

# 光梭径向采集技术在屏气配合欠佳状态下肝脏动态增强扫描中的应用价值

邓和平, 张宇, 杨学刚, 卢予婕, 王丹, 董晓蕾, 何雅坤, 陈佳, 王闽

**【摘要】 目的:**探讨光梭径向采集(uCSR)技术在屏气配合欠佳患者进行肝脏动态增强扫描中的应用价值。**方法:**搜集 35 例无法配合屏气检查的患者作为研究对象,在自由呼吸状态下采用 uCSR 序列进行肝脏动态增强扫描,该序列扫描结束后立即进行 3D-VIBE 序列扫描。由两位高年资医师采用 5 分法分别对 uCSR 重建的各期相准确性、uCSR 序列延迟期与 3D-VIBE 序列延迟期总体图像质量及呼吸运动伪影抑制效果进行评分。由两位高年资技师对 uCSR 序列延迟期和 3D-VIBE 序列延迟期图像进行信噪比(SNR)及对比噪声比(CNR)值测量。**结果:**两位医师对 uCSR 重建的各期相准确性评分均高于 4.0 分(分别为  $4.86 \pm 0.355$ 、 $4.83 \pm 0.382$ ),表明 uCSR 序列能获得准确的肝脏动态增强扫描期相。对 3D-VIBE 序列和 uCSR 序列扫描的延迟期图像进行总体质量评分,结果显示 uCSR 图像明显优于 3D-VIBE ( $Z = -5.241, P = 0.000$ )。对 3D-VIBE 序列与 uCSR 序列延迟期图像的呼吸运动伪影抑制效果进行评分,结果显示 uCSR 图像更优 ( $Z = -5.279, P = 0.000$ )。对两组图像质量进行客观评价,结果显示 3D-VIBE 图像的 SNR 稍优于 uCSR ( $Z = -2.359, P = 0.018$ ),CNR 差异无统计学意义 ( $Z = -1.753, P = 0.08$ )。**结论:**对于屏气配合欠佳的患者进行肝脏动态增强扫描时,uCSR 序列可以获得良好的图像,具有一定临床应用价值。

**【关键词】** 肝; 磁共振成像; 动态增强; 信噪比; 对比噪声比; 压缩感知

**【中图分类号】** R575; R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)05-0631-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.05.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**Application of united compressed sensing with radial acquisition technology in liver dynamic contrast-enhanced scanning in patients with poor breath-holding** DENG He-ping, ZHANG Yu, YANG Xue-gang, et al. Department of Radiology, Sichuan cancer Hospital & institute, Chengdu 610000, China

**【Abstract】 Objective:** To investigate the value of United imaging Compressed Sensing with Radial acquisition (uCSR) technology in liver dynamic contrast-enhanced (DCE) scanning in patients with poor breath-holding ability. **Methods:** 35 patients who failed to cooperate with the breath-hold examination were included in this study. They received DCE scanning with uCSR sequence in free-breathing state, followed immediately with 3D-VIBE sequence scanning. Two senior physicians scored the phase accuracy of uCSR reconstruction, the overall quality of the delayed phase images of uCSR sequence and 3D-VIBE sequence, the suppressing effect of respiratory motion artifacts using the 5-point scales. Two senior technicians measured signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) of the delay phase images of uCSR sequence and 3D-VIBE sequence. **Results:** The mean scores of each phase accuracy for uCSR reconstruction rated by the two physicians are significantly higher than 4.0 ( $4.86 \pm 0.355$  and  $4.83 \pm 0.382$ , respectively), indicating that the uCSR sequence can produce accurate phases. According to scores for the overall quality of the delay phase images of uCSR sequence and 3D-VIBE sequence, uCSR images are significantly better than 3D-VIBE ( $Z = -5.241, P = 0.000$ ). According to comparison between the delayed phase images of uCSR sequence and 3D-VIBE sequence in the suppressing effect on respiratory motion artifacts, uCSR images are better ( $Z = -5.279, P = 0.000$ ).

作者单位:610000 成都,四川省肿瘤医院研究所影像诊断部(邓和平、张宇、卢予婕、王丹、杨学刚、董晓蕾、何雅坤、王闽); 201800 上海,上海联影医疗科技股份有限公司磁共振临床培训部(陈佳)

作者简介:邓和平(1984-),男,四川人,学士,主管技师,主要从事磁共振技术工作。

通讯作者:王闽, E-mail:409743491@qq.com

基金项目:北京医学奖励基金会课题(YXJL-2020-0972-0424)

For objective evaluation of image quality, 3D-VIBE had slightly higher SNR than uCSR group ( $Z = -2.359, P = 0.018$ ), while CNR showed no significant difference ( $Z = -1.753, P = 0.08$ ). **Conclusion:** uCSR sequence can obtain excellent liver DCE images for patients with poor breath-holding and has potential in clinical application.

**【Key words】** Liver; Magnetic resonance imaging; Dynamic contrast-enhanced; Signal-to-noise ratio; Contrast-noise ratio; Compressed sensing

磁共振动态增强扫描由于其无辐射、对比剂用量少、软组织分辨率高等原因,目前已成为肝脏疾病影像检查中的一项重要技术。增强扫描的  $T_1$  WI 序列常规采用的是三维容积内插值法屏气检查(3D volume interpolated breath-hold examination, 3D-VIBE)序列<sup>[1]</sup>,该序列对运动敏感,因此在进行肝脏检查时需要受检者很好的配合屏气,保证扫描过程中肝脏处于静止状态,常规的屏气时间为 15~20 s,次数 4~7 次,对于配合较好的受检者能够获得满意的影像图片,而对于一些耐受较差或无法配合屏气检查的受检者则无法进行检查<sup>[2]</sup>,如年老体弱、婴幼儿、昏迷或听力较差的受检者。目前采用较多的自由呼吸状态下肝脏动态增强扫描技术包括额外维度的黄金角径向稀疏并行采样技术(extra-dimensional golden-angle radial sparse parallel, XD-GRASP)及新型笛卡尔采样、额外维度 VIBE(eXtra-dimensional VIBE, XD-VIBE)技术<sup>[3]</sup>,本研究采用光梭径向采集(united imaging compressed sensing with radial acquisition, uCSR)技术进行自由呼吸状态下的肝脏动态增强扫描,较前两种技术,该序列在采用了压缩感知(compressed sensing, CS)及放射状 K 空间填充方式的容积内插体部检查(Radial VIBE)技术的基础上增加了动脉信号监测及呼吸信号自动提取技术。本文通过与常规屏气检查的 3D-VIBE 序列进行图像质量比较,旨在探讨该技术在屏气配合欠佳受检者进行肝脏动态增强扫描中的应用价值。

## 材料与方法

### 1. 病例资料

搜集 2021 年 3 月至 7 月无法很好配合屏气且需进行肝脏 MRI 扫描的受检者作为研究对象。病例纳入标准:检查前经过专人进行屏气训练后且无法配合屏气;无 MR 检查禁忌症;肝脏区域无金属植入物;无磁共振对比剂过敏史;无肾功能异常。本研究最终共纳入 35 例患者,其中男 20 例,女 15 例,年龄 26~74 岁,平均(56.5±11.9)岁。本研究经医院医学伦理委员会审核批准(编号:SCCHEC-02-2021-009),所有受检者均签署知情同意书。

### 2. 检查方法

所有受检者均采用磁共振 3.0T 全身扫描仪(UMR 780; United imaging, Shanghai, China)进行 MRI 检查,选用 18 通道体部相控阵线圈和 32 通道脊柱线圈,受检体位采用头进面朝上。受检者检查前禁食禁水 6 h,于肘静脉安置 22G 型号留置针。所有受检者均采用统一的扫描序列包进行扫描,平扫序列包括  $T_2$  WI 冠状面、 $T_2$  WI 横轴面、 $T_1$  WI 的 3D-VIBE 横轴面,增强序列包括 uCSR 序列及  $T_1$  WI 的 3D-VIBE 横轴面,自由呼吸状态下进行 uCSR 序列扫描,完成后立即进行屏气状态下 3D-VIBE 序列扫描。uCSR 序列主要扫描参数:视野 400 mm×400 mm, TR 3.08 ms, TE 1.4 ms,层厚 5 mm,层间距 0 mm,过采样 0%,矩阵 256×256,相位编码 A>P,翻转角 10°,平均次数 1,节数 1,压缩感知加速因子 2,辐条数 3420,期相模式为自适应,期相设置为平扫 1 期,动脉期 2 期,门脉期 1 期,延迟期 1 期, AIF ROI 手动模式(ROI 直径 10 mm),抑脂方式为化学饱和法,扫描时间 310 s。3D-VIBE 序列主要扫描参数:视野 400 mm×280 mm, TR 3.42 ms, TE 1.56 ms,层厚 5 mm,层间距 0 mm,过采样 0%,矩阵 320×288,相位编码 A>P,翻转角 10°,平均次数 1,节数 1,压缩感知加速因子 2.6,抑脂方式为化学饱和法,扫描时间 16 s。uCSR 序列开始扫描后 10 s 采用高压注射器静脉注射对比剂,对比剂为 Gd-DTPA,流率 2.0 mL/s,注射剂量按患者体重计算(0.2 mL/kg),对比剂推注完成后以相同流率加推 15 mL 生理盐水。

### 3. 图像质量分析

图像质量主观评分:由两位从事磁共振诊断工作 10 年以上的高年资医师(医师 A 和医师 B)采用盲法分别对图像进行主观评分。采用 5 分法对 uCSR 重建的各期相准确性进行评分,评分标准:5 分,图像分期准确,包含动脉期、门脉期及延迟期,其中动脉两期均时相准确;4 分,图像分期准确,包含动脉期、门脉期及延迟期,其中动脉两期中有一期时相欠佳;3 分,图像分期较准确,动脉期、门脉期及延迟期中有一期时相欠佳;2 分,图像分期时相欠佳,对诊断准确性有影响;1 分,图像分期时相差,无法用于疾病诊断。采用 5 分法分别对 uCSR 序列重建的延迟期和 3D-VIBE 序列扫描的延迟期图像进行总体图像质量评分,评分标准:5

分,图像质量优秀,满足诊断需求,无伪影,肝实质及血管、胆管系统显示良好;4分,图像质量良好,满足诊断需求,无伪影或轻微伪影,肝实质及血管、胆管系统显示良好;3分,图像质量一般,基本满足诊断需求,轻微伪影,肝实质及血管、胆管系统显示一般;2分,图像质量较差,一定程度影响诊断,伪影较明显;1分,图像质量很差,无法提供诊断建议。采用5分法对呼吸运动伪影抑制效果进行评分,评分标准:5分,无呼吸运动伪影;4分,轻微呼吸运动伪影,不影响诊断;3分,轻度呼吸运动伪影,对诊断有影响,能给予临床部分建议;2分,呼吸运动伪影较明显,影响诊断;1分,呼吸运动伪影明显,无诊断及临床价值。

图像质量客观评价:由两位从事磁共振技术工作10年以上的高年资技师(技师A和技师B)采用盲法分别对uCSR序列重建的延迟期和3D-VIBE序列扫描的延迟期相同解剖层面的图像进行测值,分别测量肝脏实体组织的信号强度( $SI_{\text{肝脏}}$ )、横突棘肌信号强度( $SI_{\text{肌肉}}$ )及背景信号标准差( $SD_{\text{背景}}$ ),各项测值的兴趣区(ROI)直径小于0.5 cm,测量3次取平均值,并计算出信噪比( $SNR = SI_{\text{肝脏}} / SD_{\text{背景}}$ )及对比噪声比[ $CNR = [SI_{\text{肝脏}} - SI_{\text{肌肉}}] / SD_{\text{背景}}$ ]。

#### 4. 统计学分析

采用SPSS 22.0软件进行统计学分析。uCSR序列及3D-VIBE序列延迟期总体图像质量评分、呼吸运动伪影抑制效果评分、图像SNR及CNR测值的组间比较采用非参数Wilcoxon秩和配对检验,两位医师关于uCSR重建的各期相准确性评分比较采用非参数Wilcoxon秩和配对检验;采用相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)对两位医师和两位技师采集的数据进行组间和组内一致性分析,  $ICC < 0.2$  为一致性差,  $0.2 \sim 0.4$  为一致性一般,  $0.4 \sim 0.6$  为一致性中等,  $0.6 \sim 0.8$  为一致性较好,  $0.8 \sim 1.0$  为一致性很好。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

### 结 果

#### 1. 图像质量主观评分结果

两位医师对uCSR重建的各期相准确性进行评分(图1),医师A评分为( $4.860 \pm 0.355$ )分,医师B评分为( $4.830 \pm 0.382$ )分,对两位医师的评分进行非参数Wil-

coxon秩和配对检验,结果显示两者评分差异无统计学意义( $Z = -0.577, P = 0.564$ )。两位医师的评分均值均高于4.0,表明uCSR序列能获得准确的肝脏动态增强扫描期相(动脉期、门脉期及延迟期)。

对3D-VIBE序列和uCSR序列扫描的延迟期图像进行总体图像质量评分(图2),结果显示3D-VIBE图像的总质量评分为( $2.290 \pm 0.710$ )分,uCSR-图像的总质量评分为( $4.340 \pm 0.539$ )分。对两组图像进行非参数Wilcoxon秩和配对检验,结果显示两者评分差异具有统计学意义( $Z = -5.241, P = 0.000$ ),uCSR图像质量明显优于3D-VIBE。

对3D-VIBE序列及uCSR序列延迟期图像的呼吸运动伪影抑制效果进行评分(图2),结果显示3D-VIBE组图像的呼吸伪影抑制效果评分为( $2.000 \pm 0.686$ )分,uCSR组图像的呼吸伪影抑制效果评分为( $4.430 \pm 0.558$ )分,两组图像评分差异具有统计学意义( $t = -5.279, P = 0.000$ ),uCSR组评分明显高于3D-VIBE组,表明uCSR对于呼吸伪影具有良好的抑制作用。

#### 2. 图像质量客观评价结果

对3D-VIBE序列和uCSR序列扫描的延迟期图像进行SNR及CNR测值,结果显示3D-VIBE序列的SNR为 $278.620 \pm 71.930$ ,uCSR序列的SNR为 $249.720 \pm 73.544$ ,两者差异具有统计学意义( $Z = -2.359, P = 0.018$ );3D-VIBE序列的CNR为

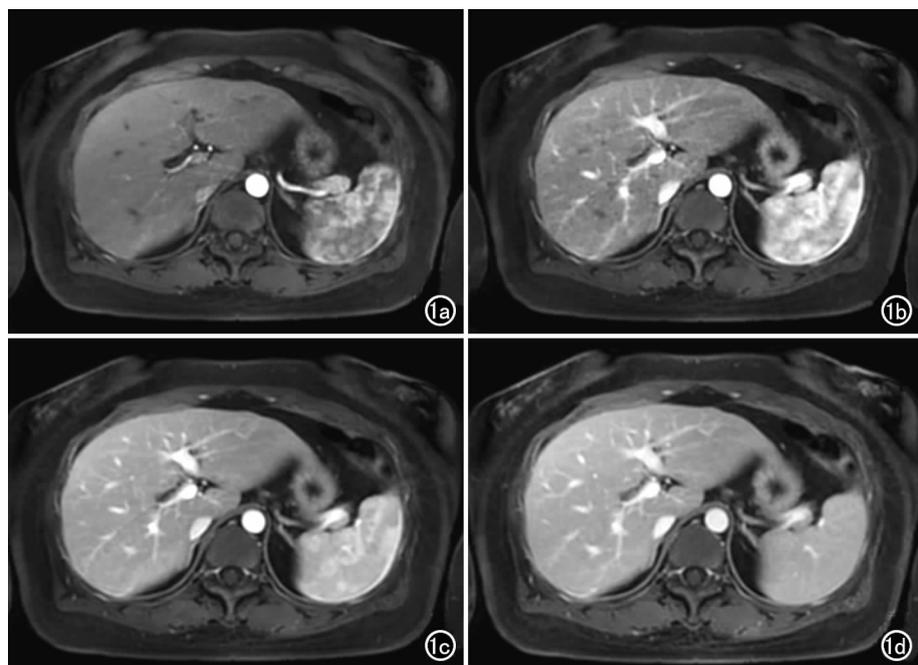


图1 患者,女,48岁,受检者自由呼吸状态下采用uCSR序列进行肝脏多期动态增强扫描,uCSR序列重建各期相准确。a)动脉早期图像,肝动脉显影,门脉未显影;b)动脉中晚期图像,肝动脉显影,门脉中度显影;c)门脉期图像;d)延迟期图像。

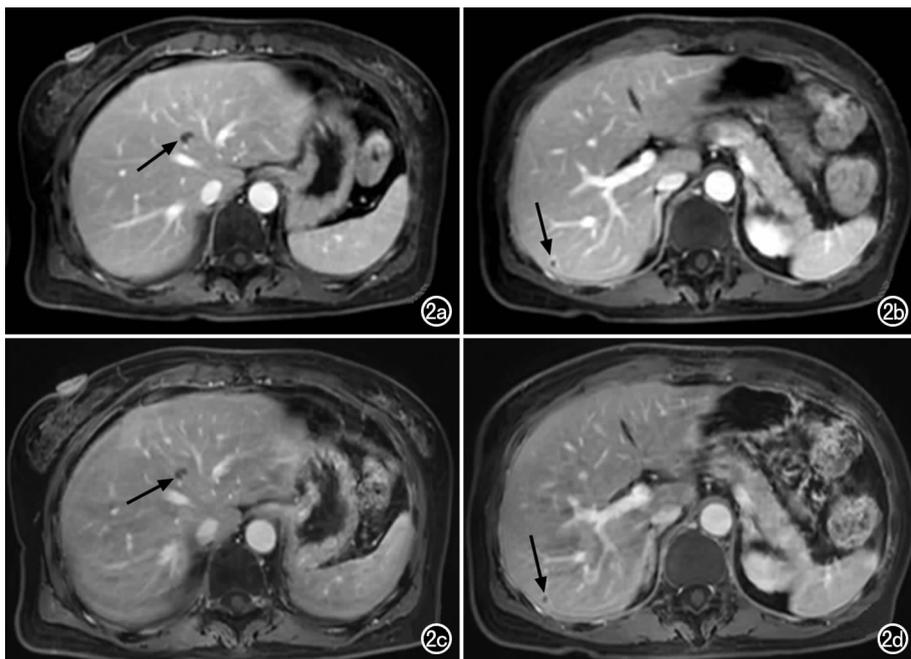


图2 患者,女55岁,屏气配合差,a~b)uCSR序列自由呼吸状态下重建延迟期图像,图像无呼吸伪影,肝实质及血管显示良好,肝脏2个低信号病灶(箭)显示清楚;c~d)3D-VIBE序列屏气状态下扫描延迟期图像,图像呼吸伪影明显,肝实质、肝内血管及肝脏边缘模糊,肝内2个低信号病灶(箭)显示较差,整体图像质量明显差于uCSR序列。

86.700 ± 44.505, uCSR序列的 CNR 为 97.220 ± 37.024,两者差异无统计学意义 ( $Z = -1.753, P = 0.080$ )。以上结果表明 3D-VIBE 图像的 SNR 稍优于 uCSR, CNR 则无明显差异。

### 3. 主观评分及客观测值的一致性分析

一致性分析结果显示,所有评价项目的组内及组间相关系数均大于 0.6 (组内 ICC 分别为 0.767、0.896、0.899、0.867、0.846、0.992、0.993,组间 ICC 分别为 0.679、0.832、0.725、0.753、0.724、0.800、0.897,表 1),表明观察者内部及观察者之间的数据一致性良好。

## 讨论

uCSR 序列是基于动脉信号监测技术、压缩感知技术及 radial-VIBE 技术而形成的新扫描序列,该序

列与 3D-VIBE 相比,其 K 空间采用三维星状叠加采集方式进行径向数据采样,该方法相较于 K 空间的线性笛卡尔采样,可明显降低呼吸运动对于图像的影响<sup>[4,5]</sup>,减少呼吸运动伪影,同时该技术为进一步降低呼吸运动对于图像质量的影响,采用自动提取呼吸信号,生成呼吸曲线,以曲线底部(呼气末)作为参考,对整个呼吸周期采集信号采用不同权重进行图像重建,随着远离曲线底部相应数据权重降低,保证了数据的利用,同时有效降低了呼吸运动的影响。常规的 radial-VIBE 序列时间分辨率低<sup>[6,7]</sup>,一般扫描时间达到 2min 以上,因此无法进行肝脏的动态增强扫描,目前临床常规应用于对时间分辨率要求不高的检查,如肺肿瘤的放射治疗<sup>[8]</sup>及胎儿颅脑磁共振扫描<sup>[9]</sup>。随着磁共振加速技术的应用,特别是压缩感知技术的出

现,通过优质重构算法将少量稀疏采集数据进行精确恢复出原始信号<sup>[10,11]</sup>,可明显缩短数据采集时间、减少计算量,同时保持原始信号的重建质量要求,从而显著降低采集时间而不降低图像质量<sup>[12]</sup>,该技术作为重要的加速技术应用到 MRI 各个部位的检查中<sup>[10,12,13]</sup>。

uCSR 序列结合压缩感知技术及 radial-VIBE 技术后实现了动态增强多期扫描,有研究采用一种额外维度的黄金角径向稀疏并行采样技术(eXtra-Dimensional golden-angle radial sparse parallel, XD-GRASP)结合压缩感知技术进行肝脏动态增强扫描,该技术将连续采集的 K 空间数据分类为具有不同运动状态的多组欠采样数据集,使用直接从数据中提取的运动信号进行图像重建<sup>[3,14]</sup>;另有研究采用一种新型笛卡尔采样、额外维度 VIBE (eXtra-Dimensional

表1 各项评价指标的一致性分析结果

指标	组内相关系数		组间相关系数	
	ICC	95%CI	ICC	95%CI
uCSR 重建期相准确性评分	0.767	0.585~0.875	0.679	0.451~0.824
3D-VIBE 整体图像质量评分	0.896	0.804~0.946	0.832	0.692~0.912
uCSR 整体图像质量评分	0.899	0.809~0.948	0.725	0.519~0.851
3D-VIBE 呼吸运动伪影抑制效果评分	0.867	0.752~0.930	0.753	0.563~0.867
uCSR 呼吸运动伪影抑制效果评分	0.846	0.716~0.919	0.724	0.518~0.850
SNR	0.992	0.984~0.996	0.800	0.639~0.894
CNR	0.993	0.986~0.996	0.897	0.807~0.947

注:ICC,组内相关系数;CI 置信区间。

VIBE, XD-VIBE) 序列进行肝脏动态增强扫描<sup>[15]</sup>, 重建多期图像时采用的是相同时间分辨率进行等距划分时间点, 将相邻两个时间点的数据进行重建从而获得多期图像。两种技术扫描数据未对对比剂进入组织进行检测, 因此无法解决个体差异导致对比剂到达靶扫描区时间差异对于重建图像期相准确性的影响, uCSR 序列通过对靶器官动脉进行手动标记, 在整个采集数据里包含标记动脉信号变化获得标记血管的时间-信号曲线, 然后以动脉时间-信号曲线作为参考, 将动脉时间-信号曲线达峰高度一半的时刻点定义为 start time, start time 决定着动脉期开始重建的起始时刻点, 通过该方法进行图像的各期重建能够更好地保证动态增强各期期相的准确率, 特别是肝脏的动脉期。本研究中将肝门水平的腹主动脉作为标记血管, 获得腹主动脉的时间-信号曲线, 以该曲线为依据进行肝脏的动态增强多期图像重建, 与 XD-VIBE 采用固定时间分辨率进行等距划分时间点进行图像重建相比较, 结合动脉时间-信号曲线可让重建的动脉期更准确, 避免由于打药速度和受检者体循环差异导致的重建期相不准确。本研究搜集无法很好配合屏气检查的患者作为研究对象, 全部病例均重建出符合诊断要求的各期图像, 通过与 3D-VIBE 序列扫描得到的延迟期图像进行比较, uCSR 图像在整体评分及呼吸伪影抑制方面均优于 3D-VIBE 图像, 这也反映出放射状 K 空间填充方式较线性 K 空间填充能够更好地抑制呼吸运动对于图像质量的影响。对两者图像的 SNR 及 CNR 进行比较, 结果显示 3D-VIBE 序列在 SNR 上稍优于 uCSR, CNR 则无明显差异, 后期可通过改变参数来提高图像的 SNR 及 CNR。

本研究存在以下局限性: ①为避免受检者过多注射对比剂, 所有受检者均只进行 1 次对比剂注射, 获得了 uCSR 的动态多期数据, 无法得到 3D-VIBE 序列的动脉期及门脉期图像, 因此只进行了 uCSR 序列及 3D-VIBE 序列延迟期图像质量和呼吸伪影抑制效果以及图像客观参数(SNR、CNR) 的比较, 无法进行动脉期和门脉期图像质量的比较, 后期研究中将继续搜集短时间内需多次进行检查的受检者作为研究对象, 分别采用 uCSR 及 3D-VIBE 进行动态增强扫描, 对各期图像进行分析比较。②uCSR 及 3D-VIBE 延迟期图像并不是在注射对比剂后相同时间点进行扫描, 因此进入肝脏对比剂的量并不一致, 可能会对 uCSR、3D-VIBE 图像 SNR 及 CNR 比较的准确性有影响。

#### 参考文献:

[1] Yu MH, Lee JM, Yoon JH, et al. Clinical application of controlled aliasing in parallel imaging results in a higher acceleration (CAIPIRINHA)-volumetric interpolated breathhold (VIBE) se-

- quence for gadoteric acid-enhanced liver MR imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2013, 38(5): 1020-1026.
- [2] Benjamin K, Andreas MB, Julian LW, et al. Dynamic liver magnetic resonance imaging in free-breathing: feasibility of a cartesian T<sub>1</sub>-weighted acquisition technique with compressed sensing and additional self-navigation signal for hard-gated and motion-resolved reconstruction[J]. Invest Radiol, 2017, 52(11): 708-714.
- [3] 赵香田, 黄梦月, 朱锦霞, 等. 运动解析压缩感知重建的自由呼吸 XD-VIBE 在肝脏富血供病变动态增强 MRI 中的应用[J]. 放射学实践, 2019, 34(11): 1186-1191.
- [4] Li YM, Xia CC, Peng WL, et al. Dynamic contrast-enhanced MR imaging of rectal cancer using a golden-angle radial stack-of-stars VIBE sequence: comparison with conventional contrast-enhanced 3D VIBE sequence[J]. Abdom Radiol, 2019, 45(2): 322-331.
- [5] Li HH, Zhu H, Yue L, et al. Feasibility of free-breathing dynamic contrast-enhanced MRI of gastric cancer using a golden-angle radial stack-of-stars VIBE sequence: comparison with the conventional contrast-enhanced breath-hold 3D VIBE sequence[J]. Eur Radiol, 2018, 28(5): 1891-1899.
- [6] Zhang FG, Qu JR, Zhang HK, et al. Preoperative T staging of potentially resectable esophageal cancer: a comparison between free-breathing radial VIBE and breath-hold cartesian VIBE, with histopathological correlation[J]. Transl Oncol, 2017, 10(3): 324-331.
- [7] Duffy PB, Stemmer A, Callahan MJ, et al. Free-breathing radial stack-of-stars three-dimensional Dixon gradient echo sequence in abdominal magnetic resonance imaging in sedated pediatric patients[J]. Pediatr Radiol, 2021, 51(9): 1-9.
- [8] Kumar S, Rai R, Holloway L, et al. Feasibility of free breathing lung MRI for radiotherapy using non-cartesian K-space acquisition schemes[J]. Br J Radiol, 2017, 90(1080): 20170037.
- [9] Ji EP, Young HC, Jung EC, et al. Three-dimensional radial VIBE sequence for contrast-enhanced brain imaging: an alternative for reducing motion artifacts in restless children[J]. AJR Am J Roentgenol, 2018, 210(4): 876-882.
- [10] Feng L, Benkert T, Block KT, et al. Compressed sensing for body MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 45(4): 966-987.
- [11] 王诗瑜, 刘爱连, 王家正, 等. 压缩感知不同加速因子对肝脏 3D-mDixon 序列成像质量的影响[J]. 放射学实践, 2020, 35(12): 1605-1609.
- [12] Cristobal-Huerta A, Poot DHJ, Vogel MW, et al. Compressed sensing 3D-GRASE for faster high-resolution MRI[J]. Magn Reson Med, 2019, 82(3): 984-999.
- [13] Maya H, Masako K, Natsuko O, et al. New parameters of ultra-fast dynamic contrast-enhanced breast MRI using compressed sensing[J]. J Magn Reson Imaging, 2020, 51(1): 164-174.
- [14] Feng L, Axel L, Chandarana H, et al. XD-GRASP: golden-angle radial MRI with reconstruction of extra motion-state dimensions using compressed sensing[J]. Magn Reson Med, 2016, 75(2): 775-788.
- [15] Chandarana H, Feng L, Ream J, et al. Respiratory motion-resolved compressed sensing reconstruction of free-breathing radial acquisition for dynamic liver magnetic resonance imaging[J]. Invest Radiol, 2015, 50(11): 749-756.