序列	ULF-MRI	HF-MRI
组间 ICC 系数(95% CI)	T1WI	0.996 (0.995~0.996)	0.998 (0.998~0.999)
	T2WI	0.986 (0.984~0.989)	0.977 (0.973~0.981)

3.3. 正常志愿者组结果

正常志愿者 ULF-MRI 各序列(T1WI, T2WI, T2-FLAIR)的图像质量(SNR、CNR、Likert 评分)均低于 HF-MRI,且两种方法之间各序列图像的 Likert 评分差异均有统计学意义(P < 0.05)。同一正常志愿者 ULF-MRI 与 HF-MRI 两种方法之间 T1WI 及 T2WI 图像的灰质 SNR、白质 SNR、脑室 SNR 及三种组织的两两间 CNR 差异有统计学意义(P < 0.05)。基于 T2-FLAIR 图像比较,两种方法之间的灰质 SNR、白质 SNR 差异有统计学意义(P < 0.05),脑室 SNR 差异无统计学意义(P = 0.705);两种方法之间灰质/脑脊液 CNR 及白质/脑脊液 CNR 差异有统计学意义(P < 0.05),灰质/白质的 CNR 差异无统计学意义(P = 0.088)(表 2)。

3.4. 脑血管疾病组结果

在脑血管疾病组中,相较于 HF-MRI 或 CT, ULF-MRI 各序列(T1WI, T2WI)的图像质量(SNR、CNR、Likert 评分)均较低,且差异有统计学意义(P < 0.05)(表 3)。

Table 2. Differences in image quality parameters between ULF-MRI and HF-MRI in the normal volunteer group
表 2. 正常志愿组 ULF-MRI 与 HF-MRI 图像质量参数值差异

	序列	设备	平均值	中位数	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
Likert 评分	T1WI	ULF-MRI		4 (4, 4)	0	-8.888	0*
		HF-MRI		5 (5, 5)			
	T2WI	ULF-MRI		4 (4, 4)	0	-8.888	0*
		HF-MRI		5 (5, 5)			
	FLAIR	ULF-MRI	3.43 (0.18)		0	-8.618	0*
		HF-MRI		5 (5, 5)			
灰质 SNR	T1WI	ULF-MRI		134.66 (101.57, 196.34)	76	-3.354	0.001*
		HF-MRI	233.59 (20.56)				
	T2WI	ULF-MRI		62.73 (30.94, 95.25)	14	-5.031	0*
		HF-MRI	208.94 (18.55)				
	FLAIR	ULF-MRI		95.60 (56.32, 137.78)	90	-2.976	0.003*
		HF-MRI		126.75 (115.49, 296.65)			
白质 SNR	T1WI	ULF-MRI		125.12 (96.40, 189.58)	65	-3.652	0*
		HF-MRI	258.04 (23.55)				
	T2WI	ULF-MRI		52.34 (28.31, 89.50)	23	-4.788	0*
		HF-MRI	180.23 (13.59)				
	FLAIR	ULF-MRI		86.69 (54.13, 139.06)	85	-3.111	0.002*
		HF-MRI		112.89 (103.27, 382.36)			
脑室 SNR	T1WI	ULF-MRI		71.92 (42.36, 93.23)	21	-4.842	0*
		HF-MRI	258.04 (23.55)				
	T2WI	ULF-MRI		152.82 (70.82, 210.27)	3	-5.329	0*
		HF-MRI		715.30 (637.89, 764.91)			
	FLAIR	ULF-MRI		52.52 (27.6, 86.05)	186	-0.379	0.705
		HF-MRI	56.22 (34.40)				
灰/白质 CNR	T1WI	ULF-MRI		15.66 (10.01, 27.94)	103	-2.624	0.09*
		HF-MRI	26.37 (5.04)				
	T2WI	ULF-MRI	8.06 (4.69)		15	-5.004	0*
		HF-MRI	29.69 (11.05)				
	FLAIR	ULF-MRI		14.03 (9.08, 22.98)	137	-1.704	0.088
		HF-MRI		18.42 (12.31, 94.36)			
灰质/脑脊液 CNR	T1WI	ULF-MRI		65.33 (49.69, 107.20)	91	-2.948	0.03*
		HF-MRI	110.25 (20.83)				
	T2WI	ULF-MRI		88.36 (42.98, 118.62)	1	-5.383	0*
		HF-MRI	489.95 (85.08)				

续表

白质/脑脊液 CNR	FLAIR	ULF-MRI	40.13 (28.20, 90.90)	79	-3.273	0.001*
		HF-MRI	101.40 (68.25, 263.87)			
	T1WI	ULF-MRI	58.66 (43.56, 85.49)	33	-4.517	0*
		HF-MRI	134.69 (23.11)			
	T2WI	ULF-MRI	100.49 (46.65, 125.59)	1	-5.383	0*
		HF-MRI	518.97 (88.91)			
	FLAIR	ULF-MRI	40.75 (16.97, 73.01)	78	-3.3	0.001*
		HF-MRI	89.74 (59.76, 344.88)			

Table 3. Difference of image quality parameters between ULF-MRI and HF-MRI in cerebrovascular disease group
表 3. 脑血管疾病组 ULF-MRI 与 HF-MRI 图像质量参数值差异

	序列	设备	平均值	中位数	U	Z	P
SNR	T1WI	ULF-MRI		5.12 (4.26, 6.05)	0	-5.41	0
		HF-MRI	428.72 (48.23)				
	T2WI	ULF-MRI		3.80 (3.21, 4.88)	0	-5.411	0
		HF-MRI	314.40 (47.24)				
CNR	T1WI	ULF-MRI	2.21 (0.79)		0	-5.41	0
		HF-MRI	49.76 (13.20)				
	T2WI	ULF-MRI	1.85 (0.76)		0	-5.41	0
		HF-MRI	36.26 (9.67)				

脑出血患者以头颅 CT 平扫为金标准，脑梗死患者以 HF-MRI 诊断结果为金标准，对 ULF-MRI 的诊断效能进行分析，评估超低场磁共振对脑血管疾病的诊断效能。基于 ULF-MRI 对 20 例脑血管疾病患者进行影像诊断，影像医师初次诊断准确病例数为 12 (敏感度为 60%)，诊断信心评分为 2.5 (1, 2.5)；在对金标准图像进行一一对照学习后，基于 ULF-MRI 的诊断准确病例数上升至 17 例(敏感度为 85%)，诊断信心评分为 4 (3.625, 4)，学习前后诊断信心评分差异有统计学意义($P < 0.05$)，诊断敏感度差异无统计学意义($P = 0.077$) (表 4)。

Table 4. Difference of diagnostic sensitivity and diagnostic confidence based on ULF-MRI before and after learning
表 4. 学习前、后基于 ULF-MRI 的诊断敏感度及诊断信心差异

	样本量(n)	诊断信心中位数	U	Z	P	准确量(n)	敏感度	P
学习前	20	2.5 (1, 2.5)	49.5	-4.172	0	12	60%	0.077
学习后	20	4 (3.625, 4)				17	85%	

4. 讨论

本研究基于头颅 ULF-MRI、HF-MRI 及头颅 CT 平扫，分别针对 20 名正常志愿者和 20 名脑血管疾病患者讨论了 ULF-MRI 的图像质量及其对脑血管疾病的诊断价值。两位影像医生对所有图像的主、客观评分(SNR、CNR、Likert 评分)一致性好，表明本研究设计的图像客观评价方法重复性良好，图像主观评

价标准稳定。

在两组受试者中 ULF-MRI 的图像质量均低于 HF-MRI, 包括 SNR、CNR、Likert 评分。首先, ULF-MRI 图像的 SNR、CNR 均低于 HF-MRI, 这与既往研究结果一致[11] [12], 这也与磁共振成像设备主磁场的场强越高, 图像信号越清晰, 且背景噪声越小, 故 SNR 越高、图像质量越好的理论一致[13] [14], 因此 ULF-MRI 的信号及信噪比远低于常规 MRI [4] [15]。本研究中高/低场磁共振扫描仪主磁场强度差异近 60 倍, 这是导致该结果的核心原因, 也是 ULF-MRI 技术的固有局限性[16] [17]和主要挑战。ULF-MRI 图像的 CNR 低于 HF-MRI 的原因较多[18], 首先 CNR 依赖于 SNR 的基础质量; 其次, ULF-MRI 的磁场均匀性相对较低, 再次, 由于 ULF-MRI 各序列的扫描时间比相同序列 HF-MRI 更长, 更易形成移动伪影, 进而导致 CNR 进一步下降, ULF-MRI 无磁屏蔽, 故环境干扰高于 HF-MRI, 以上因素均会降低图像的 CNR。然而, 在正常志愿组中, 高、低场磁共振 T2-FLAIR 图像的脑室 SNR 差异无统计学意义($P = 0.705$), 提示该序列的反转时间(Inversion Time, TI)选择适当, 能在超低场背景下准确地消除脑脊液的信号, 这是脑组织及病灶清晰显示的基础。灰质/白质的 CNR 差异无统计学意义($P = 0.088$), 这与 T2-FLAIR 序列的成像原理及技术特点密切相关: 对脑实质和蛛网膜下腔的结构显示及疾病诊断具有较高的敏感性和特异性[19], 能有效提高图像中细节的可分辨性。但总体仍符合 ULF-MRI 图像质量的客观评价指标低于 HF-MRI 的趋势。

除此之外, 在本研究中基于 ULF-MRI 的序列设计并未纳入扩散加权成像序列(Diffusion-Weighted Imaging, DWI), 这是一种检测活体组织内水分子布朗运动状态的技术, 对脑血管疾病, 特别是急性脑梗死状态下的细胞毒性水肿有极高的敏感性及特异性。这与 ULF-MRI 的信噪比低、对磁场不均匀性敏感、难以多次采集(扫描时间长, 运动伪影风险增加)等固有短板密切相关。虽然目前本团队已研发了基于平衡稳态自由进动(Steady State Free Precession, SSFP)序列的 DWI 成像, 但是仍存在图像质量欠佳及扫描时间较长的不足, 与临床广泛普及和使用还有一定的距离, 故暂未纳入本次初步研究的通用扫描序列之中。拟后期通过在原有 bSSFP 序列的基础上添加相散破坏梯度形成 Non-bSSFP 序列, 并采集其产生的 SSFP-ECHO 信号进行 DWI, 通过结合 ULF-MRI 的弛豫特性进行布洛赫仿真确定最优序列参数, 并结合重建算法有望进一步优化该序列的信噪比、缩短扫描时间。由于超低 B0 场的特性, 多项研究已揭示并强调了 ULF-MRI 技术的固有局限性及多个层面的众多技术难题, 虽然很多问题在不断解决中, 但目前采取合适的解决方案以提高图像质量, 并达到最终预期目标及临床应用仍是一个严峻的挑战[20] [21]。

脑血管疾病组 ULF-MRI 图像的 SNR、CNR、Likert 评分均低于正常志愿者, 这可能与患者配合较差(部分意识障碍或不自主运动)存在运动伪影, 背景噪声及扫描时间更不易控制, 无屏蔽及周围设备所致的外环境干扰等因素相关。由于其图像质量较低的缘故, 基于 ULF-MRI 对病灶及其与周围正常脑组织的分辨能力明显低于 HF-MRI, 差异有统计学意义, 但是在通过有经验的影像科医生在对金标准图像进行一一对照学习后, 诊断效率从 60%提升至 85%, 这与 Mazurek 等报道的结果基本一致[7], 在 Mazurek 等的这篇报告中得出 ULF-MRI 对脑出血的敏感性为 80.4%、特异性为 96.6%, 并且基于 ULF-MRI 对血肿体积的测量值与传统 MRI 测量的血肿体积测量值一致性高, $ICC = 0.978$ 。Yuen 等[22]在 ULF-MRI (64 mT)下获得 50 例确诊为缺血性卒中患者图像, 得出 ULF-MRI 与常规高场 MRI 之间的结果一致, 并发现 ULF-MRI 能检测到 45 例(90%)梗死患者的大脑皮层、皮层下和小脑结构, 同时小至 4 mm 的病灶可以被捕获, 并得出 ULF-MRI 卒中量与卒中严重程度和出院时的功能结局显著相关的重要临床结论。这些研究结果证实了 ULF-MRI 在诊断脑血管疾病方面具有巨大的潜力, 使用 ULF-MRI 不仅避免了与 CT 相关的辐射暴露[7], 并且有望获得对临床有用的卒中成像, 这为在资源有限的环境中使用奠定了基础[22]。对照金标准图像进行学习后, 参与本研究的影像医生不仅提高了诊断敏感度更显著提高了诊断信心, 学习前后诊断信心差异有统计学意义。这提示了研究者或临床工作者们, 在运用 ULF-MRI 进行脑血管疾病或其他神

经系统疾病的诊断时, 需要重视前期相关培训的重要性, 并且建议将这一“培训思路”融入到 ULF-MRI 临床化的必要路径中, 这是既往研究中未提及, 但不容忽视的控制因素。

本研究存在以下局限性: ① ULF-MRI 的图像质量仍较低, 并且尚未纳入 DWI 序列这一重要诊断工具, 拟进一步优化设备性能、改良射频线圈、提高磁场均匀性、调整成像参数[23]、平衡环境, 并结合人工智能处理方法以缩短扫描时间、提高图像质量[24][25]; ② ULF-MRI 对脑血管疾病的诊断效能仍较低: 部分图像受限于较低的 CNR, 存在病灶边界显示欠清或微小病灶显示欠佳, 以致对病变大小、范围的精确测量存在挑战, 需在提高图像质量的基础上进一步缩短扫描时间[26], 提高患者配合度以减少伪影; ③ 因为病例组全部为脑血管病患者, 故无法获得假阳性, 特异度、阳性预测值、阴性预测值等, 拟增加样本量加入其他疾病并予以鉴别。

总而言之, 超低场 MRI 因其轻量化、便携化、灵活性、优廉性等特点, 不仅适用于移动场景(救护车), 也能长时间工作于急诊抢救室、ICU、普通病房内或医疗资源相对缺乏的地区或国家[4][26]。虽然目前 ULF-MRI 无法产生与 HF-MRI 相当的高分辨影像图像, 但仍能提供令人信服的图像及诊断效能[27]。有经验的影像医生可以通过高、低场图像对比分析及学习提高诊断效能及诊断信心, 这为脑血管病及其他神经系统疾病的及时诊断及病情监测提供了新的技术, 有望成为常规 MRI 的临床可行补充, 将越来越多地在放射学研究以及临床实践领域发挥其重要价值。

基金项目

本研究得到了重庆市科技卫生联合医学科研项目(2023MSXM016)、重庆市自然科学基金项目(CSTB2024NSCQ-MSX0630)及急诊医学重庆市重点实验室人才创新发展联合基金项目(2024RCCX04)的资助。

声明

本研究已获重庆大学附属中心医院(重庆市第四人民医院、重庆市急救医疗中心)研究伦理委员会批准(批件号: 2024 年伦审第(4)号); 该病例报道已获得健康志愿者及病人的知情同意。所有作者都声明没有利益冲突。

参考文献

- [1] Tu, W.J., Wang, L.D., Yan, F., Peng, B., Hua, Y., Liu, M., *et al.* (2023) China Stroke Surveillance Report 2021. *Military Medical Research*, **10**, 33. <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00463-x>
- [2] 国家卫生健康委员会, 编. 中国卫生健康统计年鉴[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2022.
- [3] 国家卫生健康委脑卒中防治工程委员会. 中国脑卒中防治指导规范[M]. 北京: 人民卫生出版, 2021: 510.
- [4] Altaf, A., Baqai, M.W.S., Urooj, F., Alam, M.S., Aziz, H.F., Mubarak, F., *et al.* (2023) Utilization of an Ultra-Low-Field, Portable Magnetic Resonance Imaging for Brain Tumor Assessment in Lower Middle-Income Countries. *Surgical Neurology International*, **14**, Article No. 260. https://doi.org/10.25259/sni_123_2023
- [5] Turpin, J., Unadkat, P., Thomas, J., Kleiner, N., Khazanehdari, S., Wanchoo, S., *et al.* (2020) Portable Magnetic Resonance Imaging for ICU Patients. *Critical Care Explorations*, **2**, e0306. <https://doi.org/10.1097/cce.0000000000000306>
- [6] Sheth, K.N., Mazurek, M.H., Yuen, M.M., *et al.* (2020) Assessment of Brain Injury Using Portable, Low-Field Magnetic Resonance Imaging at the Bedside of Critically Ill Patients. *JAMA Neurology*, **78**, 41-47.
- [7] Mazurek, M.H., Cahn, B.A., Yuen, M.M., *et al.* (2021) Portable, Bedside, Low-Field Magnetic Resonance Imaging for Evaluation of Intracerebral Hemorrhage. *Nature Communications*, **12**, Article No. 5119.
- [8] Shen, S., Wu, J., Guo, P., Wang, H., Chen, F., Meng, F., *et al.* (2020) Electromagnet Design for Ultra-Low-Field MRI. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **63**, 267-278. <https://doi.org/10.3233/jae-190051>
- [9] Meng, F., Guo, Y., Wei, H. and Xu, Z. (2024) Development of a Helmet-Shape Dual-Channel RF Coil for Brain Imaging

- at 54 Mt Using Inverse Boundary Element Method. *Journal of Magnetic Resonance*, **360**, Article ID: 107636. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2024.107636>
- [10] 李秀涛. 基于人工智能检测技术在早期 CT 诊断肋骨骨折中的临床应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州医科大学, 2023.
 - [11] Parasuram, N.R., Crawford, A.L., Mazurek, M.H., Chavva, I.R., Beekman, R., Gilmore, E.J., *et al.* (2023) Future of Neurology & Technology: Neuroimaging Made Accessible Using Low-Field, Portable MRI. *Neurology*, **100**, 1067-1071. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000207074>
 - [12] Samardzija, A., Selvaganesan, K., Zhang, H.Z., Sun, H., Sun, C., Ha, Y., *et al.* (2024) Low-Field, Low-Cost, Point-of-Care Magnetic Resonance Imaging. *Annual Review of Biomedical Engineering*, **26**, 67-91. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-110122-022903>
 - [13] Marques, J.P., Simonis, F.F.J. and Webb, A.G. (2019) Low-Field MRI: An MR Physics Perspective. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **49**, 1528-1542. <https://doi.org/10.1002/jmri.26637>
 - [14] Arnold, T.C., Tu, D., Okar, S.V., Nair, G., By, S., Kawatra, K.D., *et al.* (2022) Sensitivity of Portable Low-Field Magnetic Resonance Imaging for Multiple Sclerosis Lesions. *NeuroImage: Clinical*, **35**, Article ID: 103101. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103101>
 - [15] Sien, M.E., Robinson, A.L., Hu, H.H., Nitkin, C.R., Hall, A.S., Files, M.G., *et al.* (2022) Feasibility of and Experience Using a Portable MRI Scanner in the Neonatal Intensive Care Unit. *Archives of Disease in Childhood—Fetal and Neonatal Edition*, **108**, 45-50. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2022-324200>
 - [16] Altaf, A., Shakir, M., Irshad, H.A., Atif, S., Kumari, U., Islam, O., *et al.* (2024) Applications, Limitations and Advancements of Ultra-Low-Field Magnetic Resonance Imaging: A Scoping Review. *Surgical Neurology International*, **15**, Article No. 218. https://doi.org/10.25259/sni_162_2024
 - [17] Michael Gach, H., Curcuru, A.N., Wittland, E.J., Maraghechi, B., Cai, B., Mutic, S., *et al.* (2019) MRI Quality Control for Low-Field MR-IGRT Systems: Lessons Learned. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, **20**, 53-66. <https://doi.org/10.1002/acm2.12713>
 - [18] Guallart-Naval, T., Algarín, J.M., Pellicer-Guridi, R., Galve, F., Vives-Gilabert, Y., Bosch, R., *et al.* (2022) Portable Magnetic Resonance Imaging of Patients Indoors, Outdoors and at Home. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 13147. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17472-w>
 - [19] 常佩佩, 苗延巍, 蒋玉涵, 等. 磁共振液体衰减反转恢复血管高信号征的定义、原理及临床应用[J]. 磁共振成像, 2020, 11(9): 837-840.
 - [20] Ayde, R., Vornehm, M., Zhao, Y., Knoll, F., Wu, E.X. and Sarraçanie, M. (2024) MRI at Low Field: A Review of Software Solutions for Improving SNR. *NMR in Biomedicine*, **38**, e5268. <https://doi.org/10.1002/nbm.5268>
 - [21] Poojar, P., Oiyee, I.E., Aggarwal, K., Jimeno, M.M., Vaughan, J.T. and Geethanath, S. (2024) Repeatability of Image Quality in Very Low-Field MRI. *NMR in Biomedicine*, **37**, e5198. <https://doi.org/10.1002/nbm.5198>
 - [22] Yuen, M.M., Prabhat, A.M., Mazurek, M.H., Chavva, I.R., Crawford, A., Cahn, B.A., *et al.* (2022) Portable, Low-Field Magnetic Resonance Imaging Enables Highly Accessible and Dynamic Bedside Evaluation of Ischemic Stroke. *Science Advances*, **8**, eabm3952. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm3952>
 - [23] Deoni, S.C.L., O'Muircheartaigh, J., Ljungberg, E., Huentelman, M. and Williams, S.C.R. (2022) Simultaneous High-resolution T₂-Weighted Imaging and Quantitative T₂ Mapping at Low Magnetic Field Strengths Using a Multiple TE and Multi-Orientation Acquisition Approach. *Magnetic Resonance in Medicine*, **88**, 1273-1281. <https://doi.org/10.1002/mrm.29273>
 - [24] Manso Jimeno, M., Ravi, K.S., Jin, Z., Oyekunle, D., Ogbole, G. and Geethanath, S. (2022) Artifactid: Identifying Artifacts in Low-Field MRI of the Brain Using Deep Learning. *Magnetic Resonance Imaging*, **89**, 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2022.02.002>
Manso Jimeno, M., Ravi, K.S., Jin, Z., Oyekunle, D., Ogbole, G. and Geethanath, S. (2023) Corrigendum to Artifactid: Identifying Artifacts in Low-Field MRI of the Brain Using Deep Learning Magnetic Resonance Imaging Volume 89, June 2022, Pages 42-48. *Magnetic Resonance Imaging*, **95**, 118. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2022.03.006>
 - [25] Jeon, Y.H., Park, C., Lee, K.H., Choi, K.S., Lee, J.Y., Hwang, I., *et al.* (2025) Accelerated Intracranial Time-of-Flight MR Angiography with Image-Based Deep Learning Image Enhancement Reduces Scan Times and Improves Image Quality at 3-T and 1.5-T. *Neuroradiology*, **67**, 1203-1213. <https://doi.org/10.1007/s00234-025-03564-7>
 - [26] Hennig, J. (2023) An Evolution of Low-Field Strength MRI. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, **36**, 335-346. <https://doi.org/10.1007/s10334-023-01104-z>
 - [27] Bassar, P. (2022) Detection of Stroke by Portable, Low-Field MRI: A Milestone in Medical Imaging. *Science Advances*, **8**, eabp9307. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abp9307>