



安徽医科大学学报

Acta Universitatis Medicinalis Anhui

ISSN 1000-1492, CN 34-1065/R

《安徽医科大学学报》网络首发论文

题目：深度学习重建技术用于提升肝脏 MRI 中 HASTE 与 DWI 序列成像效能及质量的应用价值

作者：冯路路，潘志立，赵英明

收稿日期：2026-03-17

网络首发日期：2026-04-13

引用格式：冯路路，潘志立，赵英明. 深度学习重建技术用于提升肝脏 MRI 中 HASTE 与 DWI 序列成像效能及质量的应用价值[J/OL]. 安徽医科大学学报. <https://link.cnki.net/urlid/34.1065.r.20260411.1714.006>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

深度学习重建技术用于提升肝脏 MRI 中 HASTE 与 DWI 序列成像效能及质量的应用价值

冯路路, 潘志立, 赵英明

[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 230001]

摘要 目的 比较深度学习重建(DLR)的单次激发半傅里叶快速自旋回波(HASTE_{DLR})和扩散加权成像(DWI_{DLR})序列与传统刀锋伪影校正技术(BLADE)及 DWI_{常规}序列在肝脏磁共振成像(MRI)中的价值。**方法** 70 例患者接受 MRI 检查, 两名观察者独立评估各序列图像质量(肝缘、血管、病灶清晰度等), 并测量病灶信噪比(SNR)和病灶对比噪声比(CNR)以及表观扩散系数(ADC)值, 采用组内相关系数(ICC)评估观察者一致性。**结果** 观察者一致性较高(ICC:0.84~0.97)。HASTE_{DLR}和 DWI_{DLR}序列扫描时间分别减少 92.63% 和 50%。HASTE_{DLR}组病灶清晰度评分显著优于 BLADE 组 ($P<0.001$), 两组 DLR 序列伪影均减少 ($P<0.05$)。HASTE_{DLR}组 SNR、CNR 及 DWI_{DLR}组 SNR、ADC 值均更高 ($P<0.05$)。**结论** DLR 技术可提升肝脏 MRI 扫描效率, 改善图像质量并减少伪影, 具有良好的应用前景。

关键词 深度学习重建; 信噪比; 对比噪声比; 图像质量; 磁共振成像

中图分类号 R 445.2

文献标志码 A 文章编号 V220

Application value of deep learning reconstruction technology in enhancing the imaging efficiency and quality of HASTE and DWI sequences for liver MRI

Feng Lulu, Pan Zhili, Zhao Yingming

[Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of USTC (Anhui Provincial Hospital), Hefei 230001]

Abstract Objective To explore the value of deep learning reconstruction (DLR) in liver magnetic resonance imaging (MRI) by comparing the single-shot half-fourier rapid spin-echo sequence with DLR (HASTE_{DLR}) and diffusion-weighted imaging sequence with DLR (DWI_{DLR}) against the conventional BLADE and conventional DWI sequences. **Methods** 70 patients underwent MRI examinations. Two observers independently evaluated the image quality of each sequence (including liver edge, blood vessels, lesion clarity, etc.). Additionally, quantitative

2026-03-17 接收

基金项目: 安徽省高等学校省级质量工程项目(编号: 2022jyxm1840)

作者简介: 冯路路, 女, 影像技师;

赵英明, 男, 副主任技师, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: wisezhao158@ustc.edu.cn

evaluation was conducted by measuring the signal to noise ratio (SNR) of liver parenchyma and lesions, contrast to noise ratio (CNR) of lesions, as well as apparent diffusion coefficient (ADC) values from conventional DWI and DWI_{DLR}. Intraclass correlation coefficient (ICC) was used to evaluate the consistency between the two observers. **Results** The inter-observer consistency was high (ICC: 0.84~0.97). The scanning time was reduced by 92.63% for HASTE_{DLR} and 50% for DWI_{DLR} sequences, respectively. The lesion clarity score of the HASTE_{DLR} group was significantly better than that of the BLADE group ($P < 0.001$), with artifacts reduced in both DLR sequences ($P < 0.05$). The HASTE_{DLR} group demonstrated higher SNR and CNR, while the DWI_{DLR} group showed higher SNR and ADC values (all $P < 0.05$). **Conclusion** The DLR technology can enhance the efficiency of liver MRI scans, improve image quality, and reduce artifacts, demonstrating promising application prospects.

Key words deep learning reconstruction; signal to noise ratio; contrast to noise ratio; image quality; magnetic resonance imaging

Fund program Provincial Quality Engineering Project of Colleges and Universities in Anhui Province (No. 2022jyxm1840)

Corresponding author Zhao Yingming, E-mail: wisezhao158@ustc.edu.cn

T2 加权成像和扩散加权成像 (diffusion-weighted imaging, DWI) 是肝脏局灶性病变检测的关键磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术。单次激发半傅里叶快速自旋回波 (half fourier acquisition single shot turbo spin echo, HASTE) 序列通过单次激发和短回波间隔较传统快速自旋回波 (fast spin echo, FSE) 序列显著缩短扫描时间并减少运动伪影, 但其长回波链和部分傅里叶采样可能导致 T2 对比度失真、信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 及空间分辨率下降。此外, 基于平面回波成像 (echo planar imaging, EPI) 的 DWI 序列易受磁敏感伪影影响。而常用的加速采集技术如并行成像 (parallel imaging, PI) 会伴随 SNR 下降^[1]。近年来, 深度学习重建 (deep learning reconstruction, DLR) 技术基于卷积神经网络或变分网络整合 k 空间数据一致性约束与图像正则化, 在缩短扫描时间的同时能够从欠采样数据中重建高 SNR 图像^[2]。这为解决平衡成像效率与质量这一问题提供了新思路。目前, 针对肝脏这类运动敏感器官的 DLR 应用仍处于探索阶段。该研究通过定性与定量分析, 对比基于 DLR 的 HASTE 和 DWI 序列与传统 T2 加权刀锋伪影校正技术 (BLADE) 及 DWI 在肝脏 MRI 中的表现。

1 资料与方法

1.1 病例资料

收集 2024 年 11 月—2025 年 4 月于我院接受肝脏 MRI 平扫+增强检查的成年患者。排除标准：① 患者存在 MRI 对比剂禁忌证；② 临床数据或 MRI 数据采集不完整。最终纳入 70 例患者，年龄 41~69 (54.66±13.95) 岁，男性 52 例，女性 18 例，其中其中肝细胞癌 40 例、肝内胆管细胞癌 5 例、肝硬化结节 7 例、肝血管瘤 3 例、肝脏转移瘤 7 例、肝脏局灶性结节增生 8 例。研究已通过医院伦理委员会批准（伦理编号：2025-RE-267），所有参与者均提供了书面知情同意。

1.2 MRI 检查方法

所有患者均在同一台 MRI 扫描仪（MAGNETOM Vida, 3.0T, 德国西门子医疗系统有限公司），患者取仰卧位、头先进，采用 18 通道体部线圈接受上腹部 MRI 扫描。检查前患者需禁食、禁水 4 h。扫描序列包括轴位 T1WI、T2WI、HASTE_{DLR}、BLADE、DWI_{常规}、DLR 和三期动态增强。HASTE_{DLR}、BLADE 及 DWI_{常规}、DLR 序列采集参数详见表 1。HASTE_{DLR} 和 DWI_{DLR} 序列扫描时间较 BLADE 和 DWI_{常规} 序列减少 92.63% 和 50.00%。DWI 序列均在自由呼吸状态下采集完成，b 值分别为 50、800 s/mm²。DWI_{常规} b 值采集平均次数分别为 2、6；DWI_{DLR} b 值采集平均次数分别为 1、3。DWI_{常规}、DLR 均采用相同的后处理方法计算获得表观扩散系数图（apparent diffusion coefficient, ADC）。

表 1 HASTE_{DLR}、BLADE 和 DWI_{DLR}、_{常规} 扫描参数

Tab.1 Scanning parameters of HASTE_{DLR}, BLADE, and DWI_{DLR}, convention

Scanning parameters	HASTE _{DLR}	BLADE	DWI _{DLR}	DWI _{conventional}
Respiration mode	Single breath-hold	Free breathing	Free breathing	Free breathing
Scanning time (min)	00:21	04:45	01:18	02:36
TR (ms)	600	1 800	7 100	7 700
TE (ms)	74	100	45	47
Matrix	384×250	384×250	120×120	152×152
Field of view (mm ²)	360×225	380×380	360×288	380×305
Slice thickness (mm)	3	3	3	3
Fat suppression technique	SPAIR	SPAIR	SPAIR	SPAIR
Parallel acceleration factor	2	2	3	3

1.3 深度学习重建

HASTE_{DLR} 和 DWI_{DLR} 序列图像重建分别采用变分网络和展开式迭代网络架构^[3]。在图像重建过程中，k 空间数据、偏置场校正结果和线圈灵敏度图会被输入网络。HASTE_{DLR} 变分网络在前 22 次迭代中不施加正则化，专注于并行成像重建；在后续 12 次迭代中引入基于残差密集 U-Net 网络的正则化。DWI_{DLR} 展开式迭代网络在前 6 次迭代中不施加正则化；在随后的 11 次迭代中引入基于卷积神经网络的正则化模块。

HASTE_{DLR} 和 DWI_{DLR} 重建网络模型分别基于约 1 万幅传统 HASTE 序列图像和约 50 万次 DWI 重复扫描数据进行训练。训练数据使用多台 1.5T/3TMRI（西门子 MAGNETOM 系列）采集，训练在 PyTorch 框架下使用配备 NVIDIA Tesla V100 GPU（32GB 显存）的集群完成，训练获得的模型权重参数转换为专有的推理框架，并集成至现有 MRI 扫描仪重建流程中使用。

1.4 图像质量定性评价

两名具有 5 年以上肝脏 MRI 诊断经验的腹部放射科医师独立阅评 HASTE_{DLR}、BLADE 以及 b=800 s/mm²DWI_{DLR}、常规序列。为避免回忆偏倚，所有患者的序列图像以随机顺序呈现给观察者阅评。两位观察者对成像参数、其他 MRI 序列检查结果以及患者临床信息均设盲。采用 5 分制评分法对各序列肝缘清晰度、肝内血管及胰腺轮廓清晰度、脂肪抑制均匀性、>5 mm 肝脏病灶显影清晰度（5 分：优秀；4 分：良好；3 分：一般；2 分：较差，影响诊断；1 分：无法诊断）和图像伪影（5 分：无伪影；4 分：轻度伪影，不影响诊断；3 分：中度伪影，不影响诊断；2 分：重度伪影，影响诊断；1 分：重度伪影，无法诊断）进行评分，以其中高年资医师评分结果为最终评分。两名观察者独立记录所有非肝囊肿局灶性病变数量，最终病灶总数由一名上级医师确定。zaos

1.5 图像质量定量评价

在避开伪影区、血管、胆管或局灶性病变前提下，在 HASTE_{DLR}、BLADE 和 b=800 s/mm² DWI_{常规、DLR} 序列左、右叶肝实质相同解剖位置放置直径 1cm 的圆形感兴趣区（region of interest, ROI），另在局灶性病灶最大径层面（排除肝囊肿病灶）绘制覆盖整个病灶 ROI。测量肝脏及病灶 SNR、病灶对比噪声比（contrast noise ratio,CNR）和 ADC_{常规、DLR} 值。由于各序列采用了 PI 加速成像，噪声并非均匀分布在整个图像上，通过组织信号与背景噪声比进行 SNR 测量并不准确。因此，在本研究中采用改良 SNR 和 CNR 计算公式^[4-5]：

$$SNR_{\text{肝脏}} = \frac{SI_{\text{肝脏}}}{SD_{\text{肝脏}}}, SNR_{\text{病灶}} = \frac{SI_{\text{病灶}}}{SD_{\text{病灶}}}, CNR_{\text{病灶}} = \frac{|SI_{\text{病灶}} - SI_{\text{肝脏}}|}{N_{\text{临肝}}}$$

肝脏、病灶（signal, SI）；肝脏和病灶 ROI 信号标准差 SD_{肝脏、病灶}（standard deviation, SD）；病

灶 ROI 临近正常局部肝实质信号标准差为噪声(noise, N), 获取方式为: 在病灶边缘外 5~10 mm 范围内选取无血管、胆管及伪影干扰的正常肝实质区域, 放置 3 个直径 0.5 cm 的圆形 ROI, 测量各 ROI 信号标准差后取平均值。最终各参数取值为两名观察者测量结果的平均值为。

1.6 统计学处理

使用 SPSS 21.0 软件进行统计学分析。通过组内相关系数 (intraclass correlation coefficient, ICC)评价观察者间定量和定性评分一致性, 并对 ICC 值进行显著性检验 (检验水准 $\alpha=0.05$)。一致性强度判断标准为: $ICC\leq 0.4$ 一致性较差, $0.4<ICC\leq 0.75$ 一致性良好, $0.75<ICC\leq 1$ 一致性高。通过 Shapiro-Wilk 检验评估变量的正态分布情况, 正态分布的变量以 $\bar{x}\pm s$ 表示, 非正态分布的变量以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示, 分别采用配对 t 检验或 Wilcoxon 秩和检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 观察者间一致性检验

依据术后病理结果、穿刺活检病理或多模态影像学确诊结果, 70 例患者共计 82 个局灶性病灶。恶性病灶共计 62 个: 肝细胞癌 42 个、肝转移瘤 13 个、肝内胆管细胞癌 7 个; 良性病灶共计 20 个: 肝血管瘤 5 个、肝硬化结节 7 个、肝局灶性结节增生 8 个。两位观察者独立对 70 例非肝囊肿患者病灶计数, 结果一致均为 82 个, 病灶检出率均为 100%。病灶最大层面直径 (26.58 ± 21.37) mm。HASTE_{D_{DLR}}、BLADE 和 DWI_{常规、DLR} ($b=800\text{ s/mm}^2$) 序列图像质量定性评估 ICC 为 0.92~0.97, SNR、CNR 和 ADC 测量结果 ICC 为 0.84~0.88 ($P<0.001$), 观察者间评分的一致性良好。

2.2 图像质量定性评价

HASTE_{D_{DLR}}、DWI_{D_{DLR}} 与 BLADE、DWI_{常规}组图像质量及伪影主观评分对比结果见表 2 及图 1A—1D。HASTE_{D_{DLR}} 组病灶清晰度评分显著高于 BLADE 组 ($P=0.048$)。HASTE_{D_{DLR}} 和 DWI_{D_{DLR}} 组图像伪影评分均得以改善 ($P<0.05$)。DWI_{D_{DLR}} 与 DWI_{常规}除伪影外图像质量评价指标均无显著差异。

表 2 图像质量定性评估 [分, $M(P_{25}, P_{75})$]

Tab.2 Qualitative evaluation of image quality [score, $M(P_{25}, P_{75})$]

Evaluation indicators	HASTE _{D_{DLR}}	BLADE	Z value	P value	DWI _{D_{DLR}} ^①	DWI _{convention}	Z value	P value

①

Liver Margin	3 (2, 4)	3 (2, 4)	-0.51	0.610	4 (3, 4)	4 (3, 4)	0.17	0.866
Clarity								
Intrahepatic	3 (2, 4)	3 (2, 4)	-0.33	0.741	4 (4, 5)	4 (4, 5)	0.08	0.891
Vessel Clarity								
Pancreas	4 (4, 5)	4 (4, 5)	-0.12	0.923	3 (2, 4)	3 (2, 4)	-0.25	0.803
Contour Clarity								
Fat Suppression	3 (2, 4)	3 (2, 4)	0.29	0.772	4 (4, 5)	4 (4, 5)	0.11	0.905
Uniformity								
Lesion Clarity	4 (4, 5)	4 (3, 4)	-1.98	0.048	3 (2, 4)	3 (2, 4)	0.37	0.713
Artifacts	3 (3, 4)	3 (2, 4)	-2.03	0.042	4 (4, 5)	4 (3, 4)	-2.01	0.044

注：① DWI refers to images with $b=800 \text{ s/mm}^2$.

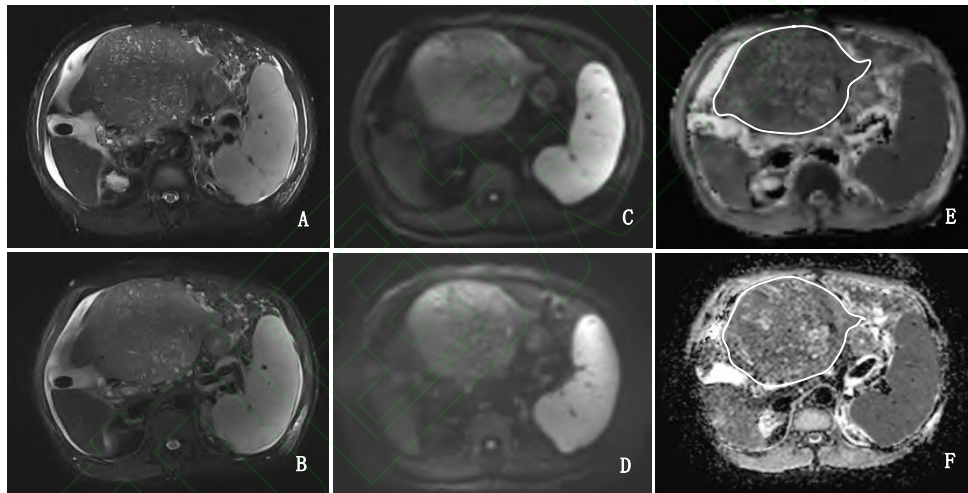


图 1 男性,56 岁,肝硬化伴肝左叶肝细胞性肝癌患者上腹部 DLR 序列和常规序列图像

Fig. 1 Upper abdominal images of a 56-year-old male patient with liver cirrhosis and hepatocellular carcinoma in the left lobe of the liver, obtained by DLR sequences and conventional sequences

A、B: HASTEDLR (A) 序列较 BLADE (B) 序列图像在肝缘、网膜、病灶边缘及病灶内 T2WI 高信号坏死区显示更清晰; C-F: 病灶在 $b=800 \text{ s/mm}^2$ DWIDL (C) 和 DWI 常规 (D) 序列图像均显示为稍高信号影, 病灶内 ROI (白圈) ADCDLR (E) 序列测得的 ADC 值为 $1021.46 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$, 高于 ADC 常规 (F) 序列测量值 $1006.18 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

注: A, B: The HASTEDLR (A) sequence displayed clearer visualization of the liver margin, omentum, lesion edge, and T2WI hyperintense necrotic areas within the lesion compared with the BLADE (B) sequence; C-F: The lesion showed a slightly hyperintense signal on both DWI_{DLR} (C)

and DWI_{convention} (D) sequences at b=800 s/mm²; The ADC value measured by ADC_{D_{DLR}} (E) sequence in the ROI (white circle) within the lesion was 1 021.46×10⁻⁶ mm²/s, which was higher than the value of 1 006.18×10⁻⁶ mm²/s measured by ADC_{convention} (F) sequence.

2.3 图像质量定量评价

HASTE_{D_{DLR}}、BLADE、DWI_{D_{DLR}}、常规组图像质量定量评价对比结果见表 3。HASTE_{D_{DLR}} 组肝实质和病灶 SNR 以及病灶 CNR 均高于 BLADE 组, 而 DWI_{D_{DLR}} 组肝右叶肝实质和病灶 SNR 高于 DWI 常规组 ($P<0.05$)。此外, DWI_{D_{DLR}} 组测得肝实质及病灶 ADC 值高于 DWI 常规组(表 4、图 1e—1f)。

表 3 图像定量性评估 ($\bar{x} \pm s$)

Tab.3 Quantitative evaluation of image quality ($\bar{x} \pm s$)

Evaluation indicators	HASTE _{D_{DLR}}	BLADE	<i>t</i> value	<i>P</i> value	DWI _{D_{DLR}} ^①	DWI _{conventionl} ^①	<i>t</i> value	<i>P</i> value
Left Hepatic Lobe SNR	13.83±2.48	12.25±4.35	2.601	0.010	13.28±1.47	12.73±2.45	1.545	0.124
Right Hepatic Lobe SNR	14.06±4.24	12.37±5.03	2.150	0.033	13.84±3.80	12.61±2.82	2.134	0.034
Lesion SNR	10.46±5.46	9.57±6.14	2.082	0.039	9.83±4.38	8.52±2.56	2.234	0.021
Lesion CNR	5.26±1.28	4.70±2.12	2.037	0.043	5.85±2.78	5.26±1.23	1.750	0.082

注: ① DWI refers to images with b=800 s/mm².

表 4 DWI_{D_{DLR}} 和 DWI 常规组测量 ADC 值 (10⁻⁶mm²/s)对比

Tab.4 Comparison of ADC values measured by DWI_{D_{DLR}} and DWI_{conventionl} (10⁻⁶ mm² /s)

Measurement location	DWI _{D_{DLR}} ^①	DWI 常规 ^①	<i>t</i> value	<i>P</i> value
Left Hepatic Lobe	1086.51±162.41	1007.83±115.92	5.085	<0.001
Right Hepatic Lobe	1128.62±146.57	995.16±204.35	8.243	<0.001
Lesion	974.54±224.36	837.94±188.51	7.892	<0.001

注: ① DWI refers to images with b=800 s/mm².

3 讨论

HASTE 和 DWI 序列是肝脏局灶性病变检测与定性的核心 MRI 技术，但在临床实践中，如何平衡图像质量与扫描耗时始终是一大挑战。传统单次激发 HASTE 序列常因回波链较长导致模糊效应与 SNR 下降，常规 DWI 序列易受磁敏感伪影及加速技术导致 SNR 受损的影响，而传统 BLADE 序列虽能改善 SNR 与运动伪影，但耗时较长^[6]。近年来，DLR 技术通过整合 k 空间数据约束与图像正则化，能够在缩短扫描时间的同时重建高 SNR 图像，为平衡成像效率与质量提供了新路径^[7-8]。

该研究证实了 DLR 技术能显著提升肝脏磁共振成像的整体效能与图像质量。针对 HASTE 序列的分析表明，引入 DLR 技术不仅将扫描时间缩短了 92.63%，同时有效改善了图像伪影并提升了 SNR 与 CNR。HASTE_{DLR} 在病灶清晰度上表现出显著优势，这印证了 DLR 对快速序列固有缺陷的补偿作用，与 Kubicka et al^[9]的研究结论相一致，后者指出 HASTEDLR 对胆管、胰管等小结构的显示更为清晰，且显著减少了采集时间。尽管 Herrmann et al^[10]曾得出 BLADE 序列 SNR 更高的结论，但这可能与扫描层厚的差异（其采用 5mm vs 该研究 3 mm）及模型训练数据量有关。在 3 mm 薄层扫描条件下，神经网络能够更高效地实现噪声抑制与信号增强^[9]。此外，Shanbhogue et al^[3]的研究亦证实，DLR 带来的信号强度变化实为脂肪抑制优化的合理结果，反而有助于增强肝-脂对比度与小病灶的检出灵敏度。Ginocchio et al^[11]在 3.0T 设备上的研究也支持了这一点，证实 HASTE_{DLR} 的肝缘、血管锐利度显著优于标准序列，且扫描时间缩短一半，这与该研究的发现高度吻合。

在 DWI 成像方面，DWI_{DLR} 序列在将扫描耗时减半的同时，提升了肝右叶的 SNR。这一表现与 Afat et al^[12]的研究高度契合：肝左叶易受心脏跳动干扰，DLR 加速扫描虽可能导致局部信号出现不均匀，但整体噪声依然更低。关于 ADC 值的测量，该研究观察到 DWI_{DLR} 测得的 ADC 值普遍高于常规 DWI，这可能与降噪处理及信号均匀性的提升有关；然而 Bae et al^[13]却得出相反结论，提示 ADC 值的变异性可能受到脂肪抑制技术、并行加速因子及呼吸模式等多重参数的共同影响^[14-16]。此外，DLR 重建固有的“平滑效应”也可能系统性高估 ADC 值。鉴于 ADC 值在疾病鉴别与疗效评估中的核心地位，后续亟需针对 DLR 对其变异性的影响机制展开专门研究。

本研究存在一定的局限性。首先，作为单中心研究，样本来源集中，可能存在选择偏倚导致结果外推性受限，且样本量相对较小，可能影响统计检验效能。其次，本研究纳入多种良恶性病灶，其生物学特性与信号特征差异可能干扰定量指标一致性，降低数据稳定性，进而可能引入潜在偏差，影响组间对比的可靠性。此外，部分良性病灶缺乏病理活检佐证，可

能导致定性偏差。最后，本研究未深入探讨 ADC 值差异的内在机制（如重建算法、扫描参数设置等对扩散信号的影响），后续需针对性研究阐明。

综上所述，DLR 技术在提升肝脏 MRI 扫描效率、改善图像质量和减少伪影方面具有广阔的临床前景。

参考文献

[1] 张海妮, 曾建威, 王冲, 等. 比较小视野多激发平面回波序列 DWI 与常规单激发平面回波序列 DWI 在直肠癌中的应用价值[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2024, 30(3): 338-42. doi:10.19627/j.cnki.cn31-1700/th.2024.03.008.

Zhang H N, Zeng J W, Wang C, et al. The comparison of the application value of reduced field of view image reconstruction using image-space sampling function and full field of view single-shot echo-planar imaging DWI in rectal cancer[J]. Chin Comput Med Imag, 2024, 30(3): 338-42. doi:10.19627/j.cnki.cn31-1700/th.2024.03.008.

[2] Wilpert C, Neubauer C, Rau A, et al. Accelerated diffusion-weighted imaging in 3 T breast MRI using a deep learning reconstruction algorithm with superresolution processing: a prospective comparative study[J]. Invest Radiol, 2023, 58(12): 842-52. doi:10.1097/RLI.0000000000000997.

[3] Shanbhogue K, Tong A, Smereka P, et al. Accelerated single-shot T2-weighted fat-suppressed (FS) MRI of the liver with deep learning-based image reconstruction: qualitative and quantitative comparison of image quality with conventional T2-weighted FS sequence[J]. Eur Radiol, 2021, 31(11): 8447-57. doi:10.1007/s00330-021-08008-3.

[4] Wary P, Hossu G, Ambarki K, et al. Deep learning HASTE sequence compared with T2-weighted BLADE sequence for liver MRI at 3 Tesla: a qualitative and quantitative prospective study[J]. Eur Radiol, 2023, 33(10): 6817-27. doi:10.1007/s00330-023-09693-y.

[5] Mulé S, Kharrat R, Zerbib P, et al. Fast T2-weighted liver MRI: image quality and solid focal lesions conspicuity using a deep learning accelerated single breath-hold HASTE fat-suppressed sequence[J]. Diagn Interv Imaging, 2022, 103(10): 479-85. doi:10.1016/j.diii.2022.05.001.

[6] Jhan S R, Wu Y Y, Chang P Y, et al. Comparison of ability of lesion detection of two MRI sequences of t2wi haste and t2wi blade for hepatocellular carcinoma[J]. Medicine, 2023, 102(6): e32890. doi:10.1097/MD.00000000000032890.

- [7] Hu Z, Chen Z, Cao T, et al. Generalizable, sequence-invariant deep learning image reconstruction for subspace-constrained quantitative MRI[J]. *Magn Reson Med*, 2025, 94(1): 89-104. doi:10.1002/mrm.30433.
- [8] Brendel J M, Jacoby J, Dehdab R, et al. Deep learning reconstruction for accelerated high-resolution upper abdominal MRI improves lesion detection without time penalty[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2025, 106(3): 85-92. doi:10.1016/j.diii.2024.09.008.
- [9] Kubicka F, Tan Q, Meyer T, et al. Deep-learning-based reconstruction of single-breath-hold 3 mm HASTE improves abdominal image quality and reduces acquisition time: a quantitative analysis[J]. *Curr Oncol*, 2025, 32(1): 30. doi:10.3390/currenol32010030.
- [10] Herrmann J, Gassenmaier S, Nickel D, et al. Diagnostic confidence and feasibility of a deep learning accelerated HASTE sequence of the abdomen in a single breath-hold[J]. *Invest Radiol*, 2021, 56(5): 313-9. doi:10.1097/RLI.0000000000000743.
- [11] Ginocchio L A, Smereka P N, Tong A, et al. Accelerated T2-weighted MRI of the liver at 3 T using a single-shot technique with deep learning-based image reconstruction: impact on the image quality and lesion detection[J]. *Abdom Radiol*, 2023, 48(1): 282-90. doi:10.1007/s00261-022-03687-y.
- [12] Afat S, Herrmann J, Almansour H, et al. Acquisition time reduction of diffusion-weighted liver imaging using deep learning image reconstruction[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2023, 104(4): 178-84. doi:10.1016/j.diii.2022.11.002.
- [13] Bae S H, Hwang J, Hong S S, et al. Clinical feasibility of accelerated diffusion weighted imaging of the abdomen with deep learning reconstruction: comparison with conventional diffusion weighted imaging[J]. *Eur J Radiol*, 2022, 154: 110428. doi:10.1016/j.ejrad.2022.110428.
- [14] 于会昌, 刘士远. 深度学习在磁共振图像超分辨率重建中的应用[J]. *中国医学物理学杂志*, 2024, 41(10): 1243-8. doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2024.10.008.
- Yu H C, Liu S Y. Application of deep learning in super-resolution reconstruction of magnetic resonance images[J]. *Chin J Med Phys*, 2024, 41(10): 1243-8. doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2024.10.008.
- [15] 程 勇, 张 钰, 刘紫渲, 等. 磁共振深度学习重建对三维肝脏加速容积采集序列图像质量和病变诊断效能的价值研究 [J]. *中国医学装备*, 2025, 22(2): 37-42. doi:10.3969/j.issn.1672-8270.2025.02.007.

Cheng Y, Zhang Y, Liu Z X, et al. Study on the value of deep learning reconstruction based magnetic resonance on the image quality and lesion diagnostic efficacy of 3D LAVA sequences[J]. *China Med Equip*, 2025, 22(2): 37-42. doi:10.3969/j.issn.1672-8270.2025.02.007.

[16] 张天语, 赵小英, 宋建, 等. 深度学习重建在主动脉 CTA 虚拟平扫中的研究[J]. *安徽医科大学学报*, 2025, 60(4): 735-40. doi:10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2025.04.022.

Zhang T Y, Zhao X Y, Song J, et al. A study of deep-learning image reconstruction algorithm in virtual un-enhanced scanning of aortic CTA[J]. *Acta Univ Med Anhui*, 2025, 60(4): 735-40. doi:10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2025.04.022.

