・实验研究・

体素内不相干运动(IVIM)和血氧水平依赖(BOLD)评估兔肝 热缺血再灌注损伤:与CT灌注成像(CTPI)对照研究

张钰玲,徐璐,蒋嘉炳,褚志强,李蓓,季倩

【摘要】目的:探讨体素内不相干运动(IVIM)和血氧水平依赖(BOLD)反映兔肝热缺血再灌注损伤(WIRI)时微循环变化的敏感性及准确性。方法:30只新西兰健康成年雄兔随机分为GO组(对照组)、G1组和G2组(热缺血时间分别为40min、60min),行IVIM、BOLD和CTPI检查。取静脉血和冻存肝组织检测实验室指标,新鲜肝组织行病理学检查。采用单因素方差分析、相关分析和受试者工作特性曲线(ROC)进行统计学分析。结果:多组间各参数差异均有统计学意义(P<0.05);且随着热缺血时间延长,灌注相关扩散系数(Dfast)、灌注分数(PF)降低,表观自旋-自旋弛豫率(R2*)、肝动脉灌注指数(PI)升高,肝动脉灌注量(HAP)、肝门静脉灌注量(HPP)先升高再降低。相关性分析显示Dfast与PI,PF与PI、HAP均呈负相关(P均<0.05);Dfast、PF、R2*、HAP、PI均与谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)相关(P<0.05)。评价有无WIRI以及WIRI程度时,IVIM的诊断效能均高于BOLD,且与CTPI无统计学差异(P>0.05)。结论:IVIM 无电离辐射、无需对比剂即可较好地反映肝WIRI时组织微循环变化情况。

【关键词】 兔; 肝; 热缺血; 再灌注损伤; 体层摄影术,X 线计算机 【中图分类号】R322.47; R619.9; R364.1; R814.4; R-332 【文献标志码】A 【文章编号】1000-0313(2022)06-0698-06 DOI:10.13609/j.cnki,1000-0313.2022.06.005 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

IVIM and BOLD in the assessment of warm hepatic ischemia reperfusion injury in rabbits: comparison with CTPI ZHANG Yu-ling, XU Lu, CHU Zhi-qiang, et al. First Central Clinical College, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China

(Abstract) Objective: To investigate the sensitivity and accuracy of intravoxel incoherent motion (IVIM) and blood oxygen level dependence (BOLD) in reflecting microcirculation changes in rabbits with hepatic ischemia reperfusion injury (WIRI), and to compare the diagnostic performance with CT perfusion imaging (CTPI). Methods: Thirty healthy adult New Zealand male rabbits were randomly divided into group G0 (control group), group G1 and G2 (the times of warm ischemia were 40mins and 60mins, respectively). IVIM, BOLD and CTPI examination were performed respectively. Statistical analyses were evaluated by one-way analysis of variance (ANOVA), correlation analysis and the receiver operating characteristic (ROC) curve. **Results**: There were statistically significant differences in the parameters among all groups (all $P \le 0.05$). Pseudodiffusion (Dfast) and perfusion fraction (PF) decreased, while apparent relaxation rate (R2 *) and perfusion index (PI) increased, hepatic arterial perfusion (HAP) and hepatic portal perfusion (HPP) increased and then decreased with the prolonged warm ischemia times.Correlation analysis showed that PF was negatively correlated with PI or HAP as well as Dfast and PI (all P<0.05); Dfast, PF, R2 *, HAP, PI were correlated with alanine aminotransferase (ALT) or aspartate aminotransferase (AST) (all $P \le 0.05$). The diagnostic performance of IVIM was higher than that of BOLD when evaluating the presence and the degree of WIRI, and there was no difference between IVIM and CTPI (P > 0.05). Conclusion: Compared with CTPI, IVIM can reflect the changes of microcirculation during WIRI without ionizing radiation and contrast agent.

作者单位:300070 天津,天津医科大学一中心临床学院(张钰玲、徐璐、蒋嘉炳、李蓓);300192 天津,天津市第一中心医院移 植科(褚志强);300192 天津,天津市第一中心医院放射科(季倩)

作者简介:张钰玲(1996一),女,河南人,硕士研究生,主要从事腹部影像学诊断工作。

通讯作者:季倩, E-mail: jiqianq@aliyun.com

基金项目:国家自然科学基金(81301197);天津市卫健委攻关课题(16KG109);江苏省博士后基金(1601125B)

肝脏热缺血再灌注损伤(warm ischemia reperfusion injury,WIRI)是指肝脏的血液供应出现阻碍时, 组织代谢供需失衡导致缺氧,当血供重新建立、氧气恢 复后,反而引起严重炎症反应和继发性损伤的现 象^[1,2]。在肝移植、肝部分切除术等外科手术中都可 能会出现不同程度的WIRI,其不仅影响术后肝再生, 还可能诱发严重的术后并发症,如肝功能甚至多器官 系统功能衰竭,与患者预后密切相关^[3]。因此,早期、 准确判断WIRI的存在及其程度具有重要意义。

肝脏活检因其侵袭性、不利于持续监测等原因不 能成为常规检查方法,而影像学技术在无创评估肝缺 血再灌注损伤方面的优势显著。CT 灌注成像(CT perfusion imaging,CTPI)已被证明能够无创定性定量 评估肝脏血流灌注情况[4],并且可以区分梗死区与非 梗死区^[5];但 CTPI 存在辐射暴露,且外源性对比剂存 在肾毒性,其应用受到限制。MRI无辐射,具有良好 的应用前景,其中体素内不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)通过分析多b值反映信号衰减, 将微循环灌注与纯水分子扩散区分开,从而反映组织 中单纯水分子的扩散或灌注状态[6]。褚志强等[7]证实 了 IVIM 评估不同程度 WIRI 的可行性及诊断价值。 血氧水平依赖((blood oxygen level dependent, BOLD)技术利用自身脱氧血红蛋白作为内源性对比 来反映血氧、血流量和血容量的变化^[8]。Jiang 等^[9]发 现表观自旋-自旋弛豫率(R2*)有助于表征兔肝 WI-RI的早期变化和确定其严重程度。但目前关于 IVIM、BOLD 和 CTPI 的对照研究未见报道。因此, 本研究拟通过应用 IVIM 和 BOLD 评估肝 WIRI 的微 循环和血流动力学改变情况,并与 CTPI 进行比较,以 评价其诊断价值。

材料与方法

1. 实验对象及动物模型的建立

本研究经院伦理委员会批准,并按照机构指南进行。选取成年雄性新西兰大白兔 30 只,体重 2.5~ 3.0 kg,实验前禁食 12 h,禁水 4 h。据热缺血时间 (40 min、60 min)不同,随机分为实验组(G1 组、G2 组)和对照组(G0 组),每组 10 只。称重后以 5%水合 氯醛(2 mL/kg)静脉注射及腹腔浸润联合麻醉,麻醉 后腹部脱毛、剖腹。实验组分别夹闭肝右叶的肝动脉 及门静脉血流 40 min、60 min 后,去掉血管夹,关闭腹 腔,恢复灌注,6 h 后行 IVIM、BOLD 及 CTPI 检查。 对照组仅行剖腹手术和肝韧带剥离术而不阻断血流。

2. MR 序列及参数

采用 3T MR (Magnetom Trio Tim, Siemens Healthcare,Germany)扫描仪对实验兔进行扫描,实 验前用陆眠灵(0.2 mL/kg)肌肉注射麻醉,仰卧放置 于 32 通道体部相控阵线圈中心,再用腹带及沙包辅助 以减少呼吸运动。①常规扫描:轴面 T₁ 加权采用自 旋回波(SE)序列,轴面 T。加权采用快速自旋回波 (FSE)序列。②IVIM 采用单次激发回波平面成像 (SS-EPI) 序列进行扫描,参数 TR/TE 1000 ms/ 57.2 ms,体素 1.9 mm×1.9 mm×4.0 mm, FOV 180 mm×180 mm,带宽 1184,层数 9,层厚 4 mm,矩 阵 128×128,NEX 3。取 11 个 b 值(0,20,40,60,80, 100,150,200,400,600,800 s/mm²),总检查时间为 2 min。③BOLD 应用梯度回波(GRE)序列,成像参数 TR 75 ms, TE 2.57~24.25 ms (9 个回波), 翻转角 30°,体素 2.0 mm×1.6 mm×4.0 mm, FOV 300 mm× 225 mm,矩阵 192×154,层数 18,层厚 4 mm,总检查 时间为1min16s。

3. CTPI 参数

MR检查后,采用 640 层 CT (Toshiba Aquillion One,Japan)扫描仪进行扫描,扫描前以 0.2 mL/kg 的 剂量肌肉注射陆眠灵行麻醉处理。仰卧位放置,并用 腹带及沙包辅助降低呼吸运动影响,将耳缘静脉处放 置的 26G 留置针与高压注射器连接,先进行常规平扫 (管电压 80 kV,管电流 50 mAs,扫描野 220 mm,层厚 5 mm),再用电影模式对全肝行轴面动态扫描(管电压 80 kV,管电流 75 mAs,扫描野 220 mm,层厚 0.5 mm)。延迟 3 s 后经高压注射器注入碘普罗胺(碘 浓度 370 mg/mL,1 mL/kg,0.5 mL/s),打药结束后用 10 mL 生理盐水冲洗,总扫描时间 70 s。

4. 图像后处理

①将 IVIM 的多 b 值数据发送至 Siemens Post Proc. Evaluation 软件,自动获取灌注相关扩散系数 (Dfast)和灌注分数(PF)图像。②BOLD 经 Image J 软件(NIH,Bethesda,MD,USA)处理后自动生成有 效横向弛豫(T₂*)伪彩图,记录相应图像上的 T₂*值, 取平均值,表观自旋-自旋弛豫率(R2*)值由公式 R2 *=1/T₂*值计算获得。③将 CTPI 图像传至 Toshiba Vitrea 工作站,自动生成肝动脉灌注量(hepatic arterial perfusion,HAP)、肝门静脉灌注量(hepatic portal perfusion,HAP)、肝门静脉灌注量(hepatic portal perfusion,HAP)、肝门静脉灌注量(hepatic portal perfusion,HAP)、肝门静脉灌注量(hepatic portal perfusion,HAP)、肝门静脉灌注量(hepatic portal perfusion,HAP)、肝门静脉灌注指数(perfusion index,PI)图像,其中 PI 由公式 PI = HAP/(HAP + HPP)计算获得。④数据测量时肝实质内感兴趣区 (region of interest,ROI)的选取(图 1):在肝右后叶勾 画圆形或椭圆形ROI,选取时尽量避开靠近边缘或有



图 1 ROI 放置示意图。a) T_2 WI 横断面; b) IVIM 序列 b=0 时横断面。

1. 对照组与实验组间各参数

果

结

多组间 Dfast、PF、R2 *、 HAP、HPP、PI 差异均有统计学意 义(P 均<0.05,表 1);且随着热 缺血时间延长,Dfast 和 PF 降低, R2 *、PI 升高,HAP、HPP 先升 高再减低(表 2,图 2)。

表 2 IVIM、BOLD、CTPI参数的相关性分析

大血管的区域,尽量相同位置,且大小相近。选取肝实 质中间连续的3个层面,每个层面勾画3个ROI,取9 个ROI的平均值。

5. 实验室检查

扫描后,采集实验兔静脉血。利用全自动生化分 析仪(东芝,型号 TAB-40F2)检测血清谷草转氨酶 (aspartate aminotransferase,AST)、谷丙转氨酶(alanine aminotransferase,ALT)及乳酸脱氢酶(lactate dehydrogenase,LDH)含量,用于评价肝功能。随后以 空气栓塞法处死实验兔,取新鲜肝组织冻存。利用分 光光度仪检测冻存肝组织丙二醛(malondialdehyde, MDA)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和髓过氧化物酶(myeloperoxidase,MPO)水平。 将新鲜肝组织去除包膜后切成1 cm³ 小块,用10%甲 醛固定,石蜡包埋,制成切片,用苏木素-伊红(HE)法 进行染色,置于光学显微镜下观察。

6. 统计分析

采用 SPSS 26.0(美国)、MedCalc 19.8(比利时)进 行数据分析。对所有数据进行正态性检验,符合正态 分布数据采用平均值±标准差($\overline{x}\pm s$)表示。采用单 因素方差分析(ANOVA)评价组内及组间 IVIM、 BOLD和 CTPI参数之间是否有统计学差异。采用 Pearson或 Spearman 相关分析评价 IVIM、BOLD 与 CTPI参数的相关性以及各参数与实验室指标的相关 性。应用受试者工作特性曲线(ROC)评价其诊断效 能。P < 0.05 为差异有统计学意义。

参数	HAP (mg/min • 100mg)	HPP (mg/min • 100mg)	PI	
	(hig/him loonig/	(ing/ initial 100 ing/	(70)	
Dfast ($\times 10^{-3}$ mm ² /s)				
r	-0.322	-0.080	-0.421^{\triangle}	
P	0.102	0.693	0.029	
PF (%)				
r	-0.398	-0.053	-0.526^{\triangle}	
P	0.040	0.791	0.005	
R2 * (Hz)				
r	-0.069	-0.216	0.148	
Р	0.736	0.289	0.471	

注: $^{\triangle} P$ <0.05。Dfast: 灌注相关扩散系数; PF:灌注分数; R2 *: 表观自旋-自旋弛豫率; HAF 肝动脉灌注量; HPP: 肝门静脉灌注量; PI: 肝动脉灌注指数。

两两比较显示, Dfast、PF、HAP、PI:G0 组与 G1 组,G0 组与 G2 组间差异均具有统计学意义(P 均< 0.05)。R2 *:G0 组与 G2 组间的差异性显著(P < 0.05)。HPP:G0 组与 G1 组,G1 组与 G2 组间差异均 具有统计学意义(P < 0.05,图 2)。

2. IVIM、BOLD与CTPI各参数相关性分析

相关性分析显示, Dfast 与 PI 呈负相关, PF 与 PI、HAP 呈负相关(P < 0.05)。R2 * 与 CTPI 各参数 之间均无相关性(P > 0.05)。

3. IVIM、BOLD、CTPI参数与生化指标之间的相 关性分析

Dfast、PF 均与 ALT、AST 呈负相关,与 SOD 呈 正相关;Dfast 与 LDH 呈负相关(P < 0.05)。R2 * 与 ALT、AST 呈正相关(P < 0.05)。HAP、PI 与 ALT、 AST、SOD 呈正相关,HAP 与 LDH 呈正相关,PI 与 MDA 呈正相关(P < 0.05),见表 3。其余各参数间均 无相关性(P > 0.05)。

表1 对照组与实验组间各参数汇总

参数	G0 组	G1 组	G2 组	F	Р
$Dfast(\times 10^{-3} mm^2/s)$	31.83 ± 2.50	26.00 ± 1.70	24.11 ± 1.96	35.508	0.000*
PF(%)	25.90 ± 1.50	21.85 ± 4.61	20.54 ± 2.82	7.834	0.003*
R2 * (Hz)	96.60 ± 14.35	109.80 ± 16.52	120.93 ± 22.65	6.347	0.040*
HAP(mg/min • 100mg)	44.47 ± 9.26	79.71 ± 27.93	65.27 ± 8.48	9.037	0.001*
HPP(mg/min • 100mg)	115.90 ± 11.60	144.53 ± 27.12	113.73 ± 7.80	8.573	0.002*
PI (%)	27.68 ± 5.17	35.68 ± 4.66	36.50 ± 5.05	8.664	0.001*

注: * P<0.05; Dfast: 灌注相关扩散系数; PF: 灌注分数; R2 *: 表观自旋-自旋弛豫率; HAF: 肝动脉灌注量; HPP: 肝门静脉灌注量; PI: 肝动脉 灌注指数。



图 2 $a \sim f$ 分别为参数 Dfast、PF、R2 *、HAP、HPP、PI 的 G0、G1、G2 组间比较小提琴图。* P < 0.05,** P < 0.001。随着缺血时间延长,Dfast 和 PF 降低, R2 *、PI 升高, HAP、HPP 先升高再减低。



图 3 各参数 ROC 曲线分析。a) IVIM、BOLD、CTPI 诊断 WIRI 的 ROC 曲线分析;b) IVIM、BOLD、CTPI 诊断 WIRI 程度的 ROC 曲线分析。

4. IVIM、BOLD 与 CTPI 诊断效能的比较

评价有无 WIRI 时, IVIM、BOLD、CTPI 的 AUC 分别为 0.989、0.757、0.951, 其中 IVIM 与 CTPI 间差 异无统计学意义(P > 0.05), 且 IVIM 的诊断效能最 高。评价 肝 WIRI 程度时, IVIM、BOLD、CTPI 的 AUC 分别为 0.778、0.654、0.963, 其中 IVIM 与 CTPI 间差异无统计学意义(P > 0.05), 且 IVIM 的诊断效能 高于 BOLD(表 4、5、图 3)。

讨 论

肝 WIRI 是一个多细胞、多因 子、多介质共同参与的动态过程, 涉及一系列肝脏微环境的改变,对 肝脏手术患者术后恢复意义重大。 CTPI 和 MRI 反映肝脏血流灌注 各有优缺点。CTPI 能够动态监 测肝 WIRI 后肝脏血流动力学变 化^[5,10],但其固有的对比剂和电离 辐射问题始终不可忽视。近年来,

多参数 MRI^[11]逐渐用于评估 WIRI。Yang 等^[12]发现 MRI 可以反映发生肝 WIRI 时的病理生理变化过程 及微循环、灌注的改变。但目前关于 IVIM、BOLD 和 CTPI 的对照研究未见报道。本研究首次对比 IVIM、 BOLD 及 CTPI 评价不同程度(40 min,60 min)肝 WI-RI 的微循环及血流动力学变化情况,并比较其诊断效 能。本研究结果发现,无论是评价有无肝WIRI还是

参数	ALT (U/L)	AST (U/L)	LDH (mmol/L)	MDA (nmol/ml)	MPO (U/G)	SOD (U/mL)
$Dfast(\times 10^{-3} \mathrm{mm^2/s})$						
r	$-0.634^{\#\#}$	$-0.635^{\#\#}$	-0.509##	-0.263	-0.294	0.722 ##
Р	0.000	0.000	0.008	0.185	0.136	0.000
PF (%)						
r	-0.426 #	-0.437 #	-0.256	-0.307	-0.277	0.490 #
Р	0.027	0.023	0.207	0.119	0.161	0.010
R2 * (Hz)						
r	0.524 #	0.438 #	0.403	0.086	0.404	-0.303
P	0.015	0.047	0.078	0.712	0.069	0.182
HAP(mg/min • 100mg)						
r	0.500 ##	0.581 ##	0.524 ##	0.343	0.181	0.740 ##
Р	0.008	0.001	0.006	0.080	0.366	0.000
HPP(mg/min • 100mg)						
r	0.158	0.242	0.327	-0.071	-0.087	-0.351
Р	0.431	0.224	0.103	0.727	0.667	0.073
PI (%)						
r	0.411#	0.445#	0.330	0.419#	0.314	0.585 ##
Р	0.033	0.020	0.100	0.030	0.110	0.001

表 3 各参数与生化指标的相关性分析

注: # P<0.05, ## P<0.001。ALT:谷丙转氨酶,AST:谷草转氨酶,LDH:乳酸脱氢酶,MDA:丙二醛,MPO:髓过氧化物酶,SOD:超氧化物歧 化酶。

表4 IVIM、BOLD、CTPI诊断有无 WIRI的 ROC 曲线分析

参数	AUC	95%置信区间	Z 值	P 值	敏感性	特异性	约登指数
IVIM	0.989	0.856~1.000	36.283	<0.0001	100.00	90.00	0.9000
BOLD	0.757	$0.570 \sim 0.944$	2.648	0.0081	61.11	87.50	0.4861
CTPI	0.951	$0.792 \sim 0.997$	12.142	<0.0001	83.33	100.00	0.8333
表 5 IVIM、BOLD、CTPI诊断 WIRI 程度的 ROC 曲线分析							
6 JU	1 1 1 0	0=0/11210	a 11-	D //	W 2 11	11 12 11	11 14 11 14

参数	AUC	95%置信区间	Z 值	P 值	敏感性	特异性	约登指数
IVIM	0.778	0.524~0.936	2.466	0.0137	88.89	55.56	0.4444
BOLD	0.654	0.398~0.858	1.115	0.2650	77.80	55.56	0.3333
CTPI	0.963	$0.754 \sim 0.997$	12.500	<0.0001	100.00	77.88	0.7778

判断其程度, IVIM 诊断效能均高于 BOLD, 且 IVIM 与 CTPI 的诊断效能之间均无统计学差异, 提示 IVIM 更适合常规应用于临床, 以无创监测肝 WIRI 的微循 环改变情况。

本研究结果显示对照组与实验组间 IVIM、BOLD 及 CTPI 各参数差异均具有统计学意义,与既往研究 结论^[5+11]一致。组间比较显示实验组的 Dfast 及 PF 值均低于对照组,且随着热缺血时间延长均呈逐渐下 降趋势,原因可能是随着损伤加重,肝细胞水肿、炎症 介质浸润、纤维增生等变化引起肝血窦阻塞,血液输送 受阻,血流量减低,导致 Dfast、PF 值减小。有研究曾 提出 Dfast 值与毛细血管平均血流速度有关^[13],本研 究提示 Dfast 值在一定程度上可以反映 WIRI 时毛细 血管血流的状态。热缺血会引起肝脏局部微环境闭 塞、组织灌注减少,进而导致局部体素的磁敏感性发生 改变,去氧血红蛋白分数增加,R2*值随之增加,从而 很好地表征肝损伤后局部组织的含氧水平。缺氧引起 Kupffer 细胞释放氧自由基、炎症因子,动脉缓冲效应 (HABR)^[14] 被激活,小动脉及小门静脉通透性增加; 且肝窦阻塞使血管阻力增加,腺苷堆积,诱导血管舒 张,HAP、HPP、PI增加;随着WIRI加重,代谢产物堆 积,HABR缓冲能力下降,加之肝内门体分流开放^[5], HPP减少,肝动脉通过血流量的改变缓冲门脉血流下 降,因此HAP无明显下降,PI仍呈增加趋势。

本研究显示 Dfast 与 PI 相关性较低,与 Guo 等^[13]的研究结果一致。Cohen 等^[15]提出使用低 b 值 较少可能会导致对灌注的低估,因此为了提高 PF 与 Dfast 拟合的准确性^[16],本研究采用 8 个 200 s/mm² 以下的 b 值。此外呼吸运动伪影和图像低信噪比可能 也有一定的影响。Dfast 与 PF 均能反映灌注信息,但 强调不同方面:Dfast 与毛细血管流速相关^[13],而 PF 表示的是毛细血管血流占组织血流的容积分数,代表 毛细血管的丰富程度^[17]。研究^[18]表明 PF 与 CTPI 得 到的 血容量具有良好的相关性,本实验中 PF 与 HAP、PI 相关,证实 PF 能够反映毛细血管的灌注量。 血氧水平、铁含量^[19]、血流量和血容量都能影响 R2 * 值,单纯 BOLD 可能并不能很好地区分局部组织氧合 与灌注状态,因此导致本研究中 R2 * 值与 CTPI 各项

参数均无相关性。

肝脏的酶学指标 ALT、AST、LDH 能够提示肝细胞的损伤程度,尤其是 ALT^[20]。过氧化反应产物 MDA 积累会加剧细胞膜的损伤,MPO 在机体炎症反应中发挥作用,SOD 主要参与在机体氧化/抗氧化的平衡调节,可以清除机体多余的氧自由基。再灌注时, 肝组织代谢障碍导致 SOD 合成不足,氧化/抗氧化失衡、氧自由基清除障碍,引发脂质过氧化物反应,导致 MDA 积累,但由于缺氧阶段自由基产生较少,MDA 生成也不会太多。本研究结果显示多个 IVIM、BOLD 及 CTPI 参数 与生化指标具有较好的相关性,提示 IVIM、BOLD 及 CTPI 不仅能敏感地反映肝细胞的损伤程度,还能较好地表征肝功能的变化及组织抗氧化能力,并且也可以提示不同热缺血程度时微循环变化。

本研究存在一些局限性。①每组实验兔数目较 少。②扫描过程中因实验兔无法憋气,可能对实验结 果的测量和图像质量存在一定影响。③能够反映肝血 流灌注信息的 MRI 技术不只 IVIM、BOLD,未来应进 一步探索更多 MRI 序列的应用。④肝 WIRI 本质上 是一个动态过程,具有时间依从性,而本研究仅在特定 时间框架内进行的,有待进一步纵向研究以揭示其演 变过程。

因此,与 CTPI 相比, IVIM 能无创、较好反映肝 WIRI 时肝组织微循环和血流动力学变化情况,有望 临床应用时取代 CTPI。

参考文献:

- [1] Cornide-Petronio ME, Alvarez-Mercado AI, Jimenez-Castro MB, et al. Current knowledge about the effect of nutritional status, supplemented nutrition diet, and gut microbiota on hepatic ischemia-reperfusion and regeneration in liver surgery[J]. Nutrients, 2020,12(2):284.
- [2] Soares ROS, Losada DM, Jordani MC, et al. Ischemia/reperfusion injury revisited: an overview of the latest pharmacological strategies[J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(20): 5034.
- [3] 陶征征,褚志强,蒋嘉炳,等.R2*值评价兔肝热缺血再灌注损伤 调控部分肝切除术后的肝再生[J].中华肝脏病杂志,2021,29 (6):539-544.
- [4] 韩瑞,黄璐,蒋鸿,等.双低剂量 4D-CT 灌注替代常规肝脏四期 CT 成像可行性研究[J].放射学实践,2021,36(10):1238-1242.
- [5] 徐璐,褚志强,于文娟,等.CT 灌注成像评价兔肝不同程度热缺血 再灌注损伤的研究[J].中华器官移植杂志,2018,39(3):164-170.
- [6] 周倩,周纪宇,郭达,等.多模态磁共振成像技术在糖尿病肾病中的 研究进展[J].放射学实践,2021,36(5):676-680.
- [7] 褚志强,季倩,任涛,等.3.0T 体素内不相干运动磁共振成像评价 兔肝热缺血再灌注损伤[J].中华实验外科杂志,2018,35(3):416-419.
- [8] Pruijm M, Milani B, Burnier M. Blood oxygenation level-dependent MRI to assess renal oxygenation in renal diseases: progresses and

challenges[J].Front Physiol,2017,7:667.

- [9] Jiang J.Li J, Chu Z, et al. In vivo multiparametric magnetic resonance imaging study for differentiating the severity of hepatic warm ischemia-reperfusion injury in a rabbit model[J]. Magn Reson Imaging. 2020.74:105-112.
- [10] Sun WJ, Gao ZL, Gao YJ, et al. Quantitative evaluation of early stage blood flow change status after radiofrequency ablation based on multi-slice spiral CT whole-liver perfusion imaging on small hepatocellular carcinoma[J]. Chinese J Hepatology, 2020, 28(6):488-493.
- [11] Ji Q.Chu ZQ, Ren T, et al. Multiparametric functional magnetic resonance imaging for evaluation of hepatic warm ischemiareperfusion injury in a rabbit model [J]. BMC Gastroenterol, 2017,17(1):161.
- [12] Yang J, Meng M, Pan C, et al. Intravoxel incoherent motion and dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging to early detect tissue injury and microcirculation alteration in hepatic injury induced by intestinal ischemia-reperfusion in a rat model[J]. J Magn Reson Imaging,2021,54(3):751-760.
- [13] Li JL, Ye WT, Liu ZY, et al. Comparison of microvascular perfusion evaluation among IVIM-DWI, CT perfusion imaging and histological microvessel density in rabbit liver VX2 tumors[J]. Magn Reson Imaging, 2018, 46:64-69.
- [14] Cannistrà M,Ruggiero M,Zullo A, et al. Hepatic ischemia reperfusion injury: A systematic review of literature and the role of current drugs and biomarkers[J].Int J Surg,2016,33(Suppl 1): S57-S70.
- [15] Cohen AD, Schieke MC, Hohenwalter MD, et al. The effect of low b-values on the intravoxel incoherent motion derived pseudodiffusion parameter in liver[J].Magn Reson Med, 2015, 73(1): 306-311.
- [16] Dyvorne HA, Galea N, Nevers T, et al. Diffusion-weighted imaging of the liver with multiple b values: effect of diffusion gradient polarity and breathing acquisition on image quality and intravoxel incoherent motion parameters—a pilot study[J].Radiology,2013,266(3):920-929.
- [17] Wu G, Liu X, Xiong Y, et al. Intravoxel incoherent motion and diffusion kurtosis imaging for discriminating soft tissue sarcoma from vascular anomalies [J]. Medicine (Baltimore), 2018, 97 (50):e13641.
- [18] Federau C, Meuli R, O'Brien K, et al. Perfusion measurement in brain gliomas with intravoxel incoherent motion MRI[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2014, 35(2):256-262.
- [19] Tipirneni-Sajja A, Song R, McCarville MB, et al. Automated vessel exclusion technique for quantitative assessment of hepatic iron overload by R2 * -MRI[J].J Magn Reson Imaging, 2018, 47 (6):1542-1551.
- [20] Olthof PB, van Golen RF, Meijer B, et al. Warm ischemia timedependent variation in liver damage, inflammation, and function in hepatic ischemia/reperfusion injury[J]. Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis, 2017, 1863(2): 375-385.

(收稿日期:2021-08-07 修回日期:2021-12-12)