

5.0T MRI for quantifying proton density fat fraction of liver

LIU Jianxian¹, WANG Zhensong¹, WANG Xin¹, TIAN Ning¹, CHEN Peng¹, YU Dan²,
YANG Yanxing³, CHENG Chuanli⁴, ZOU Chao⁴, GAN Jie^{1*}

(1. Department of Radiology, Shandong Provincial Third Hospital, Shandong University, Jinan 250032, China;
2. United Imaging Research Institute of Intelligent Imaging, Beijing 100094, China; 3. United Imaging Healthcare,
Shanghai 201807, China; 4. Paul C. Lauterbur Research Center for Biomedical Imaging, Chinese Academy of
Sciences Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Shenzhen 518055, China)

[Abstract] **Objective** To observe the value of 5.0T MRI for quantifying proton density fat fraction (PDFF) of liver. **Methods** Liver chemical shift encoded (CSE) MR scanning were prospectively performed using 5.0T, 3.0T and 1.5T scanner in 30 volunteers, respectively, and CSE-PDFF were measured. Then MR spectroscopy (MRS) were performed using 5.0T and 1.5T scanner, respectively, and MRS-PDFF were also measured. The consistency of liver PDFF measured on different images was observed, and the value of 5.0T MRI for liver PDFF was analyzed. **Results** The overall consistencies of liver CSE-PDFF measured with 5.0T, 3.0T and 1.5T MR scanner were all good (all ICC>0.75, all P<0.001). The consistency of liver CSE-PDFF based on 5.0T and 3.0T, 1.5T MR scanner were both good (ICC=0.989, 0.992, both P<0.001). The overall consistencies of CSE-PDFF based on 5.0T MR and MRS-PDFF based on 5.0T and 1.5T MR were both good (both ICC>0.75, both P<0.001). CSE-PDFF had good consistency with MRS-PDFF based on same 5.0T MR scanner (ICC=0.988, P<0.001), and CSE-PDFF based on 5.0T had good consistency with MRS-PDFF based on 1.5T MR scanner (ICC=0.978, P<0.001). **Conclusion** 5.0T MRI had high value for quantifying liver PDFF. **Keywords** liver; adipose tissue; magnetic resonance imaging; fat fraction; prospective studies
DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2024.05.008

基于 5.0T MRI 定量肝脏质子密度脂肪分数

刘建宪¹,王振松¹,王鑫¹,田宁¹,陈鹏¹,于丹²,杨燕兴³,
程传力⁴,邹超⁴,甘洁^{1*}

(1. 山东大学附属山东省立第三医院影像中心, 山东 济南 250032; 2. 北京联影智能影像技术研究院, 北京 100094;
3. 上海联影医疗科技股份有限公司, 上海 201807; 4. 深圳先进技术研究院劳特伯生物医学成像研究中心, 广东 深圳 518055)

[摘要] **目的** 观察 5.0T MRI 用于定量肝脏质子密度脂肪分数(PDFF)的价值。**方法** 前瞻性对 30 名受试者分别行 5.0T、3.0T、1.5T 肝脏化学位移编码(CSE)MR 扫描,测量 CSE-PDFF;之后行 5.0T、1.5T MR 波谱(MRS),测量 MRS-PDFF。分析不同方法所测肝脏 PDFF 的一致性,评估 5.0T MRI 定量肝脏 PDFF 的价值。**结果** 以不同场强 MR 设备所测肝脏 CSE-PDFF 总体一致性良好 (ICC 均>0.75, P 均<0.001);基于 5.0T MR 与 3.0T、1.5T MR 所测肝脏 CSE-PDFF 的一致性均好 (ICC=0.989、0.992, P 均<0.001)。基于 5.0T MR 所测 CSE-PDFF 与 5.0T、1.5T MR 所测 MRS-PDFF 一致性均好 (ICC 均>0.75, P 均<0.001);其中,5.0T MR 所测 CSE-PDFF 与 MRS-PDFF 一致性好 (ICC=0.988, P<0.001),5.0T MR 所测 CSE-PDFF 与 1.5T MR 所测 MRS-PDFF 一致性好 (ICC=0.978, P<0.001)。**结论** 5.0T MRI 对定量肝脏 PDFF 具有较高价值。

[基金项目] 山东省医药卫生科技项目(202209010957)。

[第一作者] 刘建宪(1984—),男,山东威海人,硕士,主治医师。研究方向:磁共振全身脂肪定量技术和神经功能成像。E-mail: doeljx123@163.com

[通信作者] 甘洁,山东大学附属山东省立第三医院影像中心,250032。E-mail: ganjie000@sina.com

[收稿日期] 2024-01-11 [修回日期] 2024-03-10

[关键词] 肝; 脂肪组织; 磁共振成像; 脂肪分数; 前瞻性研究

[中图分类号] R575; R445.1 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2024)05-0671-06

伴随脂肪肝患病率不断增加, 肝内甘油三酯异常沉积所致非酒精性脂肪性肝病 (nonalcoholic fatty liver disease, NAFLD) 已成为我国肝细胞癌发病率上升的主要原因^[1-2], 无创性定量肝脏及人体组织中的脂肪具有重要临床意义^[3]。基于多回波化学位移编码 (chemical shift encoded, CSE) 水脂分离成像计算质子密度脂肪分数 (proton density fat fraction, PDFF)^[4] 为最常见的肝脏 MR 脂肪定量技术, 不同厂商命名有所不同, 如联影命名为脂肪分析计算技术 (fat analysis calculation technique, FACT), Philips 则为魔镜成像 (mDixon-Quant)^[5]。MR 波谱 (MR spectroscopy, MRS) 是无创评估肝脏脂肪含量的可靠方法, 为 MRI 定量检测的重要参考^[6]。本研究观察 5.0T MRI 定量肝脏脂肪的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 于 2023 年 5 月—2023 年 12 月前瞻性纳入 30 名志愿者, 男 10 名、女 20 名, 年龄 19~68 岁、平均 (30.7 ± 14.8) 岁; 体质指数 (body mass index, BMI) 17.9~34.14 kg/m²、平均 (25.68 ± 4.70) kg/m²; 腰臀比 (waist-to-hip ratio, WHR) 0.67~1.05、平均 (0.83 ± 0.09); 均先后接受 5.0T、3.0T、1.5T MR 肝脏脂肪定量扫描。排除标准: ①MR 检查禁忌证; ②常规 MR 显示肝脏形态及信号异常; ③肝脏手术史; ④影响肝脏代谢的疾病; ⑤服用影响肝脏代谢药物。本研究经院医学伦理委员会审批通过 (KYLL-2022051), 检查前受试者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用联影 uMR Jupiter 5.0T、uMR 588 1.5T 及 Philips Ingenia 3.0T MR 仪, 分别配备 24 通道腹部接收线圈、12 通道腹部接收线圈及 16 通道腹部接收线圈。嘱受试者仰卧, 于 3 h 内接受屏气下 5.0T、3.0T 及 1.5T CSE 序列肝脏脂肪定量扫描 (所用扫描协议相近), 以及 5.0T 和 1.5T 脂肪定量 MRS。所有扫描均采用呼吸门控进行。扫描参数见表 1、2。

采用多梯度回波序列、基于 FACT 和 mDixon-

表 1 肝脏 CSE-MRI 参数

设备场强	序列	回波数		TE(ms)				
5.0T	FACT	6	1.06	2.03	3.00	3.97	4.94	5.91
3.0T	mDixon-Quant	6	0.98	1.68	2.38	3.08	3.78	4.48
1.5T	FACT	6	1.73	3.23	4.73	6.23	7.73	9.23

设备场强	TR (ms)	FA (°)	带宽 (Hz)	NEX	矩阵	FOV (mm)	层厚 (mm)	扫描时间 (s)
5.0T	7.32	3	1 500	1	192×192	400×300	8	15
3.0T	5.70	3	2 367	1	192×192	400×300	8	11
1.5T	10.84	3	1 010	1	192×192	400×300	8	17

表 2 肝脏 MRS 参数

设备场强	TE (ms)			TR (ms)		ROI (mm)	FA (°)	带宽 (Hz)	单次采集时间 (s)	
5.0T	10	15	20	25	30	2 800	20×20×20	90	2 000	17
1.5T	12	24	36	48	60	2 800	20×20×20	90	1 000	16

Quant 获得 CSE-PDFF; 采用连续采集单体素、受激回波采集模式 (stimulated echo acquisition mode, STEAM) 基于 MRS 获得 MRS-PDFF。

1.3 图像分析 由同名医师选取 CSE-MRI 和 MRS 显示肝脏最大层面, 避开主要血管、胆道结构、肝脏边缘及皮下组织, 于信号均匀肝组织处放置 5 个半径 1 cm 的 ROI, 包括肝右叶 3 个、肝左叶 2 个 (图 1)^[7], 分别记为 ROI-1~ROI-5, 并使 ROI 位置在 CSE-MRI 与 MRS 中相同; 对每个 ROI 均测量 3 次 PDFF, 取平均值; 取 5 个 ROI 的总平均值为 PDFF 最终结果。见图 2。



图 1 基于 3D T1 压脂快速扫描定位图像勾画肝脏 ROI 示意图

1.4 统计学分析 采用 Python 3.11 统计分析软件。以 Shapiro-Wilk 检验行正态性分析, 以 $\bar{x} \pm s$ 表示正态分布的计量资料、以中位数 (上下四分位数) 表示不符合者。采用组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC) 和 Bland-Altman 检验分析 PDFF 的

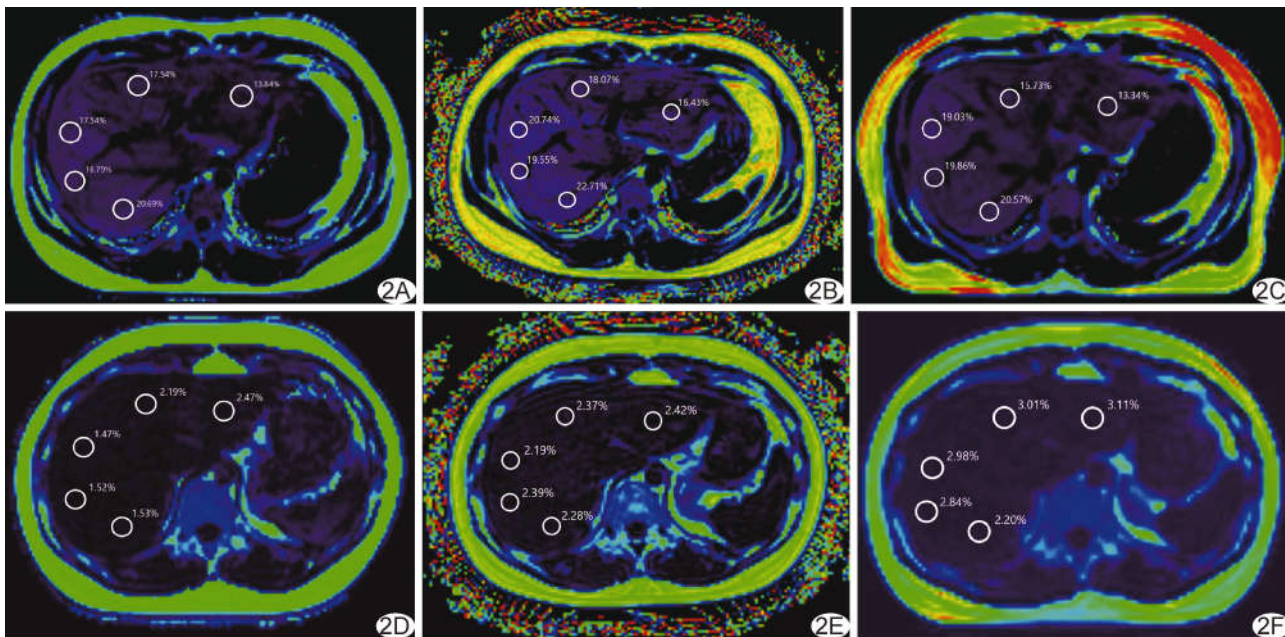


图 2 CSE-PDFF 图 A~C. 肝脏 PDFF 均值为 18.30% (本组最大值) 受检者 (男, 22 岁) 的肝脏 5.0T FACT 伪彩图 (A)、3.0T mDixon-Quant 伪彩图 (B) 及 1.5T FACT 伪彩图 (C); D~F. 肝脏 PDFF 均值为 2.33% (本组最小值) 受检者 (女, 20 岁) 的肝脏 5.0T FACT 伪彩图 (D)、3.0T mDixon-Quant 伪彩图 (E) 及 1.5T FACT 伪彩图 (F)

一致性; 以 $ICC > 0.75$ 为一致性好。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同场强 MRI 所测 CSE-PDFF 基于不同场强 MR 设备测量肝脏 CSE-PDFF 的总体一致性均好

(ICC 均 > 0.75 , P 均 < 0.001), 见表 3; 基于 5.0T MRI 与基于 3.0T、1.5T MRI 所测肝脏 CSE-PDFF 的一致性均好 ($ICC = 0.989, 0.992$, P 均 < 0.001), 其差值均数分别为 0.04% [95% $CI (-2.13\%, 2.22\%)$] 及 0.12% [95% $CI (-1.62\%, 1.87\%)$]。见图 3。

表 3 基于不同场强 MRI 所测肝脏 ROI CSE-PDFF 的一致性分析结果 (%)

设备场强	ROI-1	ROI-2	ROI-3	ROI-4	ROI-5
5.0T	4.15(2.36, 11.63)	4.32(2.49, 11.09)	3.83(2.32, 11.88)	4.26(2.46, 10.08)	4.21(2.49, 9.21)
3.0T	4.01(2.26, 11.40)	4.42(2.16, 10.92)	3.53(2.02, 12.09)	3.58(2.31, 10.26)	4.19(2.29, 9.41)
1.5T	4.20(2.36, 10.76)	3.80(2.61, 10.88)	3.83(2.26, 10.62)	3.94(2.86, 9.62)	4.45(2.63, 8.89)
ICC	0.990	0.989	0.989	0.992	0.991
P 值	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

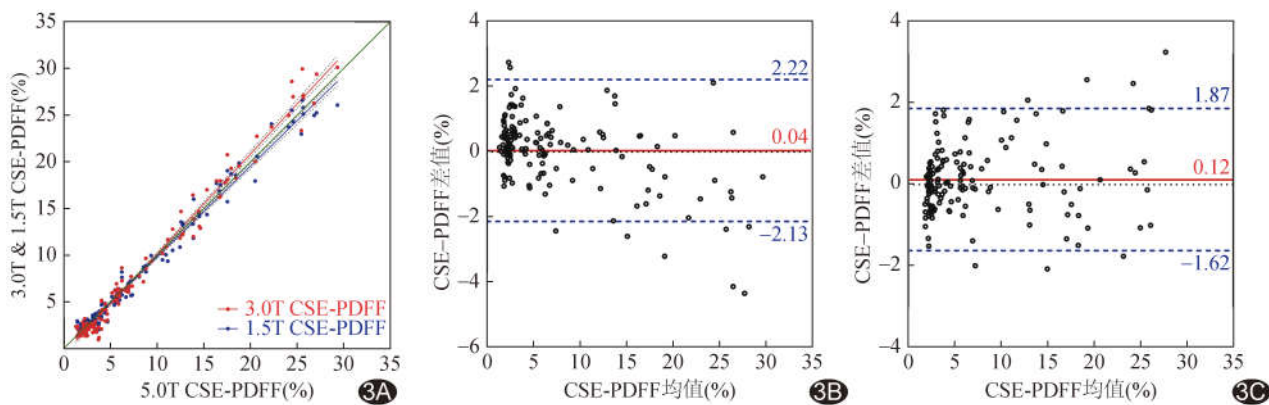


图 3 基于不同场强 MRI 所测肝脏 CSE-PDFF 的一致性分析 A. 5.0T MR 与 3.0T、1.5T MR 的 CSE-PDFF 相关性散点图; B. 5.0T 与 3.0T MR Bland-Altman 图; C. 5.0T 与 1.5T MR Bland-Altman 图

2.2 CSE-PDFF 与 MRS-PDFF 基于 5.0T MR 的 5 个肝脏 ROI CSE-PDFF 与基于 5.0T、1.5T MR 的 MRS-PDFF 总一致性均好 (ICC 均 > 0.75, P 均 < 0.001), 见表 4; 其中, 基于同平台 5.0T MR 的肝脏 CSE-PDFF 与 MRS-PDFF 一致性好 (ICC = 0.988, P < 0.001), 其差值均数为 0.21% [95% CI (-1.84%, 2.26%)]; 基于 5.0T MR 的 CSE-PDFF 与基于 1.5T MR 的 MRS-PDFF 一致性好 (ICC = 0.978, P < 0.001), 其差值均数为 -0.39% [95% CI (-2.76%, 1.98%)]. 见图 4。

3 讨论

肝脏在脂质代谢中具有关键作用^[8-9]。组织学活检是定量肝脏脂肪的“金标准”, 但有创且存在取样误差, 无法用于长期随访及准确诊断脂肪变性^[10]。超声对轻度脂肪肝的敏感度较低, 且具有操作者依赖性^[11-12]。CT 值受多种因素影响, 且检查存在电离辐射, 无法准确定量肝脏脂肪变性^[13-14]。

基于 CSE 的 MR 水脂分离技术可在短时间内完成定量扫描, 有助于无创评估肝脏脂肪含量^[15]。已有研究^[16-19]显示, 基于常规场强 MRI 可有效评估肝脏 CSE-PDFF, 且与组织病理学结果呈显著正相关。欧洲肝脏研究协会临床实践指南^[20-21]指出, CSE-MRI 可定量诊断非酒精性脂肪性肝病。5.0T 超高场强 MRI 分辨率更高, 理论上更有助于提高定量评估肝脏脂肪

的准确性; 但随着场强增强、波长变短, 可产生驻波效应, 导致射频场不均匀及比吸收率 (specific absorption rate, SAR) 升高^[22], 使扫描区域、特别是腹部受化学位移和运动伪影影响更大。同时, CSE 技术又易受主磁场不均匀性的影响而出现相位偏差, 导致水脂抑制不完全^[23], 且高场强可使水峰及多个脂峰间化学位移出现偏移; 而为最大限度减少偏移, 需采用大采集带宽和高梯度场强, 导致潜在涡流影响和图像信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 降低^[24-25]。而 5.0T MR 采用 8 源射频发射和 24 通道腹部接收线圈, 可在很大程度上解决上述磁场不均匀问题。

为更精准地评估肝脏脂肪含量, 本研究以优化参数采集 CSE-MRI; 选择更小的 FA, 避免脂肪短 T1 弛豫属性所致水脂信号差异^[26], 以获得更准确的水脂质子密度对比; 通过多回波 T2* 弛豫曲线拟合消除铁质沉积、肝纤维化等因素对 T2* 弛豫的影响^[27]; 以多峰模型拟合计算不同脂类成分^[28], 减少脂肪频谱复杂性的影响。联影平台 FACT 采用 6 峰脂肪模型重建^[29], 而 Philips 平台 mDixon-Quant 采用 7 峰脂肪模型重建^[30], 实现 100% 动态定量脂质范围^[31]。本研究结果显示, 基于不同场强 MRI 所测 5 个肝脏 ROI 的 CSE-PDFF 总体一致性均好, 且 CSE-PDFF 与 MRS-PDFF 一致性均好; 虽然所用平台及后处理算法有所差异, 仍可肯定 5.0T MRI 与其他场强 MRI 的定量一致性。

表 4 肝脏 CSE-PDFF 与 MRS-PDFF 的一致性分析结果 (%)

场强	ROI-1	ROI-2	ROI-3	ROI-4	ROI-5
CSE-PDFF 5.0T	4.15(2.36, 11.63)	4.32(2.49, 11.09)	3.83(2.32, 11.88)	4.26(2.46, 10.08)	4.21(2.49, 9.21)
MRS-PDFF 5.0T	4.39(3.09, 10.89)	4.56(2.89, 9.55)	3.69(2.70, 9.95)	4.57(2.77, 9.16)	4.28(2.70, 9.68)
MRS-PDFF 1.5T	5.52(3.10, 10.67)	4.47(2.97, 10.81)	4.71(3.50, 13.01)	4.37(3.23, 10.36)	4.48(3.45, 10.62)
ICC	0.984	0.989	0.986	0.989	0.985
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

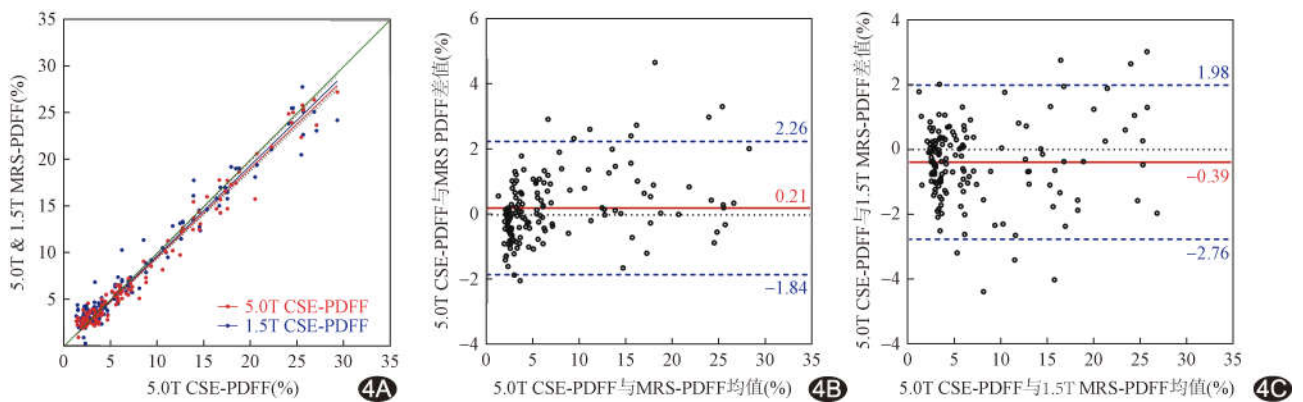


图 4 肝脏 CSE-PDFF 与 MRS-PDFF 的一致性分析 A. 5.0T MR 的 CSE-PDFF 与 5.0T、1.5T MR 的 MRS-PDFF 相关性散点图; B. 5.0T MR 的 CSE-PDFF 与 MRS-PDFF 的 Bland-Altman 图; C. 5.0T MR 的 CSE-PDFF 与 1.5T MR 的 MRS-PDFF 的 Bland-Altman 图

高场强可致组织 T2 缩短,信号衰减较快。本研究采用优化 STEAM 序列行 5.0T MRS,可成倍提高射频脉冲间的扰相梯度幅度而保持梯度零级矩不变,使最小 TE 降至 10 ms,对 J 耦合效应、涡流、主磁场强度、T2 校正和拟合方式等的敏感度降低^[32],在提高 SNR 的同时减少了运动相关问题;通过对多个不同 TE 的水和脂肪谱峰面积进行 T2 拟合计算,最终得到 MRS-PDFF。本研究以 5.0T MR 行 MRS 时,对后处理算法亦加以优化,集成了自动频偏校正、相位校正、汉明滤波、零填充、傅里叶变换和基于 9 峰脂肪模型的曲线拟合^[33];利用基于适配工作站的商业算法所测 PDFF 的偏倚较以第三方 jMRUI 软件所测结果更小^[34]。本研究结果显示,基于 5.0T MRI 所测肝脏 CSE-PDFF 与基于 5.0T、1.5T MRI 所测 MRS-PDFF 均有良好一致性,进一步肯定了 5.0T MRI 用于定量肝脏 PDFF 的价值。

综上所述,5.0T MRI 对定量肝脏 PDFF 具有较高价值。本研究的主要不足:①样本量小;②受屏气和呼吸幅度的影响,无法保证 ROI 定位完全一致;③缺少病理对照。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:刘建宪查阅文献、撰写文章;王振松、王鑫图像分析;田宁、陈鹏研究实施;于丹数据分析、统计分析;杨燕兴、程传力、邹超修改文章;甘洁指导、研究设计、审阅文章。

[参考文献]

- [1] ZHOU J, ZHOU F, WANG W, et al. Epidemiological features of NAFLD from 1999 to 2018 in China[J]. *Hepatology*, 2020, 71(5):1851-1864.
- [2] HUANG D Q, EL-SERAG H B, LOOMBA R. Global epidemiology of NAFLD-related HCC: Trends, predictions, risk factors and prevention [J]. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 2021, 18(4):223-238.
- [3] YOUNOSSI Z M. Non-alcoholic fatty liver disease-A global public health perspective[J]. *J Hepatol*, 2019, 70(3):531-544.
- [4] DYKE J P. Quantitative MRI proton density fat fraction: A coming of age[J]. *Radiology*, 2021, 298(3):652-653.
- [5] 安梓铭,冯琴.磁共振质子密度脂肪分数:一种具有潜力的非酒精性脂肪性肝炎临床试验替代终点[J]. *临床肝胆病杂志*, 2021, 37(6):1445-1448.
- [6] PASANTA D, HTUN K T, PAN J, et al. Magnetic resonance spectroscopy of hepatic fat from fundamental to clinical applications[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(5):842.
- [7] HONG C W, WOLFSON T, SY E Z, et al. Optimization of region-of-interest sampling strategies for hepatic MRI proton density fat fraction quantification [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 47(4):988-994.
- [8] SAKERS A, DE SIQUEIRA M K, SEALE P, et al. Adipose-tissue plasticity in health and disease[J]. *Cell*, 2022, 185(3):419-446.
- [9] KAJIMURA S. Adipose tissue in 2016: Advances in the understanding of adipose tissue biology[J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2017, 13(2):69-70.
- [10] GOCERI E, SHAH Z K, LAYMAN R, et al. Quantification of liver fat: A comprehensive review[J]. *Comput Biol Med*, 2016, 71:174-189.
- [11] 陈洁,张波.超声定量评估非酒精性脂肪肝病肝脏脂肪变性的研究进展[J]. *中国医学科学院学报*, 2021, 43(5):827-832.
- [12] NETAJI A, JAIN V, GUPTA A K, et al. Utility of MR proton density fat fraction and its correlation with ultrasonography and biochemical markers in nonalcoholic fatty liver disease in overweight adolescents[J]. *J Pediatr Endocrinol Metab*, 2020, 33(4):473-479.
- [13] GRAT K, GRAT M, ROWINSKI O. Usefulness of different imaging modalities in evaluation of patients with non-alcoholic fatty liver disease[J]. *Biomedicines*, 2020, 8(9):298.
- [14] 郭智萍.脂肪肝的定量影像学评价[J]. *中华健康管理学杂志*, 2020, 14(6):583-586.
- [15] STAREKOVA J, REEDER S B. Liver fat quantification: Where do we stand? [J]. *Abdom Radiol (NY)*, 2020, 45(11):3386-3399.
- [16] BAWDEN S J, HOAD C, KAYE P, et al. Comparing magnetic resonance liver fat fraction measurements with histology in fibrosis: The difference between proton density fat fraction and tissue mass fat fraction[J]. *MAGMA*, 2023, 36(4):553-563.
- [17] 王玉丽,胡莹莹,王晔,等. MR 定量分析非酒精性脂肪性肝病患者肝脂肪含量与代谢综合征的相关性[J]. *中国医学影像技术*, 2020, 36(12):1853-1857.
- [18] JIANG Y, ZOU J, FAN F, et al. Application of multi-echo Dixon and MRS in quantifying hepatic fat content and staging liver fibrosis[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1):2555.
- [19] IDILMAN I S, ANIKTAR H, IDILMAN R, et al. Hepatic steatosis: Quantification by proton density fat fraction with MR imaging versus liver biopsy [J]. *Radiology*, 2013, 267(3):767-775.
- [20] SBERNA A L, BOUILLET B, ROULAND A, et al. European

- Association for the Study of the Liver (EASL), European Association for the Study of Diabetes (EASD) and European Association for the Study of Obesity (EASO) clinical practice recommendations for the management of non-alcoholic fatty liver disease: Evaluation of their application in people with Type 2 diabetes[J]. *Diabet Med*, 2018, 35(3):368-375.
- [21] European Association for the Study of the Liver (EASL); European Association for the Study of Diabetes (EASD); European Association for the Study of Obesity (EASO). EASL-EASD-EASO Clinical Practice Guidelines for the management of non-alcoholic fatty liver disease[J]. *Diabetologia*, 2016, 59(6): 1121-1140.
- [22] LADD M E, BACHERT P, MEYERSPEER M, et al. Pros and cons of ultra-high-field MRI/MRS for human application [J]. *Prog Nucl Magn Reson Spectrosc*, 2018, 109:1-50.
- [23] MA J. Dixon techniques for water and fat imaging[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2008, 28(3):543-558.
- [24] KORINEK R, BARTUSEK B, STARCUK Z. Water-fat separation in rat by MRI at high field (9.4 T)[C]//Proceedings of the 10th International Conference. Smolenice: Measurement, 2015:133-136.
- [25] KORINEK R, PFLEGER L, ECKSTEIN K, et al. Feasibility of hepatic fat quantification using proton density fat fraction by multi-echo chemical-shift-encoded MRI at 7T[J]. *Front Phys*, 2021, 9:665562.
- [26] LENA B, BOS C, FERRER C J, et al. Rapid 2D variable flip angle method for accurate and precise T1 measurements over a wide range of T1 values[J]. *NMR Biomed*, 2021, 34(8):e4542.
- [27] GUIMARAES A R, SIQUEIRA L, UPPAL R, et al. T2 relaxation time is related to liver fibrosis severity [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2016, 6(2):103-114.
- [28] MAMIDIPALLI A, FOWLER K J, HAMILTON G, et al. Prospective comparison of longitudinal change in hepatic proton density fat fraction (PDFF) estimated by magnitude-based MRI (MRI-M) and complex-based MRI (MRI-C) [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(9):5120-5129.
- [29] CHENG C, ZOU C, LIANG C, et al. Fat-water separation using a region-growing algorithm with self-feeding phasor estimation[J]. *Magn Reson Med*, 2017, 77(6):2390-2401.
- [30] 刘娜, 张浩南, 张煜堃, 等. 磁共振 IDEAL-IQ 与 mDixon Quant 技术对腹部、椎体脂肪定量的对比分析[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(3):49-53.
- [31] WANG Y X J, WANG X, WU P, et al. Topics on quantitative liver magnetic resonance imaging[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2019, 9(11):1840-1890.
- [32] REEDER S B, CRUITE I, HAMILTON G, et al. Quantitative assessment of liver fat with magnetic resonance imaging and spectroscopy[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2011, 34(4):729-749.
- [33] HAMILTON G, YOKOO T, BYDDER M, et al. *In vivo* characterization of the liver fat ¹H MR spectrum [J]. *NMR Biomed*, 2011, 24(7):784-790.
- [34] JABŁONSKI M, STARČUKOVÁ J, STARČUK Z Jr. Processing tracking in jMRUI software for magnetic resonance spectra quantitation reproducibility assurance [J]. *BMC bioinformatics*, 2017, 18(1):56.