Advances in Clinical Medicine 临床医学进展, 2026, 16(11), 636-647
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/acm
https://doi.org/10.12677/acm.2026.16113655

Gd-EOB-DTPA增强MRI多器官信号参数在肝功能分级中的评估价值

杨思睿[1*]，董慧敏[2*]，熊建琳[1]，郭　立[1#]

[1]昆明医科大学第二附属医院，云南　昆明
[2]昆明医科大学附属延安医院(昆明市延安医院)，云南　昆明

收稿日期：2026年10月4日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月5日

摘　要

目的：探讨钆塞酸二钠(Gd-EOB-DTPA)增强MRI肝脏及周围多器官信号参数在肝功能分级中的评估价值。方法：回顾性纳入2024年6月至2025年6月接受Gd-EOB-DTPA增强MRI检查的78例受检者，包括正常组28例、Child-Pugh A级组25例及B + C级组25例。测量增强前及肝胆期T1WI上肝脏、双肾皮质和髓质、脾脏、门静脉及竖脊肌的信号强度(SI)，以竖脊肌SI为内参计算各器官信号强度比(SIR)，并计算各器官相对增强率(RE)。比较三组间各参数差异，采用ROC曲线评价肝脏、肝外及联合参数模型预测Child-Pugh B + C级的效能。结果：三组间SIR肝前、SIR肝后、RE肝、SIR肾皮前、SIR肾髓前、SIR脾前及SIR脾后差异均有统计学意义(均P < 0.05)。SIR肝后预测Child-Pugh B + C级的AUC为0.948，敏感度和特异度分别为92.0%和88.7%。肝脏、肝外及联合参数模型的AUC分别为0.950、0.864和0.983；联合模型的敏感度和特异度分别为92.0%和98.1%，AUC高于肝外参数模型(P = 0.003)。结论：Gd-EOB-DTPA增强MRI多器官信号参数能够较好地区分不同肝功能分级；在识别Child-Pugh B + C级肝功能异常方面，肝脏参数联合肝外参数可进一步提高诊断效能，具有潜在的临床辅助价值。

关键词

钆塞酸二钠，磁共振成像，肝功能分级，信号强度，多器官参数

Value of Multi-Organ Signal Parameters on Gd-EOB-DTPA-Enhanced MRI in the Assessment of Liver Function Grading

Sirui Yang[1*], Huimin Dong[2*], Jianlin Xiong[1], Li Guo[1#]

[1]The Second Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan

[*]共同第一作者。
[#]通讯作者。

文章引用: 杨思睿, 董慧敏, 熊建琳, 郭立. Gd-EOB-DTPA 增强 MRI 多器官信号参数在肝功能分级中的评估价值[J]. 临床医学进展, 2026, 16(11): 636-647. DOI: 10.12677/acm.2026.16113655

[2]The Affiliated Yan'an Hospital of Kunming Medical University (Kunming Yan'an Hospital), Kunming Yunnan

Received: October 4, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 5, 2026

Abstract

Objective: To investigate the value of hepatic and perihepatic multi-organ signal parameters derived from gadoxetic acid disodium (Gd-EOB-DTPA)-enhanced magnetic resonance imaging (MRI) in the assessment of liver function grading. Methods: This retrospective study included 78 subjects who underwent Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI between June 2024 and June 2025, including 28 subjects in the normal liver function group, 25 in the Child-Pugh class A group, and 25 in the Child-Pugh class B + C group. Signal intensity (SI) was measured on pre-contrast and hepatobiliary-phase T1-weighted images in the liver, bilateral renal cortices and medullae, spleen, portal vein, and erector spinae muscles. The signal intensity ratio (SIR) of each organ was calculated using the SI of the erector spinae muscles as an internal reference, and the relative enhancement (RE) of each organ was also calculated. Differences in the parameters among the three groups were analyzed. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis was performed to evaluate the performance of hepatic, extrahepatic, and combined parameter models in predicting Child-Pugh class B + C. Results: Significant differences among the three groups were observed in pre-contrast hepatic SIR, hepatobiliary-phase hepatic SIR, hepatic RE, pre-contrast renal cortical SIR, pre-contrast renal medullary SIR, pre-contrast splenic SIR, and hepatobiliary-phase splenic SIR (all $P < 0.05$). The area under the curve (AUC) of hepatobiliary-phase hepatic SIR for predicting Child-Pugh class B + C was 0.948, with a sensitivity and specificity of 92.0% and 88.7%, respectively. The AUCs of the hepatic, extrahepatic, and combined parameter models were 0.950, 0.864, and 0.983, respectively. The combined model achieved a sensitivity of 92.0% and a specificity of 98.1%, and its AUC was significantly higher than that of the extrahepatic parameter model ($P = 0.003$). Conclusion: Multi-organ signal parameters derived from Gd-EOB-DTPA-enhanced MRI can effectively differentiate among different levels of liver function. For identifying Child-Pugh class B + C liver dysfunction, combining hepatic and extrahepatic parameters can further improve diagnostic performance and may have potential clinical value as an adjunctive imaging assessment tool.

Keywords

Gd-EOB-DTPA, Magnetic Resonance Imaging, Liver Function Grading, Signal Intensity, Multi-Organ Parameters

Copyright © 2026 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

肝功能分级对于肝脏疾病的诊断、治疗方案的制定以及预后评估具有重要意义。传统肝功能分级主要依赖于血清生化指标，如血清胆红素、白蛋白、凝血酶原时间等，但这些指标存在一定的局限性，如对早期肝功能损害的敏感性不足、受多种因素干扰等[1] [2]。近年来，随着影像学技术的不断发展，其在肝功能的评估中发挥着越来越重要的作用。钆塞酸二钠(Gd-EOB-DTPA)作为一种肝细胞特异性对比剂，不仅能够清晰显示肝脏病变的形态学特征，还可用于肝细胞的功能状态的评估。然而，目前关于 Gd-EOB-

DTPA 增强磁共振成像(MRI)在肝功能分级中的应用研究大多集中于肝脏本身信号的变化[3]-[5]，而忽略了肝脏周围器官信号变化的潜在价值。事实上，肝脏与脾脏、肾脏、肌肉等周围器官在解剖结构和生理功能上具有密切的联系，这些器官的信号参数可能与肝脏功能状态存在一定的相关性[6]-[9]。因此，本研究拟通过 Gd-EOB-DTPA 增强 MRI 获取肝脏及周围多组织器官(脾、肾、血管和肌肉)的信号参数，系统分析其在不同肝功能分级中的特征差异，并探讨多器官联合评估对肝功能分级的优化效能，旨在为临床评估肝功能提供更为全面、准确的影像学标志物。

2. 资料与方法

2.1. 研究对象

本研究为回顾性研究，收集 2024 年 6 月至 2025 年 6 月间于我院接受 Gd-EOB-DTPA 增强 MRI 检查的患者。

纳入标准：(1) 肝硬化组：① 有慢性肝炎病史，结合临床、病理及影像学表现确诊为肝硬化；② 具备完整的血液生化检查资料，可完成 Child-Pugh 分级；③ 进行了上腹部 Gd-EOB-DTPA 增强 MRI 检查。(2) 肝功能正常组：同期就诊肝功能正常患者中，根据肝硬化组的年龄和性别分布进行匹配，排除病毒性肝炎、酒精性及药物性肝损伤者。

排除标准：(1) 肝脏：既往行肝脏手术或介入治疗史(部分切除、移植、射频消融、栓塞等)、肝脏占位性病变(单发 > 5 cm 或多发累计 > 5 cm)、肝脏弥漫性病变(中重度脂肪肝或肝铁沉积等)、胆道梗阻；(2) 肾脏：肾功能异常(肌酐 > 133 μmol/L 或尿素氮 > 9 mmol/L)、肾脏占位性病变(单发 > 3 cm 或多发累计 > 3 cm)或弥漫性病变、肾脏手术或介入治疗史(切除、穿刺或局部治疗等)；(3) 脾脏：脾脏手术或介入治疗史、脾脏占位性病变(单发 > 3 cm 或多发累计 > 3 cm)或弥漫性病变；(4) 门静脉：门静脉血栓或癌栓形成；(5) 竖脊肌：肌肉占位性病变、邻近组织侵犯(椎体/腹膜后占位等)、肌肉信号异常(明显脂肪浸润、水肿/出血等信号异常)、脊柱手术史(椎间盘切除或内固定术等)；(6) 影像质量：MRI 图像质量不满足分析要求。

在分组上，将纳入患者严格分为三组，即肝功能正常组、Child-Pugh A 级组和 Child-Pugh B + C 级组。

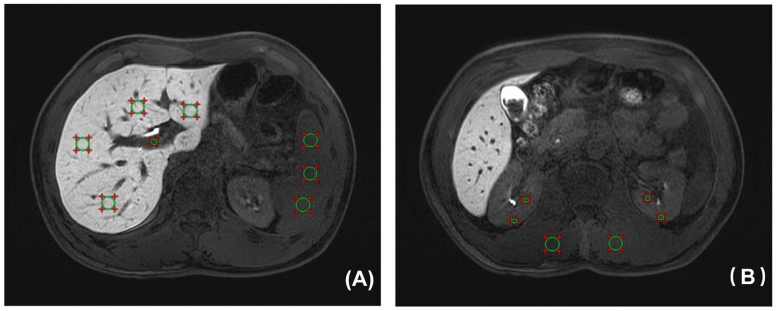
2.2. 检查方法

所有患者均在 3.0 T 磁共振扫描仪(Signa Premier，GE Healthcare，美国)上完成检查，扫描范围从膈顶至肾下极。对比剂 Gd-EOB-DTPA 经外周静脉团注，剂量为 0.025 mmol/kg。扫描序列包括 T2 加权成像(T2WI)、T1 加权成像(T1WI)脂肪抑制序列以及 T1WI 脂肪抑制增强扫描。在注射 Gd-EOB-DTPA 后，分别于 20 s、60 s、180 s 行动脉期、门脉期及过渡期扫描，于注射对比剂 20 min 行肝胆期扫描。增强前后的 T1WI 脂肪抑制序列轴位图像的扫描参数如下：重复时间(TR) 3.11 ms，回波时间(TE) 1.44 ms，视野(FOV) 34.0 cm × 34.0 cm，矩阵 192 × 384，层厚 5.0 mm，翻转角 15°，扫描时间 12 s。

2.3. 信号强度参数的获取

于增强前及增强后肝胆期 T1WI 轴位图像上找到肝脏最大层面，分别在肝左外叶、左内叶、右前叶及右后叶各放置 1 个感兴趣区(ROI)，在脾脏最大层面放置 3 个 ROI，左右竖脊肌各放置 2 个 ROI，取各 ROI 平均值作为相应组织增强前后的信号强度，ROI 面积约 1 cm^2。同时，在增强前及增强后肝胆期图像上，测量门静脉主干中间部、肾门平面双肾皮质和髓质的信号强度参数，计算其平均值作为相应信号强度(勾画肾皮髓质 ROI 位置时，需结合平扫和皮髓质期图像确定)，ROI 面积约 20~40 mm^2 (见图 1)。所有

ROI 勾画均需避开不相关的血管、胆管、占位性病灶及伪影。



(A) 肝胆期肝脏、门静脉主干及脾脏信号测定方式；(B) 肝胆期双肾皮髓质信号及双侧竖脊肌测定方式。

Figure 1. Method for measuring signal intensity of various organ tissues during the hepatobiliary phase
图 1. 肝胆期各脏器组织信号测定方法

将增强前肝脏、双肾皮质和髓质、脾脏、门静脉、竖脊肌的信号强度(SI)分别记为 SI 肝前、SI 肾皮前、SI 肾髓前、SI 脾前、SI 门前、SI 竖前；增强后各脏器组织的信号强度分别为 SI 肝后、SI 肾皮后、SI 肾髓后、SI 脾后、SI 门后、SI 竖后。计算肝脏增强率(RE 肝) = (SI 肝后 − SI 肝前)/SI 肝前，同理，分别计算其他脏器组织的增强率(RE 肾皮、RE 肾髓、RE 脾、RE 门、RE 竖)。为消除个体差异及扫描系统性因素对信号强度绝对值的影响，进一步以竖脊肌作为内部参照计算信号强度比(SIR)：增强前各器官 SIR =该器官增强前 SI/同序列竖脊肌增强前 SI 均值，增强后各器官 SIR = 该器官肝胆期 SI/同序列竖脊肌增强后 SI 均值，分别记为 SIR 肝前、SIR 肝后、SIR 肾皮前、SIR 肾皮后、SIR 肾髓前、SIR 肾髓后、SIR 脾前、SIR 脾后、SIR 门前及 SIR 门后。

2.4. 统计分析

采用 SPSS 26.0 和 R 4.5.3 软件进行统计分析。计量资料采用 Shapiro-Wilk 检验进行正态性检验，符合正态分布且方差齐者以均数 ± 标准差($\bar{x}$ ± s)表示，组间比较采用单因素方差分析，组间两两比较采用 Tukey 法；不符合正态分布者以中位数(第 25、75 百分位数) [M(P25, P75)]表示，组间比较采用 Kruskal-Wallis H 检验，两两比较采用 Bonferroni 校正的 Dunn 检验。计数资料以例(%)表示，组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。比较正常组、Child-Pugh A 级组和 Child-Pugh B + C 级组间临床资料、各器官 SIR 参数及肝脏增强率的差异。以 Child-Pugh B + C 级为结局变量，分别将肝脏参数、肝外参数及二者联合纳入 Logistic 回归分析，构建肝脏参数模型、肝外参数模型和联合参数模型。绘制受试者工作特征(ROC)曲线，计算曲线下面积(AUC)及其对应的敏感度和特异度，采用 DeLong 检验比较 AUC。所有检验均为双侧检验，以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3. 结果

本研究共纳入 78 例患者的影像及相关资料，正常组 28 例、Child-Pugh A 级组 25 例、Child-Pugh B + C 级组 25 例(Child-Pugh B 级组 17 例，Child-Pugh C 级 8 例)。三组受检者间性别、血清肌酐(Cr)及尿素氮(BUN)差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)；年龄三组间差异有统计学意义($P = 0.042$)，两两比较显示正常组与 Child-Pugh B + C 级组间差异有统计学意义($P = 0.032$)；白蛋白(ALB)、总胆红素(TBIL)、国际标准化比率(INR)及凝血酶原时间(PT)三组间差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$)，且 Child-Pugh B + C 级组与

其余两组间差异均有统计学意义(均 P < 0.01)，见表 1。

Table 1. General clinical characteristics of the groups stratified by liver function status
表 1. 不同肝功能分组的一般临床资料

指标	正常组(n = 28)	Child-Pugh A 级组 (n = 25)	Child-Pugh B + C 级组 (n = 25)	P 值 [1]	P 值 [2]	P 值 [3]	P 值 [4]
性别(男/女)	15/13	15/10	15/10	0.859	—	—	—
年龄(岁)	46.93 ± 14.83	51.04 ± 12.06	56.00 ± 11.02	0.042	0.478	0.363	0.032
ALB(g/L)	44.00 (40.50, 45.40)	41.10 (37.50, 42.50)	30.60 (27.10, 33.90)	<0.001	0.104	<0.001	<0.001
TBIL(μmol/L)	15.60 (11.70, 21.20)	15.90 (11.90, 21.90)	46.10 (35.00, 67.30)	<0.001	1.000	<0.001	<0.001
肌酐(μmol/L)	77.00 (54.00, 85.00)	69.00 (60.00, 74.00)	64.00 (53.00, 71.00)	0.174	1.000	0.761	0.195
尿素氮(mmol/L)	4.58 (3.70, 5.80)	4.60 (4.00, 5.77)	4.30 (3.71, 4.90)	0.465	1.000	0.655	1.000
INR	0.94 (0.91, 1.01)	1.07 (1.01, 1.13)	1.33 (1.21, 1.44)	<0.001	0.016	<0.001	<0.001
PT(s)	11.62 ± 1.14	13.47 ± 1.32	16.06 ± 2.34	<0.001	0.001	<0.001	<0.001

注：P 值 [1] 为三组总体比较；P 值 [2] 为正常组与 Child-Pugh A 级组比较，P 值 [3] 为 Child-Pugh A 级组与 Child-Pugh B + C 级组比较，P 值 [4] 为正常组与 Child-Pugh B + C 级组比较；同下各表。

3.1. 增强前、后各组肝脏信号情况

SIR 肝前、SIR 肝后及 RE 肝在正常组、Child-Pugh A 级组和 Child-Pugh B + C 级组三组间差异均有统计学意义(均 P < 0.01)；两两比较显示，正常组与 Child-Pugh A 级组间差异均无统计学意义(均 P > 0.05)，Child-Pugh A 级组与 Child-Pugh B + C 级组间 SIR 肝后及 RE 肝差异均有统计学意义(均 P < 0.001)，正常组与 Child-Pugh B + C 级组间 SIR 肝前、SIR 肝后及 RE 肝差异均有统计学意义(均 P < 0.01) (见表 2)。

Table 2. Comparison of hepatic SIR and RE before and after enhancement among the groups
表 2. 各组增强前、后肝脏的 SIR 及 RE 肝比较

指标	正常组(n = 28)	Child-Pugh A 级组 (n = 25)	Child-Pugh B + C 级组(n = 25)	P 值 [1]	P 值 [2]	P 值 [3]	P 值 [4]
SIR 肝前	1.64 ± 0.22	1.49 ± 0.23	1.37 ± 0.32	0.001	0.108	0.218	<0.001
SIR 肝后	4.76 (4.12, 5.49)	4.16 (3.14, 4.69)	2.03 (1.60, 2.42)	<0.001	0.331	<0.001	<0.001
RE 肝	2.30 ± 1.02	2.09 ± 1.29	0.83 ± 0.61	<0.001	0.720	<0.001	<0.001

3.2. 增强前、后各组肾脏的信号情况

3.2.1. 增强前、后各组肾皮质的信号情况

SIR 肾皮前三组间差异有统计学意义(P < 0.001)，两两比较显示 Child-Pugh B + C 级组高于 Child-Pugh A 级组(P = 0.002)及正常组(P < 0.001)，正常组与 Child-Pugh A 级组间差异无统计学意义(P > 0.05)；SIR 肾皮后及 RE 肾皮三组间差异均无统计学意义(均 P > 0.05) (见表 3)。

3.2.2. 增强前、后各组肾髓质的信号情况

SIR 肾髓前三组间差异有统计学意义(P < 0.001)，两两比较显示 Child-Pugh B + C 级组高于 Child-Pugh A 级组(P < 0.001)及正常组(P = 0.013)；SIR 肾髓后及 RE 肾髓三组间差异均无统计学意义(均 P > 0.05) (见表 4)。

Table 3. Comparison of renal cortical SIR and RE before and after enhancement among the groups
表 3. 各组增强前、后肾皮质的 SIR 及 RE 比较

指标	正常组(n = 28)	Child-Pugh A 级组 (n = 25)	Child-Pugh B + C 级组 (n = 25)	P 值 [1]	P 值 [2]	P 值 [3]	P 值 [4]
SIR 肾皮前	1.05 (1.03, 1.16)	1.14 (0.99, 1.27)	1.32 (1.26, 1.51)	<0.001	1.000	0.002	<0.001
SIR 肾皮后	1.96 (1.85, 2.16)	1.96 (1.80, 2.20)	2.23 (1.91, 2.49)	0.075	1.000	0.178	0.116
RE 肾皮	1.03 (0.73, 1.47)	1.11 (0.69, 1.28)	0.94 (0.64, 1.46)	0.706	1.000	1.000	1.000

Table 4. Comparison of renal medullary SIR and RE before and after enhancement among the groups
表 4. 各组增强前、后肾髓质的 SIR 及 RE 比较

指标	正常组 (n = 28)	Child-Pugh A 级组 (n = 25)	Child-Pugh B + C 级组(n = 25)	P 值 [1]	P 值 [2]	P 值 [3]	P 值 [4]
SIR 肾髓前	0.98 (0.85, 1.03)	0.91 (0.81, 1.03)	1.15 (0.99, 1.23)	<0.001	1.000	<0.001	0.013
SIR 肾髓后	2.10 (1.88, 2.31)	1.90 (1.79, 2.40)	2.23 (1.98, 2.48)	0.387	1.000	0.589	0.847
RE 肾髓	1.49 (1.01, 2.03)	1.55 (1.31, 1.86)	1.47 (0.95, 1.99)	0.970	1.000	1.000	1.000

3.3. 增强前、后各组脾脏的信号情况

SIR 脾前及 SIR 脾后三组间差异均有统计学意义(P = 0.015, P = 0.001)；两两比较显示，SIR 脾前正常组与 Child-Pugh B + C 级组间差异有统计学意义(P = 0.020)，SIR 脾后 Child-Pugh A 级组与 Child-Pugh B + C 级组间(P = 0.041)及正常组与 Child-Pugh B + C 级组间(P < 0.001)差异均有统计学意义；RE 脾三组间差异无统计学意义(P > 0.05) (见表 5)。

Table 5. Comparison of splenic SIR and RE before and after enhancement among the groups
表 5. 各组增强前、后脾脏的 SIR 及 RE 比较

指标	正常组(n = 28)	Child-Pugh A 级组 (n = 25)	Child-Pugh B + C 级组 (n = 25)	P 值 [1]	P 值 [2]	P 值 [3]	P 值 [4]
SIR 脾前	0.96 (0.89, 1.00)	0.94 (0.87, 1.08)	1.03 (0.95, 1.22)	0.015	1.000	0.068	0.020
SIR 脾后	1.19 (1.07, 1.31)	1.23 (1.17, 1.31)	1.36 (1.21, 1.50)	0.001	0.848	0.041	<0.001
RE 脾	0.46 ± 0.46	0.40 ± 0.34	0.52 ± 0.50	0.630	0.882	0.602	0.866

3.4. 增强前、后各组门静脉的信号情况

SIR 门前、SIR 门后及 RE 门三组间差异均无统计学意义(均 P > 0.05) (见表 6)。

Table 6. Comparison of portal venous SIR and RE before and after enhancement among the groups
表 6. 各组增强前、后门静脉的 SIR 及 RE 比较

指标	正常组(n = 28)	Child-Pugh A 级组 (n = 25)	Child-Pugh B + C 级组 (n = 25)	P 值 [1]	P 值 [2]	P 值 [3]	P 值 [4]
SIR 门前	0.89 (0.77, 1.01)	0.90 (0.76, 1.02)	0.91 (0.79, 1.01)	0.983	1.000	1.000	1.000
SIR 门后	1.67 ± 0.46	1.66 ± 0.41	1.57 ± 0.34	0.632	0.991	0.734	0.643
RE 门	1.22 ± 0.93	1.04 ± 0.73	1.22 ± 0.92	0.681	0.718	0.734	1.000

3.5. 增强前、后各组竖脊肌的信号情况

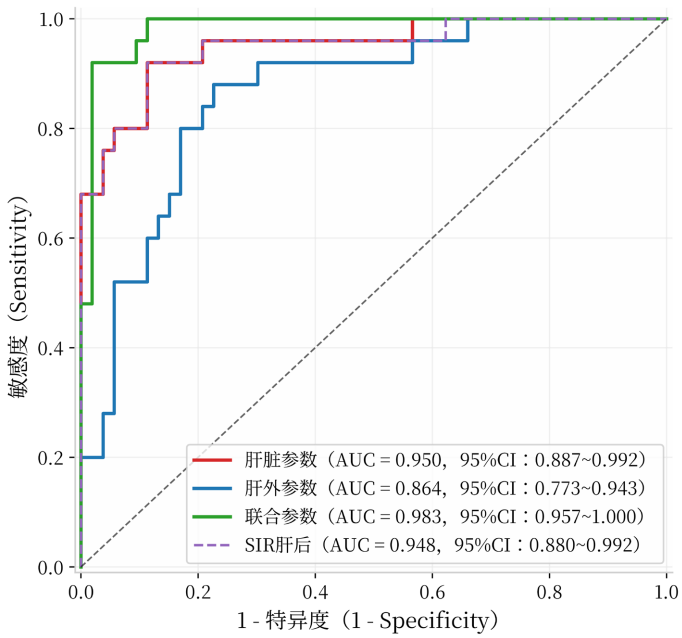
SI 竖前、SI 竖后及 RE 竖三组间差异均无统计学意义(均 P > 0.05) (见表 7)。

Table 7. Comparison of signal intensity of the erector spinae muscles among the groups before and after enhancement
表 7. 各组增强前、后竖脊肌的信号比较

指标	正常组(n = 28)	Child-Pugh A 级组 (n = 25)	Child-Pugh B + C 级组 (n = 25)	P 值 [1]	P 值 [2]	P 值 [3]	P 值 [4]
SI 竖前	400.68 (353.27, 457.92)	407.02 (359.10, 480.67)	379.69 (327.83, 412.07)	0.292	1.000	0.503	0.529
SI 竖后	469.37 (438.74, 506.38)	438.30 (407.91, 479.44)	464.61 (423.39, 551.09)	0.227	0.424	0.383	1.000
RE 竖	0.15 ± 0.29	0.10 ± 0.31	0.20 ± 0.34	0.495	0.819	0.462	0.808

3.6. 各参数模型对 Child-Pugh B + C 级的预测效能

以是否为 Child-Pugh B + C 级为结局变量进行 ROC 分析，结果显示单参数中以 SIR 肝后的预测效能最高，AUC 为 0.948(95%置信区间(95%CI)：0.880~0.992)，最佳截断值为 2.923，对应敏感度 92.0%、特异度 88.7%；其次为 RE 肝(AUC = 0.848)及 SIR 肾皮前(AUC = 0.823)。肝脏参数模型、肝外参数模型及联合参数模型的 AUC 分别为 0.950 (95%CI: 0.887~0.992)、0.864 (95%CI: 0.773~0.943)和 0.983 (95%CI: 0.957~1.000)，联合参数模型的敏感度为 92.0%、特异度为 98.1%。DeLong 检验显示，联合参数模型的 AUC 显著高于肝外参数模型(Z = 2.932, P = 0.003)，与肝脏参数模型间差异无统计学意义(Z = 1.352, P = 0.177) (见表 8、图 2)。



注：肝脏参数模型纳入 SIR 肝前、SIR 肝后、RE 肝；肝外参数模型纳入 SIR 肾皮前、SIR 肾髓前、SIR 脾前、SIR 脾后；联合参数模型纳入上述全部参数

Figure 2. ROC curves of the hepatic-parameter, extrahepatic-parameter, and combined-parameter models for predicting Child-Pugh class B + C
图 2. 肝脏参数、肝外参数及联合参数模型预测 Child-Pugh B + C 级的 ROC 曲线

Table 8. ROC analysis of individual parameters and parameter-based models for predicting Child-Pugh class B + C
表 8. 各参数及参数模型预测 Child-Pugh B + C 级的 ROC 分析结果

参数/模型	AUC (95%CI)	敏感度(%)	特异度(%)
SIR 肝前	0.697 (0.557~0.825)	44.0	90.6
SIR 肝后	0.948 (0.880~0.992)	92.0	88.7
RE 肝	0.848 (0.757~0.924)	92.0	71.7
SIR 肾皮前	0.823 (0.711~0.920)	72.0	84.9
SIR 肾髓前	0.760 (0.630~0.879)	72.0	79.2
SIR 脾前	0.703 (0.574~0.823)	92.0	41.5
SIR 脾后	0.748 (0.614~0.868)	64.0	90.6
肝脏参数模型	0.950 (0.887~0.992)	92.0	88.7
肝外参数模型	0.864 (0.773~0.943)	88.0	77.4
联合参数模型	0.983 (0.957~1.000)	92.0	98.1

4. 讨论

4.1. 肝功能不同对 Gd-EOB-DTPA 增强前后肝脏信号的影响

本研究分析正常组、Child-Pugh A 级组和 Child-Pugh B + C 级组后发现，三组间 SIR 肝前、SIR 肝后及 RE 肝差异均有统计学意义；两两比较显示正常组与 Child-Pugh A 级组间差异均无统计学意义，而 Child-Pugh B + C 级组的 SIR 肝后及 RE 肝均显著低于其余两组，这一发现与 Zhu 等[10]的研究大致相同。值得注意的是，正常组与 Child-Pugh A 级组间各肝脏参数差异均无统计学意义，提示基于信号强度的参数对早期(代偿期)肝功能变化的敏感性有限，这与既往研究中信号强度参数区分效能主要体现在失代偿阶段的报道相符。Wang 等[11]比较了基于信号强度、T1 弛豫定量及动态增强的三类 Gd-EOB-DTPA 增强 MRI 参数，发现基于信号强度的简单参数(如肝－肌信号比)评估肝功能的效能与复杂参数相当，其区分肝硬化与健康肝脏的 AUC 大于 0.90，为本研究采用竖脊肌标准化信号比提供了方法学依据。具体而言，增强前肝脏信号强度比(SIR 肝前)逐渐降低，这一现象与肝脏组织的病理学改变密切相关。随着疾病发展，正常的肝实质逐渐被纤维化组织和再生结节所替代[12] [13]，而纤维组织增生及再生结节内含铁(siderotic)结节的形成与比例增加均可导致肝实质信号减低[14]。同时，SIR 肝后也呈现出降低的趋势，随着肝功能损伤的加重，肝细胞膜上的有机阴离子转运多肽(OATP)功能下降，肝细胞对 Gd-EOB-DTPA 的摄取能力下降，加之纤维组织无法摄取 Gd-EOB-DTPA [15] [16]，最终导致 SIR 肝后下降。此外，RE 肝值随肝硬化程度的加重逐渐降低，其原因在于随着肝硬化程度的加重，SIR 肝前逐渐降低，而肝组织对 Gd-EOB-DTPA 摄取及排泄能力下降，导致 SIR 肝后增加幅度减小。

4.2. 肝功能损伤对肾皮质的影响

研究结果显示，Child-Pugh B + C 级组的 SIR 肾皮前高于 Child-Pugh A 级组及正常组，而正常组与 Child-Pugh A 级组间差异无统计学意义。这一现象可能与以下因素有关，首先肝功能损伤可导致胆红素及锰等顺磁性物质的代谢与排泄障碍[17]，此类物质在体内蓄积并沉积于肾皮质后可缩短组织 T1 弛豫时间，从而导致 T1WI 信号强度增高；其次，肝功能损伤可能引发全身血流动力学改变，导致肾脏血流灌注不足[18]，进而引起 T1WI 信号强度增高。此外，在缺血状态下，肾脏组织的代谢产物堆积明显，也可能进一步引起肾皮质 T1WI 信号的增高。

RE 肾皮在三组间差异无统计学意义。理论上，Gd-EOB-DTPA 主要通过肝脏和肾脏两条路径进行排泄，当肝功能受损时，肝脏对 Gd-EOB-DTPA 的摄取及排泄能力减弱，肾脏理应代偿并增加对比剂的排泄[15] [19]。然而本研究未观察到 RE 肾皮的组间差异，说明在观察时间点(肝胆期)上对比剂经肾脏排泄并无明显增加。推测单位时间内肾脏排泄 Gd-EOB-DTPA 的能力可能存在一定上限，尽管肝功能受损时肾脏排泄量或略有增加，但总体上可能已接近其代偿能力上限。肝功能损伤可导致 Gd-EOB-DTPA 血浆清除率下降、终末半衰期延长[20]，血池内滞留的对比剂可能主要通过延长肝脏和肾脏的排泄时间予以清除。未来可通过延长扫描时间并增加扫描时相，进一步观察并验证这一推测。值得注意的是，本研究以竖脊肌标准化后 SIR 肾皮后的组间差异无统计学意义(P = 0.075)，而额外基于信号强度绝对值的分析显示增强后肾皮质信号存在组间差异，这可能提示基于 SI 绝对值的研究结果可能在一定程度上受到个体间信号基线及扫描系统性误差的影响。Öcal 等[21]的多中心、多厂商研究亦发现，肝胆期肝脏强化程度虽与肝功能指标相关，但其绝对值在不同品牌扫描设备间存在显著差异，这进一步支持采用内部参照进行信号标准化的必要性。

4.3. 肝功能不同对肾髓质的影响

SIR 肾髓前在 Child-Pugh B + C 级组显著高于 Child-Pugh A 级组及正常组，与肾皮质的改变趋势一致但程度相对较轻，推测这一现象可能与肾髓质的结构特点有关。首先，肝功能损伤导致的胆红素及锰、铜等顺磁性物质代谢障碍，这些物质也会在肾髓质中沉积，但沉积量较皮质少，因此仅轻微缩短组织的 T1 弛豫时间；其次，肾髓质的血流量仅占肾脏总血流量的 5%~10% [22]，受肝功能异常引起的肾灌注改变的影响相对较小。

三组间 RE 肾髓的差异不存在统计学意义，其原因可能与 RE 肾皮的机制相似。经竖脊肌标准化后，SIR 肾髓后在三组间差异亦无统计学意义(P = 0.387)，提示基于 SI 绝对值观察到的增强后肾髓质信号组间差异主要来源于增强前基线信号的差别，而非对比剂经肾髓质排泄的实质性改变。此外，肝功能异常可能继发的电解质紊乱(如低镁血症、代谢性碱中毒)是否延长对比剂在体内的滞留时间并影响肾髓质信号，仍有待进一步研究证实。

4.4. 肝功能不同对脾脏的影响

研究结果显示，SIR 脾前三组间差异有统计学意义(P = 0.015)，Child-Pugh B + C 级组高于正常组(P = 0.020)。从病理生理机制来看，肝硬化导致的门脉高压会引起脾脏淤血、血窦扩张及组织增生[23] [24]，理论上自由水的增加会使组织 T1WI 信号降低；然而脾脏内红细胞淤积产生的脱氧血红蛋白具有缩短效应，可能部分抵消自由水对信号的降低作用。本研究中 SIR 脾前在 Child-Pugh B + C 级组相对升高，提示在肝功能失代偿阶段 T1 缩短效应可能占据主导，但该结果的具体机制仍需结合脾脏血流动力学、组织病理学及定量磁共振参数进一步验证。

与正常组及 Child-Pugh A 级组相比，Child-Pugh B + C 级组的 SIR 脾后显著升高，差异具有统计学意义。尽管脾脏是一个富血供器官，但由于 Gd-EOB-DTPA 的主动摄取依赖肝细胞膜窦面的有机阴离子转运多肽(OATP1B1/B3)，脾脏无法主动摄取 Gd-EOB-DTPA [25]，因此脾脏的强化主要反映血池的量和浓度。随着肝功能损伤的加重，肝脏对 Gd-EOB-DTPA 的摄取率下降，导致循环系统中滞留的对比剂增加；此外，肝硬化引起的门脉高压会导致脾脏淤血，脾血窦及组织间隙扩张，进一步扩大了对比剂的分布容积。两者共同作用，导致 Child-Pugh B + C 级患者 SIR 脾后升高。

RE 脾在三组间无统计学差异，这可能与 SI 脾前信号的组间差异有关。值得注意的是，部分病例增强后脾脏信号强度较低，回顾其图像发现脾脏存在散在含铁血黄素沉积，推测铁沉积可能对增强后的脾

脏信号产生更明显的影响，从而影响本研究的结果，计划在未来的研究中进一步收集此类病例以进行更深入的观察。

4.5. 肝功能不同对门静脉的影响

本研究结果显示 SIR 门前、SIR 门后及 RE 门各参数三组间均无统计学差异，这一结果与 Yang 等[4]的研究结论一致，其研究亦发现门静脉 SI 及门静脉－脾脏对比率在正常组、Child-Pugh A、B、C 级各组间均无显著差异，不能直接反映肝功能变化。门静脉信号难以反映肝功能的原因可能在于，门静脉主干血流较为复杂且存在显著的个体差异，其信号受到门静脉高压程度、侧枝循环是否形成及侧枝循环类型等多种因素的影响。

4.6. 肝功能不同对竖脊肌的影响

本研究结果显示 SI 竖前、SI 竖后及 RE 竖各参数三组间均无统计学差异，这一现象可能主要与竖脊肌的乏血供特性有关。竖脊肌的血管密度显著低于实质性脏器组织，且其致密的肌纤维结构导致细胞外间隙较少，单位体积组织内对比剂分布有限，两方面因素共同作用显著减弱了信号变化的幅度。由于竖脊肌信号受肝功能影响较小，提示其适合作为内部参考组织进行信号标准化处理，本研究即采用竖脊肌对各器官信号进行了标准化。但需指出的是，Matoori 等[26]发现竖脊肌自身的强化程度与患者年龄呈正相关，且经竖脊肌标准化的肝脏强化程度与年龄呈负相关，提示年龄可能混淆基于内参照的定量评估结果。本研究中正常组与 Child-Pugh B + C 级组间年龄差异存在统计学意义，因此在解读 SIR 参数的组间差异时仍需谨慎，未来研究应采用年龄匹配更严格的对照设计加以验证。

4.7. 多器官参数联合模型对 Child-Pugh B + C 级的预测效能

本研究 ROC 分析显示，单参数中以 SIR 肝后的预测效能最高(AUC = 0.948)，肝脏参数模型与肝外参数模型的 AUC 分别为 0.950 和 0.864，而联合参数模型的 AUC 进一步提高至 0.983，特异度达 98.1%，且显著优于肝外参数模型(P = 0.003)。这提示肝外器官(肾皮质、肾髓质及脾脏)信号参数虽单独预测效能不及肝脏参数，但其反映了肝功能受损后对比剂的体内再分布特征，可为肝脏参数提供增量诊断信息，多器官联合分析有助于更全面地评估肝功能状态。Wang 等[11]的研究亦表明，基于信号强度的简单参数即可获得与复杂定量参数相当的肝功能评估效能，为本研究基于 SIR 的多器官联合策略提供了支持。但联合模型与肝脏参数模型间 AUC 差异尚无统计学意义(P = 0.177)，可能与样本量有限有关，需更大样本量研究进一步验证联合模型的增量价值。

4.8. 局限性

本研究存在以下局限性：① 单中心回顾性研究，样本量有限，未进行外部验证，其中 Child-Pugh C 级仅 8 例，故将 B 级与 C 级合并分析，可能掩盖两级间的差异，且联合模型的效能可能存在高估，有待多中心、大样本前瞻性研究验证；② 正常组与 Child-Pugh B + C 级组间年龄差异有统计学意义，年龄因素可能对基于内参照的定量评估结果产生一定混杂；③ 未与吲哚菁绿清除试验、终末期肝病模型(MELD)评分等其他肝功能评估方法进行对照；④ ROC 分析基于同一数据集完成模型构建与评价。

5. 结论

本研究基于 Gd-EOB-DTPA 增强 MRI 多器官信号参数，经竖脊肌标准化后系统揭示了不同肝功能分级下各器官信号的变化规律。研究结果表明，肝功能受损时，增强前肾皮质、肾髓质 SIR 及肝胆期脾脏 SIR 均发生改变。肝胆期肝脏 SIR 降低提示肝细胞对 Gd-EOB-DTPA 的摄取能力减弱，可能导致对比剂

在血池中滞留增加，并参与肝胆期脾脏信号升高；而增强前肾脏信号改变的具体机制仍有待进一步研究；门静脉信号因受复杂血流动力学因素及个体差异的影响未显示出明显变化；竖脊肌因其乏血供特性及致密肌纤维结构信号保持稳定，可作为可靠的内部参考组织。肝脏参数、肝外参数及两者联合模型预测 Child-Pugh B + C 级的 AUC 分别为 0.950、0.864 和 0.983，因此多器官参数联合分析可为临床全面评估肝功能状态提供新的影像学依据。

声　明

本研究经医院医学伦理委员会审查批准，伦理审批号为审-PJ-科-2025-178。

基金项目

本研究受昆明医科大学第二附属医院临床研究项目资助(项目编号：ynIIT2023013)和昆明医科大学研究生创新基金(项目编号：2025S094)资助。

参考文献

[1] Ma, B., Xu, H., Wu, X., Zhu, W., Han, X., Jiang, J., *et al*. (2023) Evaluation of Liver Function Using Gd-EOB-DTPA-Enhanced MRI with T1 Mapping. *BMC Medical Imaging*, **23**, Article No. 73. https://doi.org/10.1186/s12880-023-01028-z

[2] Hiraoka, A., Kumada, T., Michitaka, K. and Kudo, M. (2018) Newly Proposed ALBI Grade and ALBI-T Score as Tools for Assessment of Hepatic Function and Prognosis in Hepatocellular Carcinoma Patients. *Liver Cancer*, **8**, 312-325. https://doi.org/10.1159/000494844

[3] Noda, Y., Goshima, S., Kajita, K., Kawada, H., Kawai, N., Koyasu, H., *et al*. (2016) Biliary Tract Enhancement in Gadoxetic Acid-Enhanced MRI Correlates with Liver Function Biomarkers. *European Journal of Radiology*, **85**, 2001-2007. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2016.09.003

[4] Yang, M., Zhang, Y., Zhao, W., Cheng, W., Wang, H. and Guo, S. (2020) Evaluation of Liver Function Using Liver Parenchyma, Spleen and Portal Vein Signal Intensities during the Hepatobiliary Phase in Gd-EOB-DTPA-Enhanced MRI. *BMC Medical Imaging*, **20**, Article No. 119. https://doi.org/10.1186/s12880-020-00519-7

[5] Yoon, J.H., Lee, J.M., Kang, H., Ahn, S.J., Yang, H., Kim, E., *et al*. (2019) Quantitative Assessment of Liver Function by Using Gadoxetic Acid-Enhanced MRI: Hepatocyte Uptake Ratio. *Radiology*, **290**, 125-133. https://doi.org/10.1148/radiol.2018180753

[6] Kumar, R., Priyadarshi, R.N. and Anand, U. (2021) Chronic Renal Dysfunction in Cirrhosis: A New Frontier in Hepatology. *World Journal of Gastroenterology*, **27**, 990-1005. https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i11.990

[7] Zhang, W., Sun, H., Zhang, W. and Feng, R. (2023) Effect of Type 2 Diabetes on Liver Images of Gd-EOB-DTPA-Enhanced MRI during the Hepatobiliary Phase. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 543. https://doi.org/10.1038/s41598-023-27730-0

[8] Nishie, A., Ushijima, Y., Tajima, T., Asayama, Y., Ishigami, K., Kakihara, D., *et al*. (2012) Quantitative Analysis of Liver Function Using Superparamagnetic Iron Oxide- and Gd-EOB-DTPA-Enhanced MRI: Comparison with Technetium-99m Galactosyl Serum Albumin Scintigraphy. *European Journal of Radiology*, **81**, 1100-1104. https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2011.02.053

[9] Yoshida, H., Shimizu, T., Yoshioka, M., Matsushita, A., Kawano, Y., Ueda, J., *et al*. (2023) The Role of the Spleen in Portal Hypertension. *Journal of Nippon Medical School*, **90**, 20-25. https://doi.org/10.1272/jnms.jnms.2023_90-104

[10] Zhu, X., Zhang, Y. and Guo, L. (2024) Gd-EOB-DTPA-Enhanced MRI Image Characteristics and Radiomics Characteristics Combined with Machine Learning for Assessment of Functional Liver Reserve. *Current Medical Imaging Formerly Current Medical Imaging Reviews*, **20**, e15734056281405. https://doi.org/10.2174/0115734056281405240104155500

[11] Wang, Q., Kesen, S., Liljeroth, M., Nilsson, H., Zhao, Y., Sparrelid, E., *et al*. (2022) Quantitative Evaluation of Liver Function with Gadoxetic Acid Enhanced MRI: Comparison among Signal Intensity-, T1-Relaxometry-, and Dynamic-Hepatocyte-Specific-Contrast-Enhanced MRI-Derived Parameters. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, **57**, 705-712. https://doi.org/10.1080/00365521.2022.2032321

[12] Wagner, W.L., Föhst, S., Hock, J., Kim, Y.O., Popov, Y., Schuppan, D., *et al*. (2021) 3D Analysis of Microvasculature in Murine Liver Fibrosis Models Using Synchrotron Radiation-Based Microtomography. *Angiogenesis*, **24**, 57-65.

https://doi.org/10.1007/s10456-020-09751-9

[13] Juanola, A., Pose, E. and Ginès, P. (2025) Liver Cirrhosis: Ancient Disease, New Challenge. *Medicina Clínica* (*English Edition*), **164**, 238-246. https://doi.org/10.1016/j.medcle.2024.11.004

[14] Zhang, J. and Krinsky, G.A. (2004) Iron-Containing Nodules of Cirrhosis. *NMR in Biomedicine*, **17**, 459-464. https://doi.org/10.1002/nbm.926

[15] Li, T., An, J., Xu, J. and Tuo, B. (2019) Overview of Organic Anion Transporters and Organic Anion Transporter Polypeptides and Their Roles in the Liver. *World Journal of Clinical Cases*, **7**, 3915-3933. https://doi.org/10.12998/wjcc.v7.i23.3915

[16] Drozdzik, M., Szelag-Pieniek, S., Post, M., Zeair, S., Wrzesinski, M., Kurzawski, M., *et al*. (2020) Protein Abundance of Hepatic Drug Transporters in Patients with Different Forms of Liver Damage. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, **107**, 1138-1148. https://doi.org/10.1002/cpt.1717

[17] Rovira, A., Alonso, J. and Córdoba, J. (2008) MR Imaging Findings in Hepatic Encephalopathy. *American Journal of Neuroradiology*, **29**, 1612-1621. https://doi.org/10.3174/ajnr.a1139

[18] Ginès, P. and Schrier, R.W. (2009) Renal Failure in Cirrhosis. *New England Journal of Medicine*, **361**, 1279-1290. https://doi.org/10.1056/nejmra0809139

[19] Yuan, X., Wang, S., Shi, W., Cai, Y., Chen, Y., Chen, M., *et al*. (2020) Dual Plasma Sampling Method to Determine the Hepatic and Renal Clearance of the 2 Diastereoisomers of Gd-EOB-DTPA. *Investigative Radiology*, **55**, 168-173. https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000622

[20] Gschwend, S., Ebert, W., Schultze-Mosgau, M. and Breuer, J. (2011) Pharmacokinetics and Imaging Properties of Gd-EOB-DTPA in Patients with Hepatic and Renal Impairment. *Investigative Radiology*, **46**, 556-566. https://doi.org/10.1097/rli.0b013e31821a218a

[21] Öcal, O., Peynircioglu, B., Loewe, C., van Delden, O., Vandecaveye, V., Gebauer, B., *et al*. (2022) Correlation of Liver Enhancement in Gadoxetic Acid-Enhanced MRI with Liver Functions: A Multicenter-Multivendor Analysis of Hepatocellular Carcinoma Patients from SORAMIC Trial. *European Radiology*, **32**, 1320-1329. https://doi.org/10.1007/s00330-021-08218-9

[22] Cowley, A.W. (1997) Role of the Renal Medulla in Volume and Arterial Pressure Regulation. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, **273**, R1-R15. https://doi.org/10.1152/ajpregu.1997.273.1.r1

[23] Reincke, M., Thimme, R. and Schultheiß, M. (2023) Komplikationen Der Leberzirrhose. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, **148**, 1371-1382. https://doi.org/10.1055/a-2001-4236

[24] Bolognesi, M., Merkel, C., Sacerdoti, D., Nava, V. and Gatta, A. (2002) Role of Spleen Enlargement in Cirrhosis with Portal Hypertension. *Digestive and Liver Disease*, **34**, 144-150. https://doi.org/10.1016/s1590-8658(02)80246-8

[25] Van Beers, B.E., Pastor, C.M. and Hussain, H.K. (2012) Primovist, Eovist: What to Expect? *Journal of Hepatology*, **57**, 421-429. https://doi.org/10.1016/j.jhep.2012.01.031

[26] Matoori, S., Froehlich, J.M., Breitenstein, S., Doert, A., Pozdniakova, V., Koh, D., *et al*. (2016) Age Dependence of Spleen- and Muscle-Corrected Hepatic Signal Enhancement on Hepatobiliary Phase Gadoxetate MRI. *European Radiology*, **26**, 1889-1894. https://doi.org/10.1007/s00330-015-3965-z