

• 临床研究 •

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2025.12.014

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250819.1353.012\(2025-08-19\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250819.1353.012(2025-08-19))

肺动脉高压患者右心室心肌做功参数与右心导管血流动力学参数的相关性研究*

杨云净¹,李 艳²,黄 玮^{1△}

(1. 重庆医科大学附属第一医院心血管内科,重庆 400016;2. 重庆医科大学附属康复医院心肺康复科,重庆 400016)

[摘要] **目的** 探讨超声心动图评估肺动脉高压(PAH)患者右心室心肌做功(RVMW)参数与右心导管(RHC)血流动力学参数的相关性。**方法** 回顾性分析 2021 年 3 月至 2022 年 9 月重庆医科大学附属第一医院 47 例疑诊 PAH 患者的临床资料。将静息状态下平均肺动脉压(mPAP) >20 mmHg、肺动脉楔压 ≤ 15 mmHg、肺血管阻力(PVR) >2 Wood 单位的研究对象纳入 PAH 组;无心腔结构异常且 mPAP ≤ 20 mmHg 的研究对象纳入对照组。测量和比较两组患者 RHC 血流动力学相关指标、超声心动图相关指标、RVMW 参数的差异。**结果** PAH 组右心室整体纵向应变(GLS)、右心室整体做功指数(GWI)、右心室整体有用功(GCW)、右心室整体无用功(GWW)、右心室整体阳性做功(GPW)、右心室整体收缩有用功(GSCW)高于对照组,e'值、TAPSE、右心室 S'波、右心室面积变化分数(RVFAC)、右心室整体做功效率(GWE)低于对照组,差异有统计学意义($P<0.05$)。两组患者右心室侧壁的 GWI、GCW、GPW、GSCW 均高于右心室室间隔($P<0.05$)。PAH 组患者 PVR 与右心室 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性($r=0.672,0.755,0.793,0.747,P<0.05$),与 GWW 有中等相关性($r=0.496,P<0.05$);RVSWI 与右心室 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性($r=0.782,0.765,0.764,0.773,P<0.05$),与 GWW 无相关性。侧壁心肌做功中,PVR 与 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性($r=0.612,0.715,0.744,0.700,P<0.05$);RVSWI 与 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性($r=0.781,0.721,0.789,0.789,P<0.05$),与 GWW 无相关性($r=0.148,P=0.500$)。室间隔心肌做功中,PVR 与 GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性($r=0.733,0.755,0.722,P<0.05$),与 GWI 及 GWW 有中等相关性($r=0.546,0.534,P<0.05$);RVSWI 与 GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性($r=0.761,0.746,0.735,P<0.001$),与 GWI 及 GWE 有中等相关性($r=0.564,-0.433,P<0.05$)。**结论** 超声心动图无创评估 RVMW 能更全面地评估心肌功能及 PAH 患者病理、生理特征。

[关键词] 肺动脉高压;超声心动图;心肌做功;右心室**[中图法分类号]** R541**[文献标识码]** A**[文章编号]** 1671-8348(2025)12-2804-07

Study on the correlation of right ventricular myocardial work parameters with invasive hemodynamic parameters in patients with pulmonary arterial hypertension*

YANG Yunjing¹,LI Yan²,HUANG Wei^{1△}

(1. Department of Cardiology, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China; 2. Department of Cardiopulmonary Rehabilitation, The Affiliated Rehabilitation Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the correlation between right ventricular myocardial work (RVMW) parameters and hemodynamic parameters of right heart catheterization (RHC) in patients with pulmonary arterial hypertension (PAH) evaluated by echocardiography. **Methods** A retrospective analysis was conducted on the clinical data of 47 patients with suspected PAH in The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University from March 2021 to September 2022. Subjects with a mean pulmonary arterial pressure (mPAP) >20 mmHg, pulmonary artery wedge pressure ≤ 15 mmHg, and pulmonary vascular resistance (PVR) >2 Wood units at rest were included in the PAH group; subjects with no intracardiac structural abnormalities and mPAP ≤ 20 mmHg were included in the control group. Hemodynamic parameters from

RHC, echocardiographic indicators, and RVMW parameters were measured and compared between the two groups. **Results** In the PAH group, right ventricular global longitudinal strain (GLS), right ventricular global work index (GWI), right ventricular global constructive work (GCW), right ventricular global wasted work (GWW), right ventricular global positive work (GPW), and right ventricular global systolic constructive work (GSCW) were higher than those in the control group, while e' value, TAPSE, right ventricular S' wave, right ventricular fractional area change (RVFAC), and right ventricular global work efficiency (GWE) were lower than those in the control group, with statistically significant differences ($P < 0.05$). In both groups, the GWI, GCW, GPW, and GSCW of the right ventricular free wall were higher than those of the interventricular septum ($P < 0.05$). In PAH patients, PVR showed a good correlation with right ventricular GWI, GCW, GPW, and GSCW ($r = 0.672, 0.755, 0.793, 0.747, P < 0.05$), and a moderate correlation with GWW ($r = 0.496, P < 0.05$); RVSWI showed a good correlation with right ventricular GWI, GCW, GPW, and GSCW ($r = 0.782, 0.765, 0.764, 0.773, P < 0.05$), and no correlation with GWW. In the free wall myocardial work, PVR showed a good correlation with GWI, GCW, GPW, and GSCW ($r = 0.612, 0.715, 0.744, 0.700, P < 0.05$); RVSWI showed a good correlation with GWI, GCW, GPW, and GSCW ($r = 0.781, 0.721, 0.789, 0.789, P < 0.05$), and no correlation with GWW ($r = 0.148, P = 0.500$). In the interventricular septal myocardial work, PVR showed a good correlation with GCW, GPW, and GSCW ($r = 0.733, 0.755, 0.722, P < 0.05$), and a moderate correlation with GWI and GWW ($r = 0.546, 0.534, P < 0.05$); RVSWI showed a good correlation with GCW, GPW, and GSCW ($r = 0.761, 0.746, 0.735, P < 0.001$), and a moderate correlation with GWI and GWE ($r = 0.564, -0.433, P < 0.05$). **Conclusion** Echocardiography non-invasively assessing RVMW can more comprehensively evaluate myocardial function as well as the pathological and physiological characteristics of PAH patients.

[Key words] pulmonary arterial hypertension; echocardiography; myocardial work; right ventricular

肺动脉高压 (pulmonary arterial hypertension, PAH) 是一种以肺血管阻力 (pulmonary vascular resistance, PVR) 增加、肺动脉压力升高为特征的疾病, 多数患者会进展到右心室衰竭甚至死亡^[1]。PAH 的发病率为 5.8/100 万人, 患病率为 (47.6~54.7)/百万人, 女性的发病率和患病率均高于男性^[2-3]。右心室功能是 PAH 患者临床表现及预后的主要决定因素, 从右心室功能障碍进展成为右心衰竭是较多患者的死亡原因。目前, 临床常用于评估右心室功能的超声心动图参数主要包括三尖瓣环收缩期位移 (tricuspid annular plane systolic excursion, TAPSE)、右心室面积变化分数 (right ventricular fractional area change, RVFAC)、三尖瓣环收缩期速度及右心室游离壁应变等^[4-6]。但传统超声心动图参数未考虑左向右延迟及心室相互依赖对右心室每搏量的影响, 可能无法提供更全面的右心室功能信息^[7-8]。

超声心动图通过无创方式获取心肌做功参数, 将应变数据与动态无创心室压力曲线相结合, 整合心肌变形与后负荷因素, 可能为心肌功能评估提供更多信息^[9]。研究人员通过结合左心室应变数据与无创估计的左心室压力曲线, 验证了无创测量心肌做功的可行性, 提出左心室压力-应变环内的面积即代表心肌做功^[10-11]。右心室心肌做功 (right ventricular myocardial work, RVMW) 是定量分析右心室功能的新型指标, 通过整合右心室整体纵向应变 (global longitudinal strain, GLS)、肺动脉压力及三尖瓣、肺动脉瓣事件计算得出^[12]。本研究旨在探讨超声心动图评估

PAH 患者 RVMW 的价值, 分析 PAH 患者 RVMW 与右心导管 (right heart catheterization, RHC) 血流动力学参数的相关性。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性分析 2021 年 3 月至 2022 年 9 月重庆医科大学附属第一医院 47 例疑诊 PAH 患者的临床资料。将静息状态下平均肺动脉压 (mean pulmonary arterial pressure, mPAP) > 20 mmHg、肺动脉楔压 ≤ 15 mmHg、PVR > 2 Wood 单位的研究对象纳入 PAH 组^[4]; 无心腔结构异常且 mPAP ≤ 20 mmHg 的研究对象纳入对照组。纳入标准: (1) 接受静息 RHC; (2) 疑诊 PAH。排除标准: (1) 患有心房颤动; (2) 患有瓣膜疾病; (3) 超声心动图图像质量不佳。本研究已通过重庆医科大学附属第一医院伦理委员会批准 [审批号: 2024 年科研伦理 (2024-576-01)], 免除患者知情同意。

1.2 方法

1.2.1 RHC 血流动力学相关指标

患者接受静息 RHC, 获取右心房压力、肺动脉收缩压 (systolic pulmonary artery pressure, sPAP)、mPAP、平均肺动脉楔压等血流动力学参数。采用热稀释法重复测量 3 次心输出量。通过标准公式计算 PVR、右心室每搏做功指数 (right ventricular stroke work index, RVSWI)、心脏指数、每搏输出量及每搏输出量指数^[13-16]。

1.2.2 超声心动图相关指标

采用 GE Vivid E95 超声系统完成经胸超声心动

图检查。二维超声心动图图像通过 3.5 MHz 或 M5S 探头采集 3~5 个心动周期数据,采用 EchoPAC v204 软件行离线分析。根据指南,分别检测三尖瓣反流峰值速度、sPAP、TAPSE、S'波、右心室收缩末期及舒张末期面积。RVFAC=[(右心室舒张末期面积-右心室收缩末期面积)/右心室舒张末期面积]×100%。

1.2.3 RVMW 参数计算

采用文献[17-18]中的软件包分析 RVMW 参数。通过压力-应变环近似右心室心肌力-节段长度环,实现 RVMW 的无创评估;通过测量肺动脉瓣与三尖瓣事件时间同步右心室应变、sPAP、肺动脉舒张压(diastolic pulmonary artery pressure,dPAP),生成右心室压力-应变环,获得整体做功指数(global work index,GWI)、整体有用功(global constructive work,GCW)、整体无用功(global wasted work,GWW)、整体做功效率(global work efficiency,GWE)、整体收缩有用功(global systolic constructive work,GSCW)、整体阳性做功(global positive work,GPW)6 个 RVMW 参数。

1.3 统计学处理

采用 SPSS26.0 软件进行数据处理。符合正态分

布和方差齐性检验的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用 t 检验。不符合正态分布和方差齐性的计量资料以 $M(Q_1,Q_3)$ 表示,组间比较采用秩和检验。计数资料以例数或百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。相关性分析采用 Spearman 相关分析。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 两组患者临床资料和 RHC 参数比较

47 例研究对象中,23 例被诊断为 PAH(纳入 PAH 组),24 例纳入对照组。PAH 组收缩压、N 末端-脑钠肽前体(N terminal-pro-brain natriuretic peptide,NT-proBNP)、sPAP、mPAP、dPAP、PVR、右心室收缩压、平均肺动脉楔压、右心室每搏做功指数高于对照组,舒张压、Hb、每搏量指数低于对照组,差异有统计学意义($P<0.05$),见表 1。

2.2 两组患者超声心动图参数比较

PAH 组右心室 GLS、右心室 GWI、右心室 GCW、右心室 GWW、右心室 GPW、右心室 GSCW 高于对照组,e'值、TAPSE、右心室 S'波、RVFAC、右心室 GWE 低于对照组,差异有统计学意义($P<0.05$),见表 2。

表 1 两组患者临床资料和 RHC 参数比较

项目	PAH 组($n=23$)	对照组($n=24$)	χ^2/t	P
男/女(n)	5/18	6/18	0.070	>0.999
年龄($\bar{x} \pm s$,岁)	38.9 $\pm$ 19.8	47.9 $\pm$ 17.1	1.670	0.102
心率($\bar{x} \pm s$,次/min)	79.0 $\pm$ 9.0	75.0 $\pm$ 8.0	-1.485	0.144
收缩压($\bar{x} \pm s$,mmHg)	111.0 $\pm$ 19.0	125.0 $\pm$ 13.0	2.859	0.006
舒张压($\bar{x} \pm s$,mmHg)	68.0 $\pm$ 12.0	77.0 $\pm$ 10.0	2.883	0.006
世界卫生组织功能分级[$n(\%)$]			24.695	<0.001
I级	1(4.3)	17(70.8)		
II级	13(56.5)	6(25.0)		
III级	8(34.8)	1(4.2)		
IV级	1(4.3)	0		
NT-proBNP[$M(Q_1,Q_3)$,pg/mL]	252.0(80.3,1 021.8)	50.0(50.0,107.0)	-3.532	<0.001
Hb[$M(Q_1,Q_3)$,g/L]	124.0(112.0,143.0)	133.5(130.0,143.3)	-1.980	0.048
右心房压力[$M(Q_1,Q_3)$,mmHg]	5.0(2.0,7.0)	4.0(2.3,6.0)	-0.614	0.539
sPAP[$M(Q_1,Q_3)$,mmHg]	54.0(34.0,82.0)	25.0(20.3,28.8)	-5.070	<0.001
mPAP[$M(Q_1,Q_3)$,mmHg]	37.0(24.0,55.0)	16.0(13.0,17.8)	-5.391	<0.001
dPAP[$M(Q_1,Q_3)$,mmHg]	27.0(14.0,37.0)	9.5(6.0,11.0)	-5.400	<0.001
心输出量($\bar{x} \pm s$,L/min)	4.7 $\pm$ 1.2	5.3 $\pm$ 1.8	1.280	0.207
心脏指数($\bar{x} \pm s$,L $\cdot$ min ⁻¹ $\cdot$ m ⁻²)	3.1 $\pm$ 0.8	3.3 $\pm$ 1.0	0.947	0.349
PVR[$M(Q_1,Q_3)$,WU]	5.7(2.9,11.7)	1.4(1.1,2.2)	-5.044	<0.001
右心室舒张末压[$M(Q_1,Q_3)$,mmHg]	1.0(-2.0,4.0)	1.5(0.0,5.0)	-1.241	0.215
右心室收缩压[$M(Q_1,Q_3)$,mmHg]	55.0(36.0,83.0)	28.5(20.3,35.8)	-4.611	<0.001
平均肺动脉楔压($\bar{x} \pm s$,mmHg)	9.5 $\pm$ 3.6	7.5 $\pm$ 2.8	-2.168	0.036

续表 1 两组患者临床资料和 RHC 参数比较

项目	PAH 组(<i>n</i> =23)	对照组(<i>n</i> =24)	χ^2/t	<i>P</i>
每搏量($\bar{x}\pm s$, mL)	59.6±13.8	69.7±21.8	1.875	0.067
每搏量指数[<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), mL/m ²]	40.5(32.2,43.0)	44.8(40.6,50.0)	−2.320	0.020
右心室每搏做功指数[<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), mL·mmHg·m ^{−2}]	17.4(11.0,21.3)	6.3(5.5,7.8)	−5.129	<0.001

表 2 两组患者超声心动图参数比较

项目	PAH 组(<i>n</i> =23)	对照组(<i>n</i> =24)	<i>t</i> / <i>Z</i>	<i>P</i>
左心房容积指数($\bar{x}\pm s$, mL/m ²)	24.6±7.5	23.5±5.5	−0.584	0.562
E 值($\bar{x}\pm s$, cm/s)	75.8±22.6	81.1±20.7	0.825	0.414
e'值($\bar{x}\pm s$, cm/s)	6.9±2.9	9.1±3.2	2.425	0.019
左心室射血分数[<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), %]	64.0(58.0,72.0)	63.0(58.3,67.0)	−0.959	0.337
左心室每搏量($\bar{x}\pm s$, mL)	35.2±14.8	40.9±10.9	1.520	0.136
左心室心输出量($\bar{x}\pm s$, L/min)	3.0±1.0	2.9±0.7	−0.471	0.640
TAPSE ($\bar{x}\pm s$, mm)	18.9±3.9	23.1±3.1	4.131	<0.001
右心室 S'波($\bar{x}\pm s$, cm/s)	12.1±3.4	13.9±2.4	2.085	0.043
右心室 GLS [<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), %]	−15.3(−17.7, −10.8)	−21.6(−23.4, −19.6)	−4.779	<0.001
RVFAC[<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), %]	27.7(21.8,40.0)	44.5(43.0,50.0)	−4.780	<0.001
右心室 GWE[<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), %]	0.91(0.87,0.93)	0.96(0.91,0.97)	−2.886	0.004
右心室 GWI [<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), mmHg%]	581.0(438.0,692.0)	422.5(372.3,545.8)	−2.394	0.017
右心室 GCW [<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), mmHg%]	726.0(561.0,906.0)	492.5(410.3,584.5)	−3.533	<0.001
右心室 GWW [<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), mmHg%]	68.0(40.0,108.0)	24.0(14.3,47.8)	−3.587	<0.001
右心室 GPW [<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), mmHg%]	708.0(561.0,860.0)	486.0(403.3,583.0)	−3.299	0.001
右心室 GSCW [<i>M</i> (<i>Q</i> ₁ , <i>Q</i> ₃), mmHg%]	694.0(510.0,845.0)	479.0(398.3,577.8)	−3.107	0.002

2.3 两组患者 RVMW 参数分段比较

GSCW 均高于室间隔(*P*<0.05),见表 3。

两组患者右心室侧壁的 GWI、GCW、GPW、

表 3 两组患者 RVMW 参数分段比较[*M*(*Q*₁,*Q*₃)/ $\bar{x}\pm s$]

项目	PAH 组(<i>n</i> =23)				对照组(<i>n</i> =24)			
	侧壁	室间隔	<i>Z</i>	<i>P</i>	侧壁	室间隔	<i>Z</i> / <i>t</i>	<i>P</i>
右心室 GWE(%)	91.3(83.0,94.3)	91.7(87.7,95.0)	−0.593	0.553	95.7(89.3,96.6)	95.5(91.5,96.2)	−1.065	0.287
右心室 GWI(mmHg%)	605.3(543.0,888.3)	491.3(378.0,635.7)	−2.220	0.026	528.8±184.2	389.9±118.1	5.874	<0.001
右心室 GCW(mmHg%)	840.3(644.0,981.7)	681.0(473.7,852.3)	−2.524	0.012	609.6±172.2	431.8±122.4	9.130	<0.001
右心室 GWW(mmHg%)	59.0(35.0,113.0)	54.3(29.3,119.0)	−0.114	0.910	32.8(15.6,64.4)	20.3(10.6,36.1)	−2.357	0.018
右心室 GPW(mmHg%)	775.0(647.0,1 017.3)	615.7(492.3,781.7)	−2.646	0.008	593.8±170.2	424.9±120.4	8.496	<0.001
右心室 GSCW(mmHg%)	755.7(621.7,896.7)	607.7(373.7,664.0)	−2.433	0.015	589.4±170.7	422.5±121.4	8.451	<0.001

2.4 PAH 组患者 RHC 参数与 RVMW 参数的相关性分析

PAH 组患者 PVR 与右心室 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性(*r*=0.672、0.755、0.793、0.747,*P*<0.05),与 GWW 有中等相关性(*r*=0.496,*P*<0.05);RVSWI 与右心室 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性(*r*=0.782、0.765、0.764、0.773,*P*<0.05),与 GWW 无相关性(*P*>0.05)。侧壁心肌做功中,PVR 与 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性(*r*=0.612、0.715、0.744、0.700,*P*<0.05);RVSWI 与 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性(*r*=0.781、0.721、0.789、0.789,*P*<0.05),与 GWW 无相关性(*r*=0.148,*P*=0.500)。室间隔心肌做功中,PVR 与 GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性(*r*=0.733、0.755、0.722,*P*<0.05),与 GWI 及 GWW 有中等相关性(*r*=0.546、

0.534, $P < 0.05$); RVSWI 与 GCW、GPW 及 GSCW 有良好相关性($r = 0.761, 0.746, 0.735, P < 0.001$), 与 GWI 及 GWE 有中等相关性($r = 0.564, -0.433, P < 0.05$).

2.5 PAH 组患者 RHC 参数与传统右心室收缩功能参数的相关性分析

PAH 组患者的 PVR 与 RVFAC 有良好相关性($r = 0.742, P < 0.05$), 与右心室 GLS 有中等相关性($r = 0.454, P < 0.05$); RVSWI 仅与 RVFAC 有中等相关性($r = 0.584, P < 0.05$).

2.6 PAH 患者 RHC 与压力参数的相关性分析

PAH 组患者的 PVR 与 sPAP、dPAP、mPAP 呈良好相关性($r = 0.800, 0.679, 0.815, P < 0.05$).

3 讨论

本研究采用超声心动图无创评估 PAH 患者的 RVMW 参数, 发现 PAH 组患者右心室 GWI、GCW、GWW、GPW 及 GSCW 较对照组升高, GWE 较对照组降低, 且这些变化在右心室侧壁尤为明显。进一步分析显示, PAH 患者的 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 与有创血流动力学参数 PVR 及 RVSWI 明显相关。与传统超声心动图参数相比, RVMW 能更全面地反映右心室功能特征。

RVMW 通过超声心动图斑点追踪技术获取右心室 GLS, 并结合无创测量的肺动脉压力, 同时考虑右心室的变形与后负荷, 能更客观、准确地反映心肌功能。MANGANARO 等^[19]通过多变量分析发现, GWI、GCW 与血压明显相关。sPAP 升高会导致后负荷增加, 可能使右心室做功需维持更高能量水平, 具体表现为 GWI、GCW、GPW 及 GSCW 升高, 因此 PAH 患者的整体 RVMW 参数(除 GWE 外)升高, 且侧壁与室间隔均呈现类似结果。此外, 两组患者的侧壁 RVMW 均明显高于室间隔, 这与 DIAB 等^[20]在儿童 PAH 中得出的结论一致。研究表明, 左心室收缩可能贡献 20%~40% 的右心室每搏输出量, 其主要通过室间隔收缩介导^[21-22]。PAH 患者的右心室收缩时间延长, 可能延续至肺动脉瓣关闭, 导致室壁应力增加及机械效率降低^[23]。这种收缩时间延长是心室间不同步和室间隔左移的主要决定因素, 进而导致左心室充盈不足及每搏输出量减少^[24]。RHC 通过右心房压力评估右心室舒张末期容积或前负荷, PVR 评估后负荷, 每搏输出量反映收缩力^[25]。其中, PVR 在 PAH 的诊断、血流动力学分类及预后评估中具有重要作用^[26-27]。RVSWI 结合每搏输出量与肺动脉压力, 也是反映右心室总做功量的代表性指标, 且在 PAH 患者中具有重要预后预测价值^[28-29]。但 RHC 为有创检查, 虽然并发症发生率(1.1%)与死亡率(0.055%)较低^[30], 但无法作为 PAH 随访的常规检查。

RVMW 是一种新型无创超声心动图指标。BUTCHER 等^[31]发现右心室 GCW、GWI 与有创测

量的 RVSWI 明显相关, PVR 则与右心室 GWW、GWE 相关; LACERDA 等^[32]进一步发现, PVR 与右心室 GWI、GCW、GWW、GWE 均相关。本研究结果显示, GWI、GCW、GPW 及 GSCW 等 RVMW 参数与有创测量的 RVSWI、PVR 相关, 且重复性良好, 证实 RVMW 用于评估 PAH 患者心肌收缩功能的可行性。进一步分析发现, PVR 与整体及室间隔 GWW 呈中等相关性, 但侧壁 GWW 与有创测量无相关性, 这可能与 PAH 患者侧壁心肌在部分心动周期时相(如收缩期延长和等容舒张期缩短)做功有关。

传统超声心动图评估右心室功能的指标主要分为纵向功能(TAPSE、右心室 S' 波、右心室 GLS)和整体功能(RVFAC、Tei 指数)两类^[7, 33-34]。但常用参数不仅数量较少, 也无法全面评价及监测右心室功能^[35]。尽管 RVFAC 对负荷状态敏感, 但其结果受左心室功能及室间隔运动的影响, 且未纳入右心室流出的评估范围。而 RVMW 通过整合后负荷因素, 可反映右心室-肺动脉耦合状态, 可更精准地评估右心室收缩功能^[12]。国内有研究显示, RVMW 参数与传统右心室功能指标 TAPSE、右心室 S' 波存在相关性^[36], 但缺乏针对 RVMW 参数与 RHC 参数(如 RVSWI、PVR)相关性的研究。本研究结果显示, 传统右心室功能指标中仅 RVFAC 与 PVR、RVSWI 相关; 而整体 GCW、GPW、GSCW 及侧壁 GPW、室间隔 GPW 与 PVR 的相关性均优于 RVFAC, 整体、侧壁及室间隔心肌做功指数与 RVSWI 的相关性同样优于 RVFAC, 提示 RVMW 较传统二维超声参数更能精准评估右心室功能。

本研究存在一定局限性: (1) 心肌做功分析中所采用的肺动脉压力由三尖瓣反流峰值速度估算, 这可能影响心肌做功评估的准确性; (2) 本研究样本量较小, 需更大样本量的长期随访研究验证心肌做功参数的临床价值。综上所述, 超声心动图无创评估 RVMW 能更全面地评估心肌功能及 PAH 患者病理、生理特征。

参考文献

- [1] BADESCH D B, RASKOB G E, ELLIOTT C G, et al. Pulmonary arterial hypertension: baseline characteristics from the REVEAL registry [J]. Chest, 2010, 137(2): 376-387.
- [2] LEBER L, BEAUDET A, MULLER A. Epidemiology of pulmonary arterial hypertension and chronic thromboembolic pulmonary hypertension: identification of the most accurate estimates from a systematic literature review [J]. Pulm Circ, 2021, 11(1): 2045894020977300.
- [3] 徐婉婷, 江晓琴, 朱涛. 肺动脉高压的治疗进展

- [J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2024, 23(4): 287-292.
- [4] HUMBERT M, KOVACS G, HOEPER M M, et al. 2022 ESC/ERS guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension [J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(38): 3618-3731.
- [5] MUKHERJEE M, RUDSKI L G, ADDETIA K, et al. Guidelines for the echocardiographic assessment of the right heart in adults and special considerations in pulmonary hypertension; recommendations from the American Society of Echocardiography [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2025, 38(3): 141-186.
- [6] GAO Y, LI H, HE L, et al. Superior prognostic value of right ventricular free wall compared to global longitudinal strain in patients with repaired tetralogy of Fallot [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 996398.
- [7] HUANG S J, NALOS M, SMITH L, et al. The use of echocardiographic indices in defining and assessing right ventricular systolic function in critical care research [J]. *Intensive Care Med*, 2018, 44(6): 868-883.
- [8] 张维, 肖芳, 唐敏, 等. 四维右室容积定量分析技术评估系统性红斑狼疮合并肺动脉高压患者右心功能 [J]. *临床超声医学杂志*, 2022, 24(9): 657-660.
- [9] CHAN J, EDWARDS N, KHANDHERIA B K, et al. A new approach to assess myocardial work by non-invasive left ventricular pressure-strain relations in hypertension and dilated cardiomyopathy [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(1): 31-39.
- [10] RUSSELL K, ERIKSEN M, AABERGE L, et al. A novel clinical method for quantification of regional left ventricular pressure-strain loop area: a non-invasive index of myocardial work [J]. *Eur Heart J*, 2012, 33(6): 724-733.
- [11] 达文会, 丁云川, 王庆慧, 等. 腺苷负荷超声心动图联合左室压力-应变环预测经皮冠状动脉介入治疗术后支架内再狭窄程度的临床价值 [J]. *临床超声医学杂志*, 2024, 26(8): 636-640.
- [12] BUTCHER S C, FORTUNI F, MONTERO-CABEZAS J M, et al. Right ventricular myocardial work; proof-of-concept for non-invasive assessment of right ventricular function [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(2): 142-152.
- [13] LANG R M, BADANO L P, MOR-AVI V, et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2015, 28(1): 1-39.
- [14] BADANO L P, KOLIAS T J, MURARU D, et al. Standardization of left atrial, right ventricular, and right atrial deformation imaging using two-dimensional speckle tracking echocardiography: a consensus document of the EACVI/ASE/Industry Task Force to standardize deformation imaging [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(6): 591-600.
- [15] RUDSKI L G, LAI W W, AFILALO J, et al. Guidelines for the echocardiographic assessment of the right heart in adults; a report from the American Society of Echocardiography endorsed by the European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2010, 23(7): 685-713; quiz 786-788.
- [16] ADUEN J F, CASTELLO R, LOZANO M M, et al. An alternative echocardiographic method to estimate mean pulmonary artery pressure: diagnostic and clinical implications [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2009, 22(7): 814-819.
- [17] EDWARDS N, SCALIA G M, SHINO K, et al. Global myocardial work is superior to global longitudinal strain to predict significant coronary artery disease in patients with normal left ventricular function and wall motion [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2019, 32(8): 947-957.
- [18] HUBERT A, LE ROLLE V, LECLERCQ C, et al. Estimation of myocardial work from pressure-strain loops analysis: an experimental evaluation [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(12): 1372-1379.
- [19] MANGANARO R, MARCHETTA S, DULGERU R, et al. Echocardiographic reference ranges for normal non-invasive myocardial work indices; results from the EACVI NORRE study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(5): 582-590.
- [20] DIAB S G, EBATA R, MROCZEK D, et al. Asymmetric right ventricular myocardial work correlates with gold standard measurements of

- cardiac function in pulmonary hypertension [J]. *Pulm Circ*, 2024, 14(4):e70014.
- [21] SANTAMORE W P, DELL'ITALIA L J. Ventricular interdependence: significant left ventricular contributions to right ventricular systolic function[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 1998, 40(4):289-308.
- [22] NAEIJE R, BADAGLIACCA R. The overloaded right heart and ventricular interdependence [J]. *Cardiovasc Res*, 2017, 113(12):1474-1485.
- [23] VONK NOORDEGRAAF A, WESTERHOF B E, WESTERHOF N. The relationship between the right ventricle and its load in pulmonary hypertension[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 69(2):236-243.
- [24] MARCUS J T, GAN C T, ZWANENBURG J J, et al. Interventricular mechanical asynchrony in pulmonary arterial hypertension: left-to-right delay in peak shortening is related to right ventricular overload and left ventricular underfilling [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2008, 51(7):750-757.
- [25] NAEIJE R. Assessment of right ventricular function in pulmonary hypertension[J]. *Curr Hypertens Rep*, 2015, 17(5):35.
- [26] DENG J. Clinical application of pulmonary vascular resistance in patients with pulmonary arterial hypertension [J]. *J Cardiothorac Surg*, 2021, 16(1):311.
- [27] 周深鹏, 王佳盈, 胡升宸, 等. 肺动脉高压患者预后评估模型的研究进展[J]. *中华高血压杂志(中英文)*, 2025, 33(8):714-721.
- [28] DI MARIA M V, BURKETT D A, YOUNG-OZAI A K, et al. Echocardiographic estimation of right ventricular stroke work in children with pulmonary arterial hypertension: comparison with invasive measurements[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2015, 28(11):1350-1357.
- [29] CLAPHAM K R, HIGHLAND K B, RAO Y, et al. Reduced rvswi is associated with increased mortality in connective tissue disease associated pulmonary arterial hypertension[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2020, 7:77.
- [30] HOEPER M M, LEE S H, VOSWINCKEL 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.
- [31] BUTCHER S C, FELOUKIDIS C, KAMPERIDIS V, et al. Right ventricular myocardial work characterization in patients with pulmonary hypertension and relation to invasive hemodynamic parameters and outcomes[J]. *Am J Cardiol*, 2022, 177:151-161.
- [32] LACERDA TEIXEIRA B, ALBUQUERQUE F, SANTOS R, et al. Right ventricular myocardial work: proof-of-concept for the assessment of pressure-strain loops of patients with pre-capillary pulmonary hypertension [J]. *Cardiovasc Ultrasound*, 2025, 22(1):16.
- [33] 陈丹蕾, 曹爱梅, 刘艳, 等. 三尖瓣环收缩期位移在先天性心脏病患儿右心功能评估中的研究进展[J]. *中华胸心血管外科杂志*, 2023, 39(3):173-179.
- [34] 夏莉莉, 胡献金, 童陶然, 等. 二维斑点追踪成像评估 2 型糖尿病患者右心功能的价值 [J]. *放射学实践*, 2024, 39(9):1238-1243.
- [35] CHEN J F, SONG D D, SUN Z Y, et al. Effects of lung resection on heart structure and function: a tissue Doppler ultrasound survey of 43 cases[J]. *Biomed Rep*, 2024, 20(1):11.
- [36] 樊昕颖, 黄消, 程巧, 等. 无创心肌做功定量评估肺动脉高压患者右室右心室功能的应用价值 [J]. *临床超声医学杂志*, 2022, 24(9):646-651.

(收稿日期:2025-04-12 修回日期:2025-08-17)

(编辑:张芃捷)

(上接第 2803 页)

- [18] 张晋怡. 基本公共服务供给对生育水平的影响分析:基于空间计量统计分析[D]. 南宁:广西师范大学, 2022.
- [19] 田珺, 完颜含玥. 受教育水平、初婚年龄与生育水平:基于适龄人口性别差异视角[J]. *人口与发展*, 2024, 30(6):152-163, 139.

- [20] 乐昕. 男性生育率:我国人口学研究中值得重视的研究领域 [J]. *人口与发展*, 2012, 18(2):27-32.

(收稿日期:2025-04-28 修回日期:2025-09-18)

(编辑:成卓)