

DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.03.0284

· 专题报道 ·

体素内不相干运动技术评估高血压患者心肌微循环的初步研究

李世兰, 牟安娜, 车思雨, 陈 辉, 张 晨, 宋清伟, 刘爱连, 李智勇*

大连医科大学附属第一医院放射科, 大连 116011

[摘要] **目的** 尝试使用体素内不相干运动 (IVIM) 弥散加权成像评估高血压患者的心肌微循环情况, 并与正常志愿者进行对照。**方法** 纳入 2015 年 5 月至 2018 年 9 月在我院完成心脏磁共振电影和 IVIM 成像检查的正常志愿者 30 例和高血压患者 18 例。于左心室中间部短轴层面采用 8 个 b 值 (20、50、80、100、120、200、300、500 s/mm²) 完成 IVIM 扫描。在左心室短轴层面上获得左心室的结构和功能参数; 利用双指数模型测量 IVIM 各参数快速表观扩散系数 (ADC_{fast})、慢速表观扩散系数、快速扩散成分所占比例。统计分析正常志愿者与高血压患者之间各参数值的差异。**结果** 高血压患者左心室射血分数、心输出量、心肌质量均高于正常志愿者 [(68.39±7.51)% vs (63.20±5.22)%、(6.84±2.03) L vs (5.41±1.08) L、(122.54±33.63) g vs (85.97±25.42) g], 差异均有统计学意义 ($t=-2.75$ 、 -2.64 、 -4.15 , P 均 <0.05), 而左心室的舒张末期容积、收缩末期容积、每搏输出量、心指数在两组之间差异均无统计学意义 (P 均 >0.05)。高血压患者的 ADC_{fast} 为 0.12 (0.03~0.17) mm²/s, 低于正常志愿者的 0.14 (0.10~0.21) mm²/s, 差异有统计学意义 ($Z=-2.83$, $P<0.01$)。**结论** IVIM 技术有助于评估高血压患者的心肌微循环情况。

[关键词] 体素内不相干运动; 磁共振成像; 心肌微循环; 高血压**[中图分类号]** R 544.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)03-0284-06

Intravoxel incoherent motion in evaluating myocardial microcirculation of hypertensive patients: a preliminary study

LI Shi-lan, MOU An-na, CHE Si-yu, CHEN Hui, ZHANG Chen, SONG Qing-wei, LIU Ai-lian, LI Zhi-yong*

Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, Liaoning, China

[Abstract] **Objective** To assess the myocardial microcirculation of patients with hypertension using intravoxel incoherent motion (IVIM) diffusion-weighted imaging, and to analyze the differences compared with normal volunteers. **Methods** Thirty normal volunteers and 18 hypertensive patients, who underwent cardiac magnetic resonance cine and IVIM scans in our hospital from May 2015 to Sep. 2018, were enrolled. The IVIM scan was performed on middle view of left ventricular short-axis with 8 b values (20, 50, 80, 100, 120, 200, 300 and 500 s/mm²). The structural and functional parameters were measured on left ventricular short-axis, and the IVIM parameters (fast apparent diffusion coefficient [ADC_{fast}], slow apparent diffusion coefficient, fraction of ADC_{fast}) were measured using biexponential model. The differences of all parameters were analyzed between the normal volunteers and hypertensive patients. **Results** The left ventricular ejection fraction, cardiac output and myocardial mass of the hypertensive patients were higher than those of the normal volunteers [(68.39±7.51)% vs (63.20±5.22)%], [6.84±2.03] L vs [5.41±1.08] L, and [122.54±33.63] g vs [85.97±25.42] g), and the differences were significant ($t=-2.75$, -2.64 and -4.15 ; all $P<0.05$). There were no significant differences in the left ventricular end-diastolic volume, end-systolic volume, stroke volume or cardiac index between the hypertensive patients and normal volunteers (all $P>0.05$). The ADC_{fast} of the hypertensive patients was significantly lower than that of the normal volunteers (0.12 [0.03-0.17] mm²/s vs 0.14 [0.10-0.21] mm²/s, $Z=-2.83$, $P<0.01$). **Conclusion** The application of IVIM can contribute to evaluating myocardial microcirculation of the hypertensive patients.

[Key words] intravoxel incoherent motion; magnetic resonance imaging; myocardium microcirculation; hypertension

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(3): 284-289]

[收稿日期] 2018-07-17 **[接受日期]** 2018-09-07**[基金项目]** 辽宁省教育厅科研基金(L2016021), 辽宁省科技厅科研项目(20170540235)。Supported by Scientific Research Fund of Department of Education of Liaoning Province (L2016021) and Scientific Research Project of Department of Science and Technology of Liaoning Province (20170540235).**[作者简介]** 李世兰, 硕士生。E-mail: ls1199311@126.com

*通信作者(Corresponding author)。Tel: 0411-83635963-3160, E-mail: zjy_lzy@126.com

高血压是心血管发病率和死亡率的主要原因之一,我国高血压患病人数近 2.66 亿,其中成人高血压的发病率已经超过 25%,且会随着年龄的增长患病风险呈上升趋势,同时青年和儿童高血压的患病风险也呈上升趋势^[1]。由于高血压增加了心脏的后负荷,导致心肌组织重构,这可能使心肌微循环发生改变,如冠状动脉微血管稀疏、冠状动脉血流储备减少,这些改变会对高血压性心脏病的临床演变产生不利影响^[2]。因此,定量评估心肌微循环情况对于高血压患者心脏并发症的预防与监测极其重要。近些年,心肌微循环是一个比较热门的话题,但是,国内外在活体心脏心肌微循环方面的研究报道较少。本研究旨在探讨利用体素内不相干运动 (intravoxel incoherent motion, IVIM) 技术初步分析正常志愿者和高血压患者之间心肌微循环的差异,为高血压患者心肌微循环的精准监测与评估提供一种新的方法。

1 资料和方法

1.1 病例资料 本研究为前瞻性研究。纳入 2015 年 5 月至 2018 年 9 月在大连医科大学附属第一医院放射科 3.0 T 磁共振扫描仪上完成心脏电影和 IVIM 扫描的正常志愿者 30 例和高血压患者 18 例。正常志愿者纳入标准: (1) 无胸闷或心悸等常见心血管疾病的临床症状,无心肌梗死及心脏手术史; (2) 心电图和超声心动图检查均正常; (3) 无糖尿病、高脂血症及高血压病史; (4) 入组时血压在正常值范围内。高血压患者纳入标准: 收缩压 ≥ 140 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa) 和 (或) 舒张压 ≥ 90 mmHg。正常志愿者与高血压患者共同排除标准: 磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 检查禁忌证 (起搏器、植入型心律转复除颤器、耳蜗植入器或幽闭恐怖症) 人群。本研究通过大连医科大学附属第一医院伦理委员会审批,所有纳入研究对象均签署研究知情同意书。

1.2 扫描参数与方法 心脏 MRI 检查使用 3.0 T 磁共振扫描仪 (Signa HDxt, GE Healthcare, Waukesha, WI, USA), 心脏专用 8 通道线圈, 所有研究对象均使用心电门控与呼吸门控进行扫描,并于检查前训练呼吸。采用快速平衡稳态进动序列完成各层面 (左心室短轴、二腔心、三腔心及四腔心) 的扫描。在呼气末屏气时完成左心

室中间部短轴层面 IVIM 扫描,人为地于左心室舒张中晚期图像上观察到心肌运动幅度相对最小的时间节点作为一个初步的扫描触发延迟 (trigger delay, TD) 时间,在 IVIM 成像时可以依据心率的变化情况进行 TD 时间的小幅度调整,以确定扫描时的最佳 TD 时间。选取 20、50、80、100、120、200、300、500 s/mm² 共 8 个 b 值,相对应的激励次数分别是 2、2、2、2、2、2、2、4。扫描参数: 视野 (field of view, FOV) 为 35 cm \times 35 cm, 回波时间 (echo time, TE) 为 51.2 ms, 重复时间 (repetition time, TR) 为 857 ms, 层厚为 8~10 mm, 层间距为 0 mm, 矩阵为 96 \times 128。

1.3 图像分析 使用美国 GE 公司 ADW4.4 工作站的 ReportCard 软件完成所有志愿者左心室结构和功能参数的测量。测量方法: 在左心室舒张末期手动勾画心内膜及心外膜,在左心室收缩末期勾画心内膜,得到左心室结构参数舒张末期容积 (end-diastolic volume, EDV)、收缩末期容积 (end-systolic volume, ESV)、左心室心肌质量 (left ventricular mass, LV_{mass}), 以及功能参数射血分数 (ejection fraction, EF)、每搏输出量 (stroke volume, SV)、心输出量 (cardiac output, CO)、心指数 (cardiac index, CI)。使用 ADW4.6 工作站的 Functool 9.4.05a 软件完成 IVIM 参数的测量。测量方法: 选取左心室中间部短轴层面心肌整体部分、心肌边缘无伪影干扰的层面,手动勾画出心内膜及心外膜,勾画时尽可能避免心腔血池和周边伪影的干扰,采用双指数模型获得左心室心肌参数快速表观扩散系数 (fast apparent diffusion coefficient, ADC_{fast})、慢速表观扩散系数 (slow apparent diffusion coefficient, ADC_{slow}) 和快速扩散成分所占比例 (fraction of ADC_{fast}, f)。所有数据由同一位医师进行 2 次测量,2 次测量间隔时间为 1 个月。然后由另一位医师对所有数据进行再次测量。

1.4 统计学处理 应用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析。采用组内相关系数 (intraclass correlation coefficient, ICC) 检验所有志愿者心肌 IVIM 参数组内、组间的一致性 (ICC $>$ 0.80 表示可重复性高)。所有计量资料均采用单样本 K-S 检验进行正态性检验,若呈正态分布以 $\bar{x}\pm s$ 表示,两组间比较采用两独立样本 *t* 检验;呈偏态分布以中位数 (范

围)表示,两组间比较采用非参数 Mann-Whitney *U* 检验。计数资料以例数和百分数表示,两组间比较采用 χ^2 检验。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 两组研究对象的基本情况 正常志愿者与高血压患者在年龄、性别、心率方面相匹配,而高血压患者的体质量指数高于正常志愿者 [(27.67±3.42) kg/m² vs (23.60±2.81) kg/m²], 差

异有统计学意义 ($t=-4.48, P<0.01$)。见表 1。

2.2 两组左心室结构和功能参数的比较 高血压患者左心室的 EF、CO、LV_{mass} 分别为 (68.39±7.51)%、(6.84±2.03) L/min、(122.54±33.63) g, 均高于正常志愿者 [(63.20±5.22)%、(5.41±1.08) L/min、(85.97±25.42) g], 差异均有统计学意义 ($t=-2.75、-2.64、-4.15, P$ 均<0.05), 而左心室的 EDV、ESV、SV、CI 在两组之间差异均无统计学意义 (P 均>0.05)。见表 1。

表 1 两组研究对象的基本情况及其左心室结构参数和功能参数的比较

Tab 1 Comparison of basic characteristics and left ventricular structural and functional parameters between two groups

| Group | Normal <i>N</i> =30 | Hypertension <i>N</i> =18 | Statistic | <i>P</i> value |
|--|----------------------|---------------------------|---------------|----------------|
| Age (year), $\bar{x}\pm s$ | 44.47±13.94 | 49.11±16.68 | $t=-1.04$ | 0.31 |
| Male <i>n</i> | 14 | 12 | $\chi^2=1.81$ | 0.18 |
| Body mass index (kg·m ⁻²), $\bar{x}\pm s$ | 23.60±2.81 | 27.67±3.42 | $t=-4.48$ | <0.01 |
| Heart rate /min ⁻¹ , $\bar{x}\pm s$ | 62.50±6.27 | 65.44±7.75 | $t=-1.44$ | 0.13 |
| Left ventricular parameter | | | | |
| EF (%), $\bar{x}\pm s$ | 63.20±5.22 | 68.39±7.51 | $t=-2.75$ | 0.01 |
| CO (L·min ⁻¹), $\bar{x}\pm s$ | 5.41±1.08 | 6.84±2.03 | $t=-2.64$ | 0.02 |
| LV _{mass} m/g, $\bar{x}\pm s$ | 85.97±25.42 | 122.54±33.63 | $t=-4.15$ | <0.01 |
| EDV V/mL, $\bar{x}\pm s$ | 136.61±26.57 | 148.30±34.93 | $t=-1.27$ | 0.21 |
| ESV V/mL, $\bar{x}\pm s$ | 50.41±12.75 | 44.43±11.39 | $t=1.57$ | 0.12 |
| SV V/mL, median (range) | 82.25 (69.40-135.70) | 86.60 (63.80-152.18) | $Z=-1.48$ | 0.14 |
| CI (L·min ⁻¹ ·m ⁻²), $\bar{x}\pm s$ | 2.90±0.44 | 3.24±0.77 | $t=-1.52$ | 0.15 |

EF: Ejection fraction; CO: Cardiac output; LV_{mass}: Left ventricular mass; EDV: End-diastolic volume; ESV: End-systolic volume; SV: Stroke volume; CI: Cardiac index

2.3 IVIM 各参数的组间、组内一致性分析 对于所有研究对象 (正常志愿者和高血压患者) 同一位医师先后 2 次测量的 IVIM 参数 (ADC_{slow}、ADC_{fast}、*f* 值), ICC 检验均有良好的一致性 (ICC 分别为 0.97、0.97、0.86, 表 2)。对于两位不同医师分别测量的 ADC_{slow}、ADC_{fast}、*f* 值, ICC 检验亦均有较好的一致性 (ICC 分别为 0.93、0.95、0.84, 表 3)。

表 3 所有研究对象 IVIM 各参数的组间一致性分析

Tab 3 Intergroup consistency of IVIM parameters in all subjects

| Parameter | <i>n</i> =48, $\bar{x}\pm s$ | | |
|---|------------------------------|-----------|------|
| | Doctor 1 | Doctor 2 | ICC |
| ADC _{slow} (mm ² ·s ⁻¹ , ×10 ⁻³) | 3.30±0.88 | 3.22±0.86 | 0.93 |
| ADC _{fast} (mm ² ·s ⁻¹) | 0.13±0.03 | 0.14±0.04 | 0.95 |
| <i>f</i> value | 0.34±0.07 | 0.37±0.09 | 0.84 |

IVIM: Intravoxel incoherent motion; ADC_{slow}: Slow apparent diffusion coefficient; ADC_{fast}: Fast apparent diffusion coefficient; *f*: Fraction of ADC_{fast}

表 2 所有研究对象 IVIM 各参数的组内一致性分析

Tab 2 Intragroup consistency of IVIM parameters in all subjects

| Parameter | <i>n</i> =48, $\bar{x}\pm s$ | | |
|---|------------------------------|------------|------|
| | Baseline | At 1 month | ICC |
| ADC _{slow} (mm ² ·s ⁻¹ , ×10 ⁻³) | 3.30±0.88 | 3.27±0.85 | 0.97 |
| ADC _{fast} (mm ² ·s ⁻¹) | 0.13±0.03 | 0.13±0.03 | 0.97 |
| <i>f</i> value | 0.34±0.07 | 0.34±0.09 | 0.86 |

IVIM: Intravoxel incoherent motion; ADC_{slow}: Slow apparent diffusion coefficient; ADC_{fast}: Fast apparent diffusion coefficient; *f*: Fraction of ADC_{fast}

2.4 两组 IVIM 各参数的比较 见表 4, 高血压患者的 ADC_{fast} 值为 0.12 (0.03~0.17) mm²/s, 低于正常志愿者 [0.14 (0.10~0.21) mm²/s], 差异有统计学意义 ($Z=-2.83, P<0.01$); 两组 ADC_{slow} 和 *f* 值差异均无统计学意义 (P 均>0.05)。正常志愿者和高血压患者 IVIM 图像分别见图 1 和图 2。

表 4 两组间 IVIM 各参数比较

Tab 4 Comparison of IVIM parameters between two groups

| Group | Normal <i>n</i> = 30 | Hypertension <i>n</i> = 18 | Statistic | <i>P</i> value |
|--|----------------------|----------------------------|------------------|----------------|
| ADC _{slow} (mm ² · s ⁻¹ , × 10 ⁻³), $\bar{x} \pm s$ | 3.26 ± 0.92 | 3.36 ± 0.83 | <i>t</i> = -0.37 | 0.71 |
| ADC _{fast} (mm ² · s ⁻¹), median (range) | 0.14 (0.10-0.21) | 0.12 (0.03-0.17) | <i>Z</i> = -2.83 | <0.01 |
| f value $\bar{x} \pm s$ | 0.36 ± 0.05 | 0.32 ± 0.09 | <i>t</i> = 1.35 | 0.19 |

IVIM: Intravoxel incoherent motion; ADC_{slow}: Slow apparent diffusion coefficient; ADC_{fast}: Fast apparent diffusion coefficient; f: Fraction of ADC_{fast}

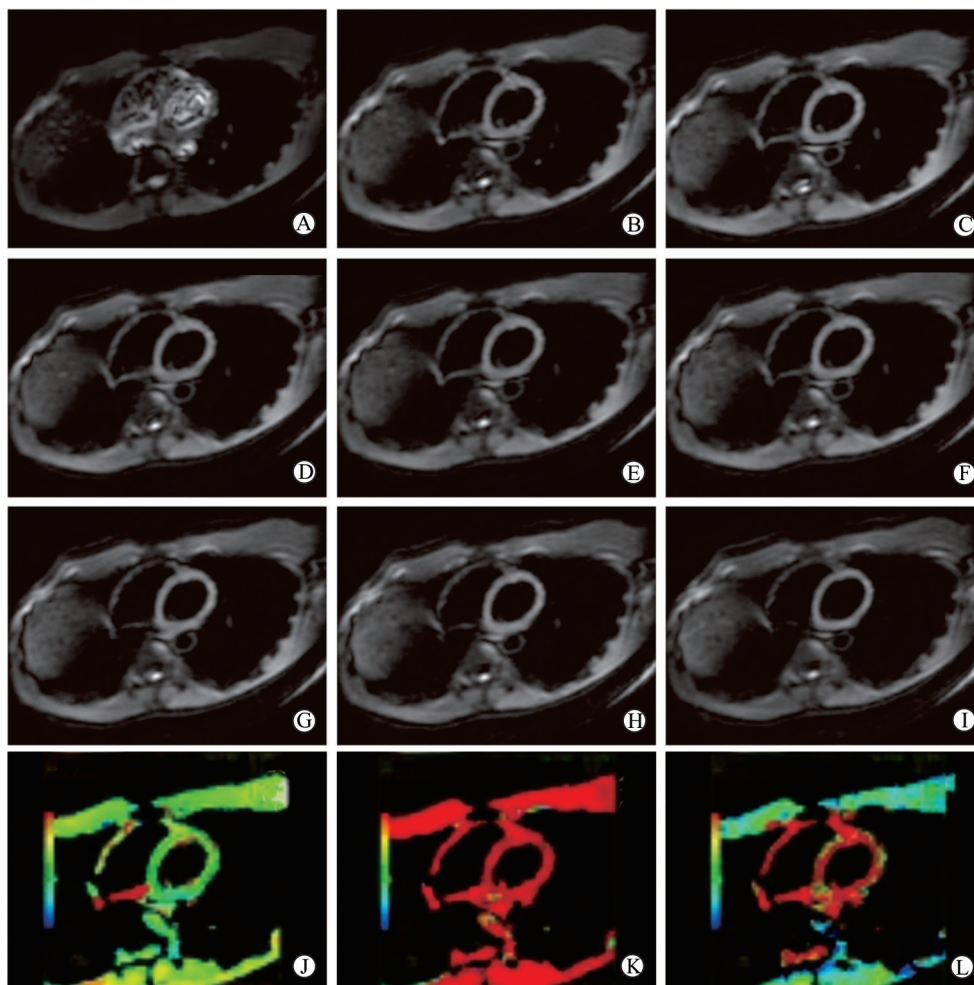


图 1 1 名正常志愿者 IVIM 图像

Fig 1 IVIM image of a normal volunteer

Male, 45 years old, healthy. A-I: Original images of IVIM at the left ventricular short-axis view (corresponding to *b* = 0, 20, 50, 80, 100, 120, 200, 300 and 500 s/mm², respectively); J-L: The pseudocolor images produced by biexponential mode using IVIM imaging (corresponding to ADC_{slow}, ADC_{fast} and *f*, respectively). The values of ADC_{slow}, ADC_{fast} and *f* are 1.52 × 10⁻³ mm²/s, 0.16 mm²/s and 0.30, respectively. IVIM: Intravoxel incoherent motion; ADC_{slow}: Slow apparent diffusion coefficient; ADC_{fast}: Fast apparent diffusion coefficient; *f*: Fraction of ADC_{fast}

3 讨论

20 世纪 80 年代, Le Bihan 等^[3]首次提出了 IVIM 成像理论, 即活体生物组织内体素运动包括 2 个层次: 水分子的扩散运动和血液微循环的灌注

运动。近年来, IVIM 技术已经被广泛地应用在多种组织与器官疾病的评估中, 如肝脏^[4]、乳腺^[5]、子宫^[6]等。心脏周期性运动、呼吸运动、胃肠道蠕动等都会导致图像出现伪影和 (或) 信号丢失, 这一直是心脏 IVIM 成像的一大挑战。

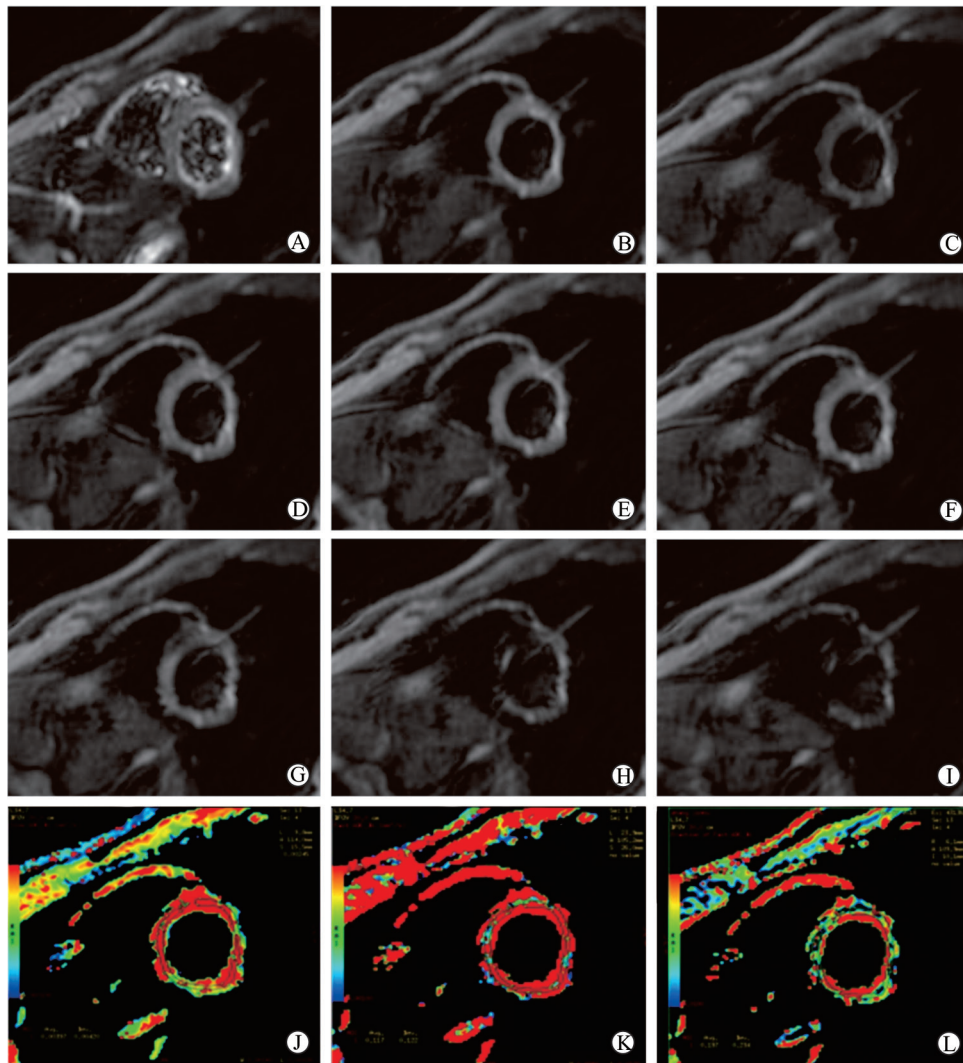


图2 1例高血压患者IVIM图像

Fig 2 IVIM image of a hypertension patient

Male, 33 years old, hypertension for 7 years (blood pressure before cardiac magnetic resonance imaging is 150/110 mmHg [1 mmHg=0.133 kPa]). A-I: Original images of IVIM at the left ventricular short-axis view (corresponding to $b=0, 20, 50, 80, 100, 120, 200, 300$ and 500 s/mm^2 , respectively); J-L: The pseudocolor images produced by biexponential mode using IVIM imaging (corresponding to $\text{ADC}_{\text{slow}}, \text{ADC}_{\text{fast}}$ and f , respectively). The values of $\text{ADC}_{\text{slow}}, \text{ADC}_{\text{fast}}$ and f are $3.84 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}, 0.10 \text{ m}^2/\text{s}$ and 0.27 , respectively. IVIM: Intravoxel incoherent motion; ADC_{slow} : Slow apparent diffusion coefficient; ADC_{fast} : Fast apparent diffusion coefficient; f : Fraction of ADC_{fast}

目前,心脏IVIM成像仍处于探索阶段,公开发表的文献报道较少^[7]。国内学者李志伟等^[8]最初对11名正常人的心脏完成了IVIM成像的初步尝试,结果显示较好地控制被试者的呼吸和心率、选择恰当的成像参数,可以获得清晰的心肌多b值弥散加权图像。随后,刘明熙等^[9]对30名健康志愿者进行了心肌IVIM分析与研究,也得出了相似的结果。Mou等^[10]对心肌IVIM的分析与研究结果显示,正常志愿者心脏IVIM成像的成功率可达74.51% (76/102),患有心肌微循环灌注损伤疾病的患者中其成功率可达61.11% (55/90),这些研

究均证明了心脏IVIM成像的可行性。

高血压增加了左心室的后负荷,而慢性血流动力学负荷会导致心肌损伤,导致心肌结构重塑,从而促进心功能、灌注和电活动的改变,这些改变会对高血压心性脏病的临床演变产生不利影响,最终进展成心力衰竭。本研究结果显示,高血压患者的左心室结构参数 LV_{mass} 与功能参数EF、CO均高于正常志愿者,其原因是因为机体为了满足诸器官血流动力学而处于代偿阶段,从而使心肌组织发生重构,最终导致左心室的EF、CO和心肌质量增加^[11]。

本研究对心肌 IVIM 各参数的一致性进行研究, 结果显示左心室整体心肌 IVIM 各参数 ADC_{fast} 、 ADC_{slow} 、 f 值在不同医师或同一位医师多次测量之间均有良好的一致性 (ICC 均 >0.80)。Moulin 等^[12]对 10 名正常志愿者的心脏 IVIM 各参数进行定量分析, 结果显示参数 f 值和 ADC_{slow} 都具有较高的可重复性和准确性, 而 ADC_{fast} 具有较好的准确性 (偏差校正系数 C_b 为 0.935), 可重复性略差 ($r=0.697$)。Mou 等^[10]分别测量正常组与疾病组的 IVIM 参数, 结果表明 3 个参数 f 值、 ADC_{slow} 、 ADC_{fast} 在观察者间及观察者内均具有较好的可重复性及一致性 (ICC 均 >0.8)。这些研究结果与本研究结果相符。

国外学者 Callot 等^[13]在动物体内注入腺苷后, 心肌的 ADC_{fast} 和 f 值均增加, 其中 ADC_{fast} 值增加更显著 (25%), 提示 ADC_{fast} 是反映心肌微循环情况的重要参数, 其与毛细血管长度及血液流速有关。由于高血压导致冠状动脉微血管稀疏、冠状动脉血流储备减少, 影响心肌微循环, 因此对高血压患者早期定量评估与监测心肌微循环十分必要。本研究利用 IVIM 技术对高血压患者与正常志愿者的微循环指标进行对照研究, 结果显示高血压患者的 ADC_{fast} 低于正常志愿者, 差异有统计学意义 ($P=0.003$), 而 ADC_{slow} 、 f 值差异均没有统计学意义。这一结果说明高血压患者可能存在心肌血流灌注减低, ADC_{fast} 参数为高血压患者心肌微循环的定量评价提供了一个新的指标。

综上所述, IVIM 技术能够用于高血压心肌微循环的定量评估。高血压患者的 ADC_{fast} 低于正常志愿者, 可作为定量评价高血压患者心肌微循环的一个指标, 但仍需更大样本量的研究深入探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 刘洋, 旷满华, 刘也, 杨青廷, 谢新鑫, 让蔚清. 中国儿童青少年高血压患病率的 Meta 分析[J]. 中国儿童保健杂志, 2017, 25: 59-62, 103.
- [2] MORENO M U, EIROS R, GAVIRA J J, GALLEGO C, GONZÁLEZ A, RAVASSAS, et al. The hypertensive myocardium: from microscopic lesions to clinical complications and outcomes[J]. *Med Clin North Am*, 2017, 101: 43-52.
- [3] LE BIHAN D, BRETON E, LALLEMAND D, GRENIER P, CABANIS E, LAVAL-JEANTET M. MR imaging of intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders[J]. *Radiology*, 1986, 161: 401-407.
- [4] LUO M, ZHANG L, JIANG X H, ZHANG W D. Intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging: evaluation of the differentiation of solid hepatic lesions[J]. *Transl Oncol*, 2017, 10: 831-838.
- [5] LIU C, LIANG C, LIU Z, ZHANG S, HUANG B. Intravoxel incoherent motion (IVIM) in evaluation of breast lesions: comparison with conventional DWI[J/OL]. *Eur J Radiol*, 2013, 82: e782-e789. doi: 10.1016/j.ejrad.2013.08.006.
- [6] WINFIELD J M, ORTON M R, COLLINS D J, IND T E, ATTYGALLE A, HAZELL S, et al. Separation of type and grade in cervical tumours using non-monponential models of diffusion-weighted MRI[J]. *Eur Radiol*, 2017, 27: 627-636.
- [7] DELATTRE B M, VIALON M, WEI H, ZHU Y M, FEIWEIER T, PAI V M, 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: 662-670.
- [8] 李志伟, 袁思殊, 黄璐, 马晓玲, 夏黎明. 心肌磁共振多 b 值 DWI 的初步探讨[J]. *放射学实践*, 2013, 3: 337-340.
- [9] 刘明熙, 张挽时, 张子衡, 孟利民, 龚万洋, 刘洁, 等. 多个低 b 值 DWI 技术在心脏成像中的初步研究[J]. *中国医疗设备*, 2016, 31: 42-47.
- [10] MOU A, ZHANG C, LI M, JIN F, SONG Q, LIU A, et al. Evaluation of myocardial microcirculation using intravoxel incoherent motion imaging[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 46: 1818-1828.
- [11] MAVROGENI S, KATSI V, VARTELA V, NOUTSIAS M, MARKOUSIS-MAVROGENIS G, KOLOVOU G, et al. The emerging role of Cardiovascular Magnetic Resonance in the evaluation of hypertensive heart disease[J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2017, 17: 4-10.
- [12] MOULIN K, CROISILLE P, FEIWEIER T, DELATTRE B M, WEI H, ROBERT B, 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: 70-82.
- [13] CALLOT V, BENNETT E, DECKING U K, BALABAN R S, WEN H. *In vivo* study of microcirculation in canine myocardium using the IVIM method[J]. *Magn Reson Med*, 2003, 50: 531-540.