Consistency of intravoxel incoherent motion diffusion imaging of mycardium with different b-value condition

LI Shilan[1], *MOU Anna*[2], *CHE Siyu*[1], *CHEN Hui*[1], *SONG Qingwei*[1], *LIU Ailian*[1], *LI Zhiyong*[1*]

(1. *Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian* 116011, *China*; 2. *Department of Radiology, Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu* 610072, *China*)

[**Abstract**] **Objective** To explore the consistency of intravoxel incoherent motion (IVIM) parameters of myocardium with different b-values. **Methods** IVIM scanning was performed on the middle part of the left ventricle in 30 healthy volunteers. IVIM parameter values, slow apparent diffusion coefficient (ADC_{slow}), fast ADC (ADC_{fast}) and perfusion score f were obtained by using a double-exponential model. The differences of measured parameter values were compared between 9 b values (0, 20, 50, 80, 100, 120, 200, 300, 500 s/mm^2) and 7 b values (0, 20, 80, 100, 200, 300, 500 s/mm^2). Intraclass correlation coefficient (*ICC*) test was used to analyze the consistency of parameters measured by two physicians, while *Bland-Altman* test was used to analyze the consistency of parameters under the condition of 9 b values and 7 b values. **Results** Under 9 b values and 7 b values, no significant difference of ADC_{slow}, ADC_{fast} nor f was detected within or between groups (all $ICC \geqslant 0.66$, all $P<0.05$). *Bland-Altman* diagrams showed that the average deviation of ADC_{slow} between 9 and 7 b values was -0.07×10^{-3} mm^2/s, consistency limit was (−1.87, 1.73), while the mean deviation of ADC_{fast} was 1.57×10^{-3} mm^2/s, consistency limit was (−72.64, 75.77), and the mean deviation of f was 1.17%, consistency limit was (−13.45, 15.79). **Conclusion** IVIM parameters of myocardium had rather good consistency under the condition of 9 and 7 b values.

[**Keywords**] heart; diffusion magnetic resonance imaging; b value; intravoxel incoherent motion

DOI: 10.13929/j.issn.1672-8475.2021.01.010

不同 b 值条件下心脏体素内不相干运动成像相关参数的一致性

李世兰[1], 牟安娜[2], 车思雨[1], 陈　辉[1], 宋清伟[1], 刘爱连[1], 李智勇[1*]

(1. 大连医科大学附属第一医院放射科, 辽宁 大连　116011;
2. 四川省人民医院放射科, 四川 成都　610072)

[**摘　要**] **目的**　观察不同 b 值条件下心脏体素内不相干运动(IVIM)成像相关参数的一致性。**方法**　对 30 名健康志愿者行左心室中间部 IVIM 扫描, 以双指数模型获取 IVIM 参数值慢速表观弥散系数(ADC_{slow})、快速 ADC(ADC_{fast})及灌注分数 f。比较 9 个 b 值(0、20、50、80、100、120、200、300、500 s/mm^2)与 7 个 b 值(0、20、80、100、200、300、500 s/mm^2)条件下所测参数值的差异, 采用组内相关系数(*ICC*)分析 2 名医师测量参数结果的一致性, 以 *Bland-Altman* 检验分析不同 b 值条件下所测参数的一致性。**结果**　9 个与 7 个 b 值条件下 ADC_{slow}、ADC_{fast} 及 f 差异均无统计学意义(P 均>0.05), 且 2 名医师测量 IVIM 参数的组内及组间一致性均较好(*ICC* 均≥0.66, P 均<0.05)。*Bland-Altman* 图显示, 9 个与 7 个 b 值时 ADC_{slow} 的平均偏差为 -0.07×10^{-3} mm^2/s, 一致性界限(−1.87, 1.73); ADC_{fast} 的平均偏差 1.57×10^{-3} mm^2/s, 一致性

[**基金项目**] 辽宁省教育厅科研基金(L2016021)。

[**第一作者**] 李世兰(1993—), 女, 甘肃白银人, 硕士, 医师。研究方向: 心胸影像学诊断。E-mail: 704496405@qq.com

[**通信作者**] 李智勇, 大连医科大学附属第一医院放射科, 116011。E-mail: zjy_lzy@126.com

[**收稿日期**] 2020-04-20　[**修回日期**] 2020-11-28

界限(－72.64，75.77)；f 的平均偏差 1.17%，一致性界限(－13.45，15.79)。**结论**　9 个与 7 个 b 值条件下心脏 IVIM 成像各参数值的一致性较好。

[**关键词**]　心脏；磁共振成像，弥散；b 值；体素内不相干运动

[**中图分类号**]　R540.4；R445.2　[**文献标识码**]　A　[**文章编号**]　1672-8475(2021)01-0042-05

体素内不相干运动(intravoxel incoherent motion，IVIM)技术可在非对比剂的情况下无创评估微循环灌注及组织中水分子扩散情况，现已用于诊断肝脏、乳腺及前列腺等疾病和评估病情[1-3]。IVIM 成像受心脏、呼吸等生理运动影响。近年来，随着 IVIM 参数设置、扫描方式等的不断优化，已有研究[4-7]证实 IVIM 技术可用于活体心脏成像。

b 值是 IVIM 扩散加权成像的重要参数，控制双极梯度脉冲强度，决定着采集信号的扩散加权程度[8]。IVIM 心脏相关研究[9-14]所用 b 值数量及大小各不相同。理论上更多 b 值有利于纠正双指数曲线的拟合误差，保证参数的准确性，但会导致图像采集时间过长。优化 b 值采集方案对 IVIM 获得最佳诊断效能和缩短采集时间非常重要。本研究观察不同 b 值条件下心脏 IVIM 成像相关参数的一致性，为优化 b 值方案提供参考。

1　资料与方法

1.1　一般资料　回顾性分析 2015 年 5 月—2019 年 5 月 30 名接受心脏 IVIM 成像的健康志愿者，男 14 名，女 16 名，年龄 22～71 岁，平均(37.3±14.9)岁；体质量指数(body mass index，BMI)17.90～77.40 kg/m^2，平均(21.95±2.67) kg/m^2；心率 54～75 次/分，平均(63.75±6.41)次/分。纳入标准：①心电图及超声心动图正常；②无心肌梗死及心脏手术史；③无心悸、心衰、胸痛、胸闷、呼吸困难等症状；④无糖尿病、高血压、高脂血症及肿瘤病史。排除标准：①MR 检查禁忌证(心脏起搏器、人工耳蜗植入物、幽闭恐惧症等)、妊娠期妇女、已知全身性疾病和听力障碍；②情绪紧张或无法承受长时间检查；③图像质量差。本研究经院伦理委员会审批，检查前所有志愿者均签署知情同意书。

1.2　仪器与方法　采用 GE Signa HDxt 3.0T MR 仪，配备 8 通道心脏专用线圈。检查前对志愿者进行屏气训练，在呼气末屏气时行 IVIM 扫描，以快速平衡稳态进动(fast imaging employ steady state acquisition，FIESTA)序列采集所有层面(左心室短轴、二腔心、三腔心及四腔心层面)图像。电影扫描参数：TR 3.2 ms，TE 1.1 ms，翻转角 45°，层厚 10 mm，层间距 0，体素 224×256，FOV 35 cm×35 cm。采用单次自旋回波平面成像(spin-echo echo planar imaging，SE-EPI)序列行弥散加权成像(diffusion weighted imaging，DWI)，主要采集左心室中间部短轴图像，b 值取 0、20、50、80、100、120、200、300、500 s/mm^2，相对应激励次数为 2、2、2、2、2、2、2、2、4；TE 51.2 ms，TR 857 ms，层厚 8 mm，层间距 0 mm，矩阵 96×128，FOV 35 cm×35 cm，扫描触发延迟(trigger delay，TD)。

1.3　图像后处理及分析　采用 GE Functool 9.4.05a 软件测量 IVIM 参数。方法：于左心室心肌整体、边缘无伪影干扰层面手动勾画心中膜，而后在 GE ADW 4.6 系统中以双指数模型获取左心室心肌慢速表观弥散系数(slow apparent diffusion coefficient，ADC_{slow})、快速 ADC(ADC_{fast})及灌注分数 f。由 1 名从事心血管影像学诊断工作 20 年的主任医师(医师 1)及 1 名工作 3 年的住院医师(医师 2)分别进行测量，1 个月后医师 2 进行重复测量。

1.4　统计学分析　采用 SPSS 22.0 统计分析软件。以 $\bar{x}\pm s$ 表示符合正态分布的计量资料，采用独立样本 t 检验进行比较。以配对样本 t 检验对比 9 个 b 值与 7 个 b 值时各参数值的差异。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient，*ICC*)分析 2 名医师测量结果的一致性(*ICC*＞0.6 为一致性较好)，以 *Bland-Altman* 图法分析 9 个 b 值(0、20、50、80、100、120、200、300、500 s/mm^2)与 7 个 b 值(0、20、80、100、200、300、500 s/mm^2)时参数测值的一致性。P＜0.05 为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　2 种 b 值条件下 IVIM 参数值比较　9 个与 7 个 b 值情况下，ADC_{slow}、ADC_{fast} 及 f 差异均无统计学意义(P 均＞0.05)，见表 1 及图 1、2。

表 1　9 个与 7 个 b 值条件下左心室中间部 IVIM 参数值比较($\bar{x}\pm s$)

b 值	ADC_{slow} ($\times10^{-3}$ mm^2/s)	ADC_{fast} ($\times10^{-3}$ mm^2/s)	f(%)
9 个	3.24±1.22	137.82±39.49	29.67±7.40
7 个	3.17±1.50	139.39±39.59	30.84±7.40
t 值	0.44	0.23	0.61
P 值	0.66	0.82	0.54

2.2　2 名医师测量 IVIM 参数值的一致性　9 个和 7 个 b 值条件下，2 名医师测量 IVIM 参数的组内及组间一致性均较好（*ICC* 均≥0.66，*P* 均＜0.05），见表 2、3。

2.3　2 种 b 值条件下 IVIM 参数测值的一致性　*Bland-Altman* 图显示，9 个与 7 个 b 值时，ADC_{slow} 平均偏差为 -0.07×10^{-3} mm²/s，一致性界限（−1.87，1.73）；ADC_{fast} 平均偏差 1.57×10^{-3} mm²/s，一致性界

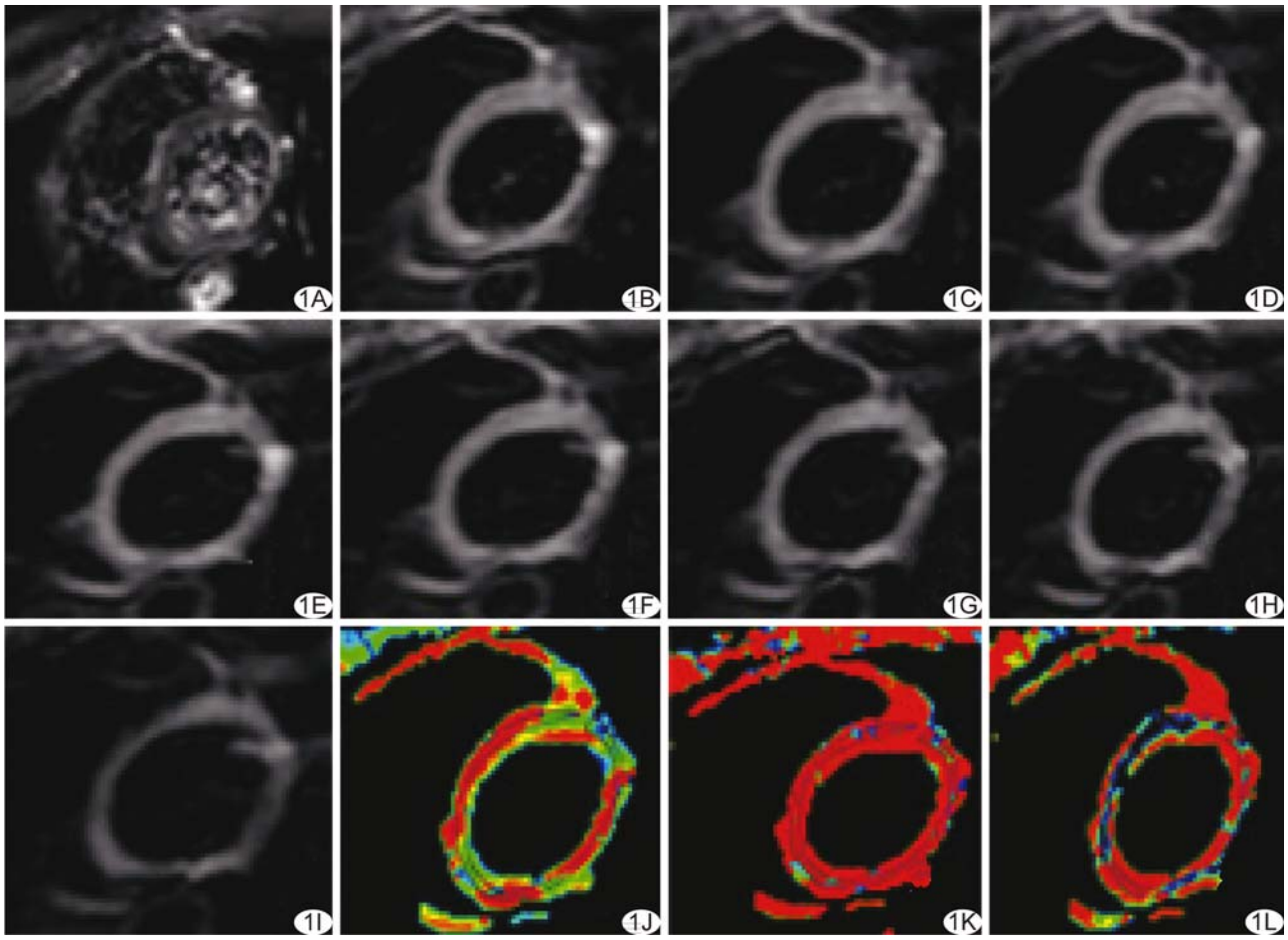


图 1　志愿者男，25 岁，心脏 IVIM 成像　A～I. 左心室短轴 IVIM 原始图像，对应 9 个 b 值分别为 0、20、50、80、100、150、200、300、500 s/mm²；J～L. 以心脏 IVIM 成像双指数模型构建的各参数伪彩图，依次为 ADC_{slow} 图、ADC_{fast} 图及 f 图，$ADC_{slow}=2.23\times10^{-3}$ mm²/s，$ADC_{fast}=134.00\times10^{-3}$ mm²/s，f=25.60%

表 2　9 个 b 值时 2 名医师测量左心室中间部 IVIM 参数组内及组间一致性（$\bar{x}\pm s$）

参数	组内一致性			组间一致性		
	医师 2 第 1 次	医师 2 第 2 次	*ICC* 值	医师 2（第 1 次）	医师 1	*ICC* 值
ADC_{slow}（$\times10^{-3}$ mm²/s）	3.24±1.22	3.35±1.28	0.97	3.24±1.22	3.33±1.36	0.92
ADC_{fast}（$\times10^{-3}$ mm²/s）	137.82±39.50	139.78±38.11	0.71	137.82±39.50	130.01±29.33	0.76
f（%）	29.67±7.40	31.86±7.37	0.85	29.67±7.40	29.53±8.18	0.87

表 3　7 个 b 值时 2 名医师测量左心室中间部 IVIM 参数组内及组间一致性（$\bar{x}\pm s$）

参数	组内一致性			组间一致性		
	医师 2 第 1 次	医师 2 第 2 次	*ICC* 值	医师 2（第 1 次）	医师 1	*ICC* 值
ADC_{slow}（$\times10^{-3}$ mm²/s）	3.17±1.50	3.17±1.23	0.92	3.17±1.50	3.19±1.56	0.95
ADC_{fast}（$\times10^{-3}$ mm²/s）	139.39±39.60	135.55±30.63	0.73	139.39±39.60	137.54±33.80	0.85
f（%）	30.84±7.46	34.59±8.34	0.66	30.84±7.46	31.06±7.34	0.72

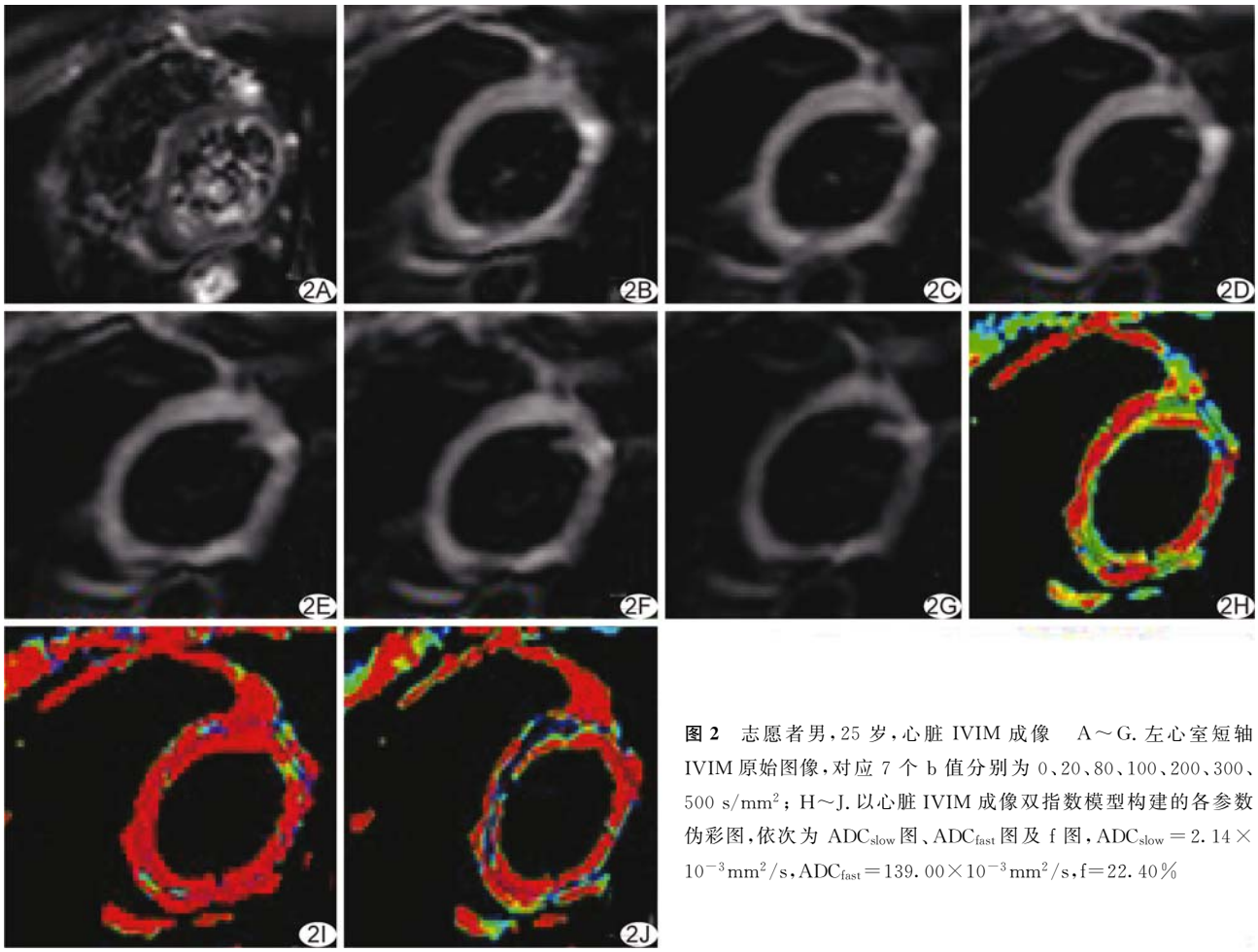


图 2　志愿者男，25 岁，心脏 IVIM 成像　A～G. 左心室短轴 IVIM 原始图像，对应 7 个 b 值分别为 0、20、80、100、200、300、500 s/mm^2；H～J. 以心脏 IVIM 成像双指数模型构建的各参数伪彩图，依次为 ADC_{slow} 图、ADC_{fast} 图及 f 图，$ADC_{slow}=2.14\times10^{-3}mm^2/s$，$ADC_{fast}=139.00\times10^{-3}mm^2/s$，f=22.40%

限（－72.64，75.77）；f 平均偏差 1.17%，一致性界限（－13.45，15.79）。

3　讨论

3.1　b 值数目和大小　b 值选择对 IVIM 图像采集至关重要。IVIM 技术的 b 值数量因研究不同而异，多为 4～10 个，拟合参数双指数信号衰减的最小 b 值个数为 4，即为获得 IVIM 参数值，必须用至少 4 种不同 b 值（包括 b=0 s/mm^2）[8]。据报道[15]，目前 IVIM 技术所用 b 值数量最多为 16 个，b 值数量越多，拟合误差越小，IVIM 参数精确性越高。在针对心脏的 IVIM 研究[10-13]中，b 值数目及大小各不相同，数量一般为 7～13 个，如 XIANG 等[10]使用 7 个 b 值，MOU 等[11-13]使用 9 个 b 值，DELATTRE 等[14]则使用 13 个 b 值。但是，b 值数量增多导致采集时间延长。DELATTRE 等[14]尝试将 b 值降至 9 个，发现所获 IVIM 参数值与 13 个 b 值无明显差异，而采集时间明显缩短。本研究结果则进一步显示 7 个 b 值与 9 个 b 值采集参数的一致性较好。

目前国内外针对如何设置 b 值数量及大小尚未达成共识，各研究中 b 值设置不完全相同。心脏相关 IVIM 研究中，AN 等[12]使用 b 值为 0、10、50、100、150、200、250、500、800 s/mm^2，MOULIN 等[13]使用 b 值为 0、15、30、50、75、100、200、300、400 s/mm^2，DELATTRE 等[14]使用 b 值为 0、15、30、45、60、75、90、105、120、250、350、450、550 s/mm^2，XIANG 等[10]使用 b 值为 0、20、60、80、120、200、600 s/mm^2。b＜200 s/mm^{2}时，采集的扩散信号包含足够的组织灌注成分；b 值＞200 s/mm^{2}时，微循环灌注成分对扩散信号的影响可以忽略。一般认为 b=200 s/mm^{2}是区分快、慢水分子扩散运动的阈值[16]，故多数研究均选取 b 值200 s/mm^2。此外，由于选择 b 值数量不同，各研究中 b 值跨度也不同，但多数研究第 2 个 b 值均≥10 s/mm^2，这是由于 b 值＜10 s/mm^{2}可出现明显信号衰减，且所反映的是相对较大的血管中质子的流动速度，而非 IVIM 理论中的微血管灌注[17]。本研究第 2 个 b 值选择 20 s/mm^2，与 XIANG 等[10,18]相同，

发现 7 个 b 值与 9 个 b 值条件下获得的 IVIM 参数值差异无统计学意义。

3.2 IVIM 参数的一致性 IVIM 参数只有在一致性良好的前提下方能较好地反映组织微循环状态。MOULIN 等[13]观察 IVIM 参数的可重复性，发现 f 和 ADC_{slow} 可重复性较好，*ICC* 值分别为 0.963、0.762，而 ADC_{fast} 的可重复性稍低（*ICC*=0.652）。MOU 等[11]发现正常人 IVIM 参数组内及组间一致性均较高（*ICC*≥0.87）。RAPACCHI 等[9]将低 b 值 DWI 用于健康志愿者，发现经过去噪（principal component analysis，PCA）及滤波（temporal maximum intensity projection，TMIP）等后处理后，IVIM 参数具有良好的可重复性。本研究比较 2 种不同 b 值条件下正常人 IVIM 各参数，发现反映灌注情况的参数 ADC_{fast} 和 f 值具有良好的一致性，与李志伟等[18]研究结果相符，提示 IVIM 参数值的稳定性较好，成像质量良好时，可较好地反映组织微循环情况。

3.3 不同 b 值情况下 IVIM 参数值 各研究中 b 值数量及数值不同，所获心脏 IVIM 参数值也不相同。DELATTRE 等[14]以 13 个 b 值获得的 ADC_{slow} 值为 $(2.34\pm0.98)\times10^{-3}$ mm^2/s，ADC_{fast} 值为 76.3×10^{-3} mm^2/s；MOULIN 等[13]以 9 个 b 值获得的 ADC_{slow} 值为 $(1.41\pm0.09)\times10^{-3}$ mm^2/s，ADC_{fast} 值为 $(43.6\pm9.2)\times10^{-3}$ mm^2/s。不同 b 值数量、数值下，IVIM 参数值不同，原因可能在于不同 b 值及跨度与扫描磁场强度有关。为缩短采集时间和减少图像失真，扫描过程中在 RR 间期获取数据，此时连续 2 幅图像之间的信号可能尚未完全恢复，且磁化矢量动态平衡依赖于个体 RR 间期，磁化矢量可能影响参数值。

综上所述，9 个与 7 个 b 值条件下心脏 IVIM 成像各参数值的一致性较好。本研究样本量较小，且为回顾性分析，有待加大样本量进一步深入探讨。

[参考文献]

[1] LUO M, ZHANG L, JIANG X H, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging: Evaluation of the differentiation of solid hepatic lesions[J]. Transl Oncol, 2017, 10(5): 831-838.

[2] 魏清顺，周祖邦，李淑兰，等. 体素内不相干运动成像应用于乳腺癌研究进展[J]. 中国医学影像学技术，2019，35(6)：938-941.

[3] 曾桔，印隆林. 超高 b 值扩散加权成像及体素内不相干运动成像用于前列腺癌诊断[J]. 中国医学影像学技术，2020，36(8)：1220-1224.

[4] CALLOT V, BENNETT E, DECKING U K, et al. In vivo study of microcirculation in canine myocardium using the IVIM method [J]. Magn Reson Med, 2003, 50(3): 531-540.

[5] SPINNER G R, von DEUSTER C, TEZCAN K C, et al. Bayesian intravoxel incoherent motion parameter mapping in the human heart[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2017, 19(1): 85.

[6] TAKAHARA T, KWEE T C. Low b-value diffusion-weighted imaging: Emerging applications in the body[J]. J Magn Reson Imaging, 2012, 35(6): 1266-1273.

[7] SPINNER G R, STOECK C T, MATHEZ L, et al. On probing intravoxel incoherent motion in the heart-spin-echo versus stimulated-echo DWI [J]. Magn Reson Med, 2019, 82(3): 1150-1163.

[8] KOH D M, COLLINS D J, ORTON M R. Intravoxel incoherent motion in body diffusion-weighted MRI: Reality and challenges [J]. AJR Am J Roentgenol, 2011, 196(6): 1351-1361.

[9] RAPACCHI S, WEN H, VIALLON M, et al. Low b-value diffusion-weighted cardiac magnetic resonance imaging: Initial results in humans using an optimal time-window imaging approach [J]. Invest Radiol, 2011, 46(12): 751-758.

[10] XIANG S F, ZHANG X Q, YANG S J, et al. STROBE-A preliminary investigation of IVIM-DWI in cardiac imaging[J]. Medicine, 2018, 97(36): e11902.

[11] MOU A, ZHANG C, LI M, et al. Evaluation of myocardial microcirculation using intravoxel incoherent motion imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 46(6): 1818-1828.

[12] AN A, CHEN B H, WU R, et al. Diagnostic performance of intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging in the assessment of the dynamic status of myocardial perfusion[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 48(6): 1602-1609.

[13] MONLIN K, CROISILLE P, FEIWEIER T, et al. In vivo free-breathing DTI and IVIM of the whole human heart using a real-time slice-followed SE-EPI navigator-based sequence: A reproducibility study in healthy volunteers [J]. Magn Reson Med, 2016, 76(1): 70-82.

[14] DELATTRE B M, VIALLON M, WEI H, et al. In vivo cardiac diffusion-weighted magnetic resonance imaging: Quantification of normal perfusion and diffusion coefficients with intravoxel incoherent motion imaging[J]. Invest Radiol, 2012, 47(11): 662-670.

[15] CHEVALLIER O, ZHOU N, HE J, et al. Removal of evidential motion-contaminated and poorly fitted image data improves IVIM diffusion MRI parameter scan-rescan reproducibility[J]. Acta Radiol, 2018, 59(10): 1157-1167.

[16] LUCIANI A, VIGNAUD A, CAVET M, et al. Liver cirrhosis: Intravoxel incoherent motion MRI imaging pilot study [J]. Radiology, 2008, 249(3): 891-899.

[17] CERCUEIL J P, PETIT J M, NOUGARET S, et al. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging in the liver: Comparison of mono-, bi- and tri-exponential modelling at 3.0-T [J]. Eur Radiol, 2015, 25(6): 1541-1550.

[18] 李志伟，袁思殊，黄璐，等. 心肌磁共振多 b 值 DWI 的初步探讨[J]. 放射性实践，2013，3(28)：337-340.