

# 心脏磁共振室间隔曲率对成人房间隔缺损肺动脉高压的诊断价值

张宝美<sup>1</sup>, 胡春峰<sup>2</sup>, 程守全<sup>1</sup>, 张诗文<sup>1</sup>, 邱萍<sup>3</sup>, 梁妍<sup>1</sup>, 王诚<sup>1\*</sup>

(1. 徐州医科大学附属第一医院心内科, 江苏 徐州 221002; 2. 徐州医科大学附属医院影像科;  
3. 淮安市第一人民医院心内科, 江苏 淮安 223001)

**摘要:**目的 运用心脏磁共振(CMR)分析室间隔形态与右心导管检查指标的相关性, 评估室间隔曲率( $C_{IVS}$ )对肺动脉高压(PAH)患者的诊断价值。方法 回顾性分析32例成人房间隔缺损患者的右心导管及CMR数据。根据平均肺动脉压力(mPAP)是否 $\geq 25$  mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)分成2组: 肺动脉高压组(PAH组)和肺动脉压力正常组(NPAH组)。比较2组患者CMR参数, 分析 $C_{IVS}$ 与CMR参数、右心导管指标的相关性, 采用受试者工作特征曲线(ROC曲线)分析 $C_{IVS}$ 判断PAH的敏感度及特异度。结果 32例成人房间隔缺损患者中有16例患者合并肺动脉高压, 与NPAH组相比, PAH组舒张末期 $C_{IVS}$ 降低( $P < 0.01$ ), 而收缩末期 $C_{IVS}$ 的差异无统计学意义。相关性分析显示, 舒张末期 $C_{IVS}$ 与mPAP( $r = -0.85, P < 0.01$ )、肺动脉收缩压( $r = -0.75, P < 0.01$ )、肺动脉舒张压( $r = -0.84, P < 0.01$ )显著相关。ROC曲线显示, 舒张末期 $C_{IVS}$ 诊断PAH具有很高的效能, ROC曲线下面积(AUC)=0.94, 特异度为94%, 敏感度为81%。结论 在成人房间隔缺损的患者中, 舒张末期 $C_{IVS}$ 可作为无创评估PAH的重要指标。

**关键词:**心脏磁共振; 室间隔曲率; 肺动脉高压; 右心导管术

中图分类号: R541.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-3882(2021)04-0261-06

DOI: 10.3969/j.issn.2096-3882.2021.04.006

## The value of interventricular septal curvature in the diagnosis of adult pulmonary artery hypertension associated with atrial septal defect by cardiac magnetic resonance

ZHANG Baomei<sup>1</sup>, HU Chunfeng<sup>2</sup>, CHENG Shouquan<sup>1</sup>, ZHANG Shiwen<sup>1</sup>, QIU Ping<sup>3</sup>, LIANG Yan<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1\*</sup>

(1. Department of Cardiology, the Affiliated Hospital of Xuzhou Medical University, Xuzhou, Jiangsu 221002, China;  
2. Department of Imaging, the Affiliated Hospital of Xuzhou Medical University;  
3. Department of Cardiology, Huai'an First People's Hospital, Huai'an, Jiangsu 223001)

**Abstract: Objective** To analyze the correlation between interventricular septum morphology and right heart catheterization indexes by cardiac magnetic resonance (CMR), and to evaluate the use of interventricular septum curvature ( $C_{IVS}$ ) in diagnosis of patients with pulmonary artery hypertension (PAH). **Methods** Retrospective analysis was performed where RHC and CMR data were collected from 32 adult patients with atrial septal defect (ASD). According to their mean pulmonary artery pressure (mPAP), the patients were divided into two groups: a PAH group ( $\geq 25$  mmHg) and a non-PAH (NPAH) group. Both groups were compared for CMR parameters, and the correlation between  $C_{IVS}$  and CMR parameters and RHC measurements was analyzed. The receiver operating characteristic (ROC) curve was used to analyze the use of  $C_{IVS}$  for detection of PAH. **Results** In the current study, there were 16 ASD patients with PAH. Compared with the NPAH group, end-diastolic  $C_{IVS}$  ( $dC_{IVS}$ ) decreased in the PAH group ( $P < 0.01$ ); and no statistical difference was found in end systolic  $C_{IVS}$  between the two groups. There were significant correlations between  $dC_{IVS}$  and mPAP ( $r = -0.85, P < 0.01$ ), between  $dC_{IVS}$  and systolic pulmonary artery pressure (sPAP) ( $r = -0.75, P < 0.01$ ), between  $dC_{IVS}$  and diastolic pulmonary artery pressure (dPAP) ( $r = -0.84, P < 0.01$ ). The ROC showed that  $dC_{IVS}$  was effective for diagnosis of PAH. The AUC was 0.94, with a specificity of 94% and a sensitivity of 81%. **Conclusions** For adult ASD with PAH,  $dC_{IVS}$  can be used as an important index for noninvasive evaluation of PAH.

**Key words:** cardiac magnetic resonance; interventricular septum curvature; pulmonary artery hypertension; right heart catheterization

\* 通信作者, E-mail: wangcxz@163.com

肺动脉高压 (pulmonary arterial hypertension, PAH) 主要累及肺小血管,引起肺血管阻力增加、肺动脉压力 (pulmonary artery pressure, PAP) 升高,导致右心室 (right ventricle, RV) 负荷增加及功能障碍,最终出现右心室功能衰竭,甚至全心衰竭<sup>[1]</sup>。因此,准确评估 PAP 和右心室形态、功能,对 PAH 患者的治疗选择、疗效评价及预后判断都具有重要意义。

目前右心导管检查 (right heart catheterization, RHC) 仍是诊断 PAH 的金标准,但其是有创性操作,缺乏操作经验可能会导致严重并发症,甚至死亡<sup>[2-3]</sup>,并且提供 PAH 的病因及心脏重塑的信息有限<sup>[4]</sup>,临床上应用范围较小。虽然多普勒超声心动图在评估 PAP、右心室大小和收缩功能及筛查 PAH 方面具有重要作用<sup>[5]</sup>,但是,对于轻度 PAH 患者,超声心动图评估右心室大小、功能不全及三尖瓣反流速度的敏感性较低<sup>[6]</sup>。

心脏磁共振 (cardiovascular magnetic resonance, CMR) 作为无创性评估 PAH 的金标准,不仅可以提供心脏形态及功能的信息,还可以随访 PAH 患者的治疗效果及预后<sup>[7-8]</sup>。

既往研究显示,包括室间隔形态<sup>[9]</sup>和心室质量指数 (ventricular mass index, VMI)、右心室容积<sup>[10]</sup>等 CMR 参数与肺动脉平均压力 (mean pulmonary artery pressure, mPAP) 间有显著相关性。然而,这些研究主要集中在特发性、结缔组织病相关性 PAH 患者中,对先天性心脏病相关性 PAH 患者的研究相对较少。

本研究旨在通过 CMR 量化室间隔形变程度,分析其与 mPAP 的相关性,进一步判断室间隔曲率 (interventricular septum curvature,  $C_{IVS}$ ) 对成人房间隔缺损 (atrial septal defect, ASD) 相关性 PAH 的诊断价值。

## 1 资料和方法

**1.1 研究对象** 收集徐州医科大学附属医院 2011 年 7 月至 2019 年 7 月行超声心电图检查确诊为先天性房间隔缺损,并行 CMR 检查的 32 例患者,排除了冠心病、中重度心脏瓣膜病、慢性阻塞性肺疾病等其他心肺疾病,CMR 影像资料短轴电影序列缺失者排除在外。所有患者均在 CMR 检查后 1~3 d 内完成右心导管检查。

**1.2 心脏磁共振扫描序列和参数** 采用 Philips Achieva 3.0T MR 扫描仪,心脏 5 通道相控阵表面线圈,应用回顾性心电门控,屏气状态下扫描。平扫范

围包括心脏短轴 (从心尖至心底)。心脏电影成像:采用平衡稳态快速成像梯度回波序列 (fast imaging employing steady-state acquisition, FIESTA),视野为 320 mm × 320 mm,厚度 8 mm,矩阵 160 × 160, TE/TR = 1.5/3.1 ms,反转角 60°,每层心动周期扫描相数为 30。

### 1.3 数据收集统计

**1.3.1 图像处理与参数收集** CMR 数据导入后处理软件 (CVI42, Circle Cardiovascular Imaging Inc., Calgary, Canada) 进行心室形态学及功能学参数的计算。选择短轴位 FIESTA 序列图像,在收缩末期与舒张末期,自心尖到心底逐层手动描记左心室和右心室的心内膜和心外膜轮廓。收缩末期和舒张末期分别定为心室容积达最小、最大时的时相。流出道容积计算至心室容积内,乳突肌和肌小梁计入心室容积,其质量排除在心室质量外,室间隔质量算入左心室 (left ventricle, LV) 心肌质量。软件自动分析计算,经体表面积 (body surface area, BSA) 校正,分别得到右心室和左心室的舒张末期容积指数 (end-diastolic volume index, EDVI)、收缩末期容积指数 (end-systolic volume index, ESVI)、每搏输出指数 (stroke volume index, SVI)、心指数 (cardiac index, CI)、射血分数 (ejection fraction, EF)、心肌质量指数 (myocardial mass index, MMI) 及心室质量指数 (ventricular mass index, VMI)。BSA 估算公式为:  $BSA (m^2) = 0.0061 \times \text{身高} (cm) + 0.0128 \times \text{体重} (kg) - 0.1529$ 。

**1.3.2 室间隔曲率** 根据不在同一条直线的三点可确定一个圆的原理,选择 FIESTA 短轴层面,在舒张末期中间层面,取室间隔上下插入部及室间隔 (interventricular septum, IVS) 上任意一点,所选三点确定的圆的半径作为 IVS 半径 (IVS radius,  $R_{IVS}$ )。室间隔曲率测量 2 次,2 次测量时间间隔为 1 d。室间隔曲率计算详细过程参考 Roeleveld 等<sup>[9]</sup>计算室间隔曲率的计算方式,室间隔曲率  $C_{IVS} = 1/R_{IVS}$ 。 $C_{IVS}$  的正负值与室间隔的位置有关,室间隔向右侧突出时为正值,凹向左侧时为负值<sup>[9]</sup>。

**1.4 右心导管检查及分组** 局部麻醉状态下,选择右股静脉,穿刺成功后,采用 6F MPA2 导管进行右心导管检查,分别测量肺动脉收缩压 (systolic pulmonary artery pressure, sPAP)、肺动脉舒张压 (diastolic pulmonary artery pressure, dPAP)、mPAP、右心室平均压 (mean right ventricle pressure, mRVP)。以  $mPAP \geq 25 \text{ mmHg}$  ( $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$ ) 为标准<sup>[5]</sup>,

将房间隔缺损患者分成 2 组,肺动脉高压组(PAH 组)和非肺动脉高压组(NPAH 组)。

1.5 统计学方法 采用 SPSS22.0 统计软件进行统计学分析,数据以均数  $\pm$  标准差( $\bar{x} \pm s$ )或者频数与百分数( $n/\%$ )表示,计量资料的比较采用两独立样本  $t$  检验,采用 Pearson 相关分析 CMR 参数与 RHC 指标的相关性,ROC 曲线分析  $C_{IVS}$  诊断 PAH 的敏感度及特异度,并计算曲线下面积(AUC),确定截断

值。 $P < 0.05$  认为差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 2 组患者一般情况及右心导管检查指标比较 见表 1。PAH 组 16 例,其中女性 12 例(75.0%); NPAH 组 16 例,其中女性 13 例(81.3%)。PAH 组患者 sPAP、dPAP、mPAP、mRVP 高于 NPAH 组,差异有统计学意义( $P$  均  $< 0.05$ )。

表 1 2 组患者一般情况及右心导管检查指标比较( $n = 16, \bar{x} \pm s$ )

指标	NPAH 组	PAH 组	$P$ 值
年龄(岁)	38.06 $\pm$ 14.17	43.88 $\pm$ 12.47	0.23
BSA( $m^2$ )	1.62 $\pm$ 0.13	1.62 $\pm$ 0.12	0.94
sPAP(mmHg)	32.31 $\pm$ 3.48	51.25 $\pm$ 16.47	$< 0.01$
dPAP(mmHg)	11.63 $\pm$ 3.54	20.94 $\pm$ 5.08	$< 0.01$
mPAP(mmHg)	18.44 $\pm$ 2.78	31.13 $\pm$ 1.92	$< 0.01$
mRVP(mmHg)	16.50 $\pm$ 7.76	24.27 $\pm$ 4.63	$< 0.01$

2.2 2 组患者 CMR 参数比较 见表 2。PAH 组的 RVEDVI、RVESVI、RVSVI、RVCI、RVMMI 及 VMI 高于 NPAH 组( $P$  均  $< 0.05$ ),而 2 组间 RVEF 及左心

室功能指标(LVEDVI、LVESVI、LVSVI、LVMMI)的差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。

表 2 2 组患者左、右心室 CMR 参数比较( $n = 16, \bar{x} \pm s$ )

指标	NPAH 组	PAH 组	$P$ 值
RVEDVI( $ml/m^2$ )	124.51 $\pm$ 35.83	177.68 $\pm$ 28.58	$< 0.01$
RVESVI( $ml/m^2$ )	71.45 $\pm$ 22.93	103.44 $\pm$ 23.63	$< 0.01$
RVSVI( $ml/m^2$ )	51.95 $\pm$ 23.81	74.24 $\pm$ 21.65	0.01
RVCI( $L/min \cdot m^2$ )	3.74 $\pm$ 1.92	5.60 $\pm$ 1.68	0.01
RVMMI( $g/m^2$ )	17.26 $\pm$ 6.79	24.55 $\pm$ 7.94	0.01
VMI	0.45 $\pm$ 0.21	0.62 $\pm$ 0.21	0.03
RVEF(%)	42.23 $\pm$ 9.84	41.79 $\pm$ 10.35	0.90
LVEDVI( $ml/m^2$ )	73.43 $\pm$ 16.09	71.39 $\pm$ 11.53	0.68
LVESVI( $ml/m^2$ )	32.77 $\pm$ 9.20	33.69 $\pm$ 15.96	0.84
LVSVI( $ml/m^2$ )	40.76 $\pm$ 13.13	37.78 $\pm$ 10.52	0.49
LVMMI( $g/m^2$ )	39.60 $\pm$ 10.80	40.03 $\pm$ 6.63	0.89
LVEF(%)	55.83 $\pm$ 8.88	53.75 $\pm$ 14.11	0.62

RVEDVI:右室舒张末期容积指数;RVESVI:右室收缩末期容积指数;RVSVI:右室每搏输出指数;RVCI:右室心指数;RVMMI:右室心肌质量指数;RVEF:右室射血分数;LVEDVI:左室舒张末期容积指数;LVESVI:左室收缩末期容积指数;LVSVI:左室每搏输出指数;LVMMI:左室心肌质量指数;LVEF:左室射血分数

2.3 2组患者室间隔曲率比较 见表3。PAH组的舒张末期室间隔曲率( $dC_{IVS}$ )明显降低( $P < 0.01$ ),虽然收缩末期室间隔曲率( $sC_{IVS}$ )亦呈降低趋势,但2组间差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。

表3 2组患者室间隔曲率比较( $n = 16, \bar{x} \pm s$ )

指标	NPAH组	PAH组	P值
$dC_{IVS} (cm^{-1})$	$0.28 \pm 0.03$	$0.22 \pm 0.03$	$<0.01$
$sC_{IVS} (cm^{-1})$	$0.32 \pm 0.05$	$0.25 \pm 0.14$	0.10

2.4 CMR参数与PAP的相关性 见表4。RVEDVI、RVESVI及RVMMI、VMI与mPAP、dPAP、sPAP呈正相关( $P < 0.01$ ), $dC_{IVS}$ 、 $sC_{IVS}$ 与mPAP、dPAP、sPAP呈负相关( $P < 0.01$ )。

2.5 CMR参数诊断PAH的效能 ROC曲线分析显示,以 $mPAH \geq 25 mmHg$ 作为PAH诊断的标准, $dC_{IVS}$ 诊断PAH的效能最高,AUC = 0.94,截断值为 $0.251 cm^{-1}$ (特异度94%,敏感度81%)。见表5和图1。

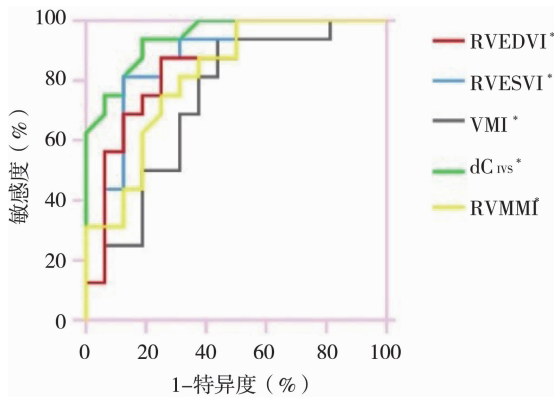
表4 CMR参数与PAP的相关性

指标	mPAP		dPAP		sPAP	
	r值	P值	r值	P值	r值	P值
RVEDVI	0.62	$<0.01$	0.58	$<0.01$	0.58	$<0.01$
RVESVI	0.68	$<0.01$	0.66	$<0.01$	0.64	$<0.01$
VMI	0.70	$<0.01$	0.61	$<0.01$	0.71	$<0.01$
RVMMI	0.72	$<0.01$	0.59	$<0.01$	0.74	$<0.01$
$dC_{IVS}$	-0.85	$<0.01$	-0.84	$<0.01$	-0.75	$<0.01$
$sC_{IVS}$	-0.57	$<0.01$	-0.48	$<0.01$	-0.58	$<0.01$
RVSVI	0.29	0.11	0.28	0.19	0.27	0.14
RVCI	0.42	0.02	0.33	0.09	0.42	0.02

表5 CMR参数诊断PAH的效能

指标	特异度 (%)	敏感度 (%)	AUC
$dC_{IVS}$	94	81	0.94*
VMI	56	94	0.73*
RVMMI	81	69	0.82*
RVEDVI	88	81	0.87*
RVESVI	75	88	0.85*

\*.  $P < 0.05$



\*.  $P < 0.05$

图1 CMR各参数预测PAH的效能

### 3 讨论

研究表明CMR是评估右心室功能最佳的无创方式<sup>[11]</sup>,对于右心室形态及功能参数的测量,例如右心室质量、RVEDVI、RVEF及RVSVI,CMR的准确性高、可重复性好<sup>[12]</sup>。目前,首选手动测量右心室容量及质量的方式,其观察者一致性表现较好<sup>[13]</sup>。既往研究显示<sup>[14]</sup>,与对照组相比,PAH患者的RVEDVI、RVMMI及VMI升高,而RVEF、RVSVI明显降低。与之不同的是,本研究中RVEF无明显改变,RVSVI升高,导致该结果的可能原因是:在房间隔缺损的患者中,右心室心尖部的收缩功能增加<sup>[15]</sup>,其次右心室的整体纵向应力与心输出量存在正性相关性,纵向应力增加,右心室心输出量亦增加,其他潜在机制如径向和周向应力维持心功能需进一步的研究<sup>[16]</sup>。

长期右心室负荷增加,心肌代偿性肥厚,右心室心肌质量增加,VMI可以反映右心室心肌肥厚的程度,定义为右心室质量与左心室质量之比。Saba等<sup>[17]</sup>研究发现VMI与mPAP存在相关性,提出通过VMI评估mPAP是一种可行性及准确性较高的方法。此外,Swift等<sup>[18]</sup>指出CMR形态学和右心室功

能指标与 mPAP 有相关性,且发现 VMI 和 RVMMI 均与 mPAP 呈线性关系。本研究也得出相似关系, VMI、RVMMI 与 mPAP 有较强的相关性,在容量负荷长期的作用下,右心室压力逐渐升高,心肌质量逐渐增加,提示心肌肥厚是对压力的适应性改变。Lungu 等<sup>[19]</sup>在应用 CMR 无创评估可疑 PAH 患者中,发现 VMI、RVMMI 诊断 PAH 的价值相对较高,本研究中,大部分 PAH 患者肺动脉压轻度升高, VMI、RVMMI 的诊断价值较其他 CMR 指标低。而且,目前还没有可靠的自动测量右心室质量的方法,需要人工描绘出右心室外膜轮廓,这是一个耗费时间的过程,右心室游离壁较薄时,不易准确地测量右心室质量<sup>[17, 20]</sup>。

正常人在整个心动周期内左心室压始终高于右心室压<sup>[21]</sup>,存在正性的跨室间隔压力梯度,所以,室间隔始终向右心室侧弓形突出,左心室近似圆形。当肺动脉压或者右心室压力(容积)逐渐升高时,室间隔向左心室移位及挤压成扁平状,左心室呈“D”形。当右心室舒张压高于左心室舒张压 5 mmHg 以上时,跨室间隔压力梯度逆转,室间隔凸向左心室侧<sup>[9]</sup>。Roeleveld 等<sup>[9]</sup>发现 sPAP 与  $C_{IVS}$  相关性很强 ( $r=0.77, P<0.01$ ),得到 sPAP 与室间隔曲率的关系:  $sPAP = -114.7 \times \text{室间隔曲率} + 67.2$ ,认为  $C_{IVS}$  可作为预测 PAP 的指标,他们同时也指出 sPAP 超过 67 mmHg 以上时,室间隔偏向左心室侧,室间隔曲率呈负值。王丹等<sup>[22]</sup>通过对 PAH 患者的磁共振影像资料分析,发现随着 mPAP 升高,室间隔逐渐向左心室偏移。Johns 等<sup>[10]</sup>发现, mPAP 与室间隔角度存在较强相关性,进一步揭示了 IVS 变形程度与 mPAP 的关系。因此, IVS 变形程度能反映 mPAP 高低。mPAP 轻度升高时, IVS 在舒张末期或者收缩末期轻度变形; mPAP 升高达到中度时,能观察到 IVS 明显向左室移位,甚至能看见呈“D”形的左心室; mPAP 重度升高时, IVS 形态逆转及凹向左心室,且能够直接诊断出 PAH<sup>[9, 22-24]</sup>。本研究中,通过  $C_{IVS}$  量化 IVS 变形程度, CMR 评估 IVS 变形程度更加准确。在轻度 PAH 患者中,  $C_{IVS}$  与 mPAP 存在很强的相关性,随着 PAP 升高, IVS 逐渐向左侧移位,  $C_{IVS}$  逐渐变小,提示  $C_{IVS}$  反映右心室与左心室的压力关系。

对可疑 PAH 患者的诊断,  $dC_{IVS}$  具有很高的诊断价值,其次为 RVEDVI、RVESVI、RVMMI 及 VMI。以  $dC_{IVS} \leq 0.25 \text{ cm}^{-1}$  为截断值,诊断 PAH 的特异度为 94%, 敏感度为 81%。表明  $dC_{IVS}$  可作为评估 mPAP

的重要指标。

已有研究显示<sup>[25-26]</sup>,右心室后负荷增加时,收缩期室间隔变形明显,而对于右心室前负荷,即容量负荷增加的 PAH 患者,室间隔变形主要表现在舒张期。本研究中的患者均为 ASD,左心房向右心房分流,肺动脉压正常或者轻、中度升高,肺血管阻力升高不显著,右心室舒张末期容量体积增大,以前负荷增加为主,引起舒张末期右心室压力升高,室间隔向左移位。因此,在分析  $C_{IVS}$  时,研究者发现,  $C_{IVS}$  差异在舒张末期有统计学意义,而收缩末期的变化与对照组无明显差异。

本研究存在一定局限性,样本量较少,其次,排除了室间隔缺损、动脉导管未闭及肺部疾病导致的 PAH,导致结论适应度存在一定局限性。

总之, CMR 能够无创评估房间隔缺损患者的右心室形态与功能,基于 CMR 推导的  $dC_{IVS}$  与肺动脉压力存在显著相关性,在诊断 ASD 相关性 PAH 方面亦表现出较高的准确性,因此,  $dC_{IVS}$  可作为无创评估成人 ASD 相关性 PAH 的重要指标。

#### 参考文献:

- [1] Sanz J, Sánchez - Quintana D, Bossone E, et al. Anatomy, function, and dysfunction of the right ventricle: JACC state - of - the - art review [J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73(12): 1463 - 1482.
- [2] Bane O, Shah SJ, Cuttica MJ, et al. A non - invasive assessment of cardiopulmonary hemodynamics with MRI in pulmonary hypertension [J]. Magn Reson Imaging, 2015, 33(10): 1224 - 1235.
- [3] Hoepfer MM, Lee SH, Voswinkel R, et al. Complications of right heart catheterization procedures in patients with pulmonary hypertension in experienced centers [J]. J Am Coll Cardiol, 2006, 48(12): 2546 - 2552.
- [4] Meyer GMB, Spilimbergo FB, Atmayer S, et al. Multiparametric magnetic resonance imaging in the assessment of pulmonary hypertension: initial experience of a one - stop study [J]. Lung, 2018, 196(2): 165 - 171.
- [5] Galie N, Humbert M, Vachiery JL, et al. 2015 ESC/ERS guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: the joint task force for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension of the European society of cardiology (ESC) and the European respiratory society (ERS): endorsed by: association for European paediatric and congenital cardiology (AEPC), international society for heart and lung transplantation (ISHLT) [J]. Eur Heart J, 2016, 37(1): 67 - 119.
- [6] Amsallem M, Sternbach JM, Adigopula S, et al. Addressing the controversy of estimating pulmonary arterial pressure by echocardiography [J]. J Am Soc Echocardiogr, 2016, 29(2): 93 - 102.
- [7] Grünig E, Peacock AJ. Imaging the heart in pulmonary hypertension: an update [J]. Eur Respir Rev, 2015, 24(138): 653 -

- 664.
- [8] Baggen VJM, Leiner T, Post MC, et al. Cardiac magnetic resonance findings predicting mortality in patients with pulmonary arterial hypertension: a systematic review and meta-analysis [J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(11): 3771-3780.
- [9] Roeleveld RJ, Marcus JT, Faes TJC, et al. Interventricular septal configuration at mr imaging and pulmonary arterial pressure in pulmonary hypertension [J]. *Radiology*, 2005, 234(3): 710-717.
- [10] Johns CS, Kiely DG, Rajaram S, et al. Diagnosis of pulmonary hypertension with cardiac MRI: derivation and validation of regression models [J]. *Radiology*, 2019, 290(1): 61-68.
- [11] 郭晓娟, 刘明熙, 马展鸿, 等. 无创技术评估肺动脉高压患者右心功能的相关性分析 [J]. *中华医学杂志*, 2018, 98(43): 3528-3531.
- [12] Göransson C, Vejstrup N, Scheike T, et al. Implications of cardiac variability with cardiovascular magnetic resonance imaging for calculating trial sample size in pulmonary arterial hypertension [J]. *Int J Cardiol*, 2018, 257: 332-338.
- [13] Yilmaz P, Wallecan K, Kristanto W, et al. Evaluation of a semi-automatic right ventricle segmentation method on short-axis MR images [J]. *J Digit Imaging*, 2018, 31(5): 670-679.
- [14] Saunders LC, Johns CS, Stewart NJ, et al. Diagnostic and prognostic significance of cardiovascular magnetic resonance native myocardial T1 mapping in patients with pulmonary hypertension [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1): 1-11.
- [15] Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Redington A, et al. Differential effect of right ventricular dilatation on myocardial deformation in patients with atrial septal defects and patients after tetralogy of Fallot repair [J]. *Int J Cardiol*, 2013, 168(2): 803-810.
- [16] Stephensen SS, Ostfeld E, Steding-Ehrenborg K, et al. Alterations in ventricular pumping in patients with atrial septal defect at rest, during dobutamine stress and after defect closure [J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2018, 38(5): 830-839.
- [17] Saba TS, Foster J, Cockburn M, et al. Ventricular mass index using magnetic resonance imaging accurately estimates pulmonary artery pressure [J]. *Eur Respir J*, 2002, 20(6): 1519-1524.
- [18] Swift AJ, Rajaram S, Condliffe R, et al. Pulmonary artery relative area change detects mild elevations in pulmonary vascular resistance and predicts adverse outcome in pulmonary hypertension [J]. *Investig Radiol*, 2012, 47(10): 571-577.
- [19] Lungu A, Swift AJ, Capener D, et al. Diagnosis of pulmonary hypertension from magnetic resonance imaging-based computational models and decision tree analysis [J]. *Pulm Circ*, 2016, 6(2): 181-190.
- [20] Hagger D, Condliffe R, Woodhouse N, et al. Ventricular mass index correlates with pulmonary artery pressure and predicts survival in suspected systemic sclerosis-associated pulmonary arterial hypertension [J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2009, 48(9): 1137-1142.
- [21] Guzman PA, Maughan WL, Yin FC, et al. Transseptal pressure gradient with leftward septal displacement during the Mueller manoeuvre in man [J]. *Br Heart J*, 1981, 46(6): 657-662.
- [22] 王丹, 张璋, 杨帆, 等. 不同室间隔形态肺高血压患者的心室功能特点: CMR 初步研究 [J]. *中国肺癌杂志*, 2018, 21(5): 397-402.
- [23] Kim BS, Heo R, Shin J, et al. E/E' and D-shaped left ventricle severity in patients with increased pulmonary artery pressure [J]. *J Cardiovasc Imaging*, 2018, 26(2): 85-92.
- [24] Truong U, Patel S, Kheifets V, et al. Non-invasive determination by cardiovascular magnetic resonance of right ventricular-vascular coupling in children and adolescents with pulmonary hypertension [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2015, 17: 81.
- [25] Driessen MM, Hui W, Bijnens BH, et al. Adverse ventricular-ventricular interactions in right ventricular pressure load: Insights from pediatric pulmonary hypertension versus pulmonary stenosis [J/OL]. *Physiol Rep*, 2016, 4(11): e12833.
- [26] Ryan T, Petrovic O, Dillon JC, et al. An echocardiographic index for separation of right ventricular volume and pressure overload [J]. *J Am Coll Cardiol*, 1985, 5(4): 918-927.

收稿日期:2020-04-14 修回日期:2021-04-08

本文编辑:李昕