

呼气末二氧化碳分压联合被动抬腿试验对脓毒性休克机械通气患者容量反应性的预测价值

李运¹ 谢沙¹ 朱宁² 饶欧阳¹ 胡杰¹ 李叶红² 陈泓岑¹ 陈明胜¹ 刘颖^{1,2}

¹贵州医科大学临床医学院, 贵州贵阳 550000; ²贵州医科大学附属医院重症医学科, 贵州贵阳 550004

通信作者: 刘颖, Email: 2356831401@qq.com

【摘要】目的 评估呼气末二氧化碳分压($P_{ET}CO_2$)联合被动抬腿试验(PLR)用于预测脓毒性休克机械通气患者容量反应性的价值。**方法** 采用前瞻性队列研究方法。纳入2025年3月至11月贵州医科大学附属医院重症医学科收治的脓毒性休克行气管插管机械通气的患者作为研究对象。患者均接受PLR,记录PLR前(基线T0)及PLR时(T1)的 $P_{ET}CO_2$,通过心脏超声测量左室流出道速度时间积分(VTI)并计算心排血量(CO)。以PLR诱导的 $\Delta CO\% \geq 10\%$ 作为容量反应阳性的标准。采用Pearson相关性分析法评估PLR诱导的 $\Delta P_{ET}CO_2\%$ 与 $\Delta CO\%$ 的相关性,并绘制受试者工作特征曲线(ROC曲线)评估 $\Delta P_{ET}CO_2$ 联合PLR对脓毒性休克机械通气患者容量反应性的预测价值。**结果** 共纳入142例患者,其中容量反应阳性组119例(83.8%),容量反应阴性组23例(16.2%)。T1时,容量反应阳性组心排血指数(CI)、每搏量(SV)、VTI、CO及 $P_{ET}CO_2$ 均较T0时显著升高,容量反应阴性组CI和CO虽较T0时升高,但升高幅度较小,且容量反应阳性组 $P_{ET}CO_2$ 明显高于容量反应阴性组(均 $P < 0.05$)。进一步比较两组间各指标的变化量(Δ 值)表明,容量反应阳性组 ΔCI 、 ΔSV 、 ΔVTI 、 ΔCO 及 $\Delta P_{ET}CO_2$ 均明显高于容量反应阴性组[$\Delta CI(mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2})$: 7.00(4.83, 10.17)比1.17(0.50, 2.67), $\Delta SV(mL)$: 8.42(5.70, 11.78)比1.35(0.53, 2.98), $\Delta VTI(cm)$: 3.13(2.31, 4.11)比0.60(0.20, 0.95), $\Delta CO(L/min)$: 0.72(0.51, 1.09)比0.12(0.04, 0.28), $\Delta P_{ET}CO_2(mmHg, 1 mmHg \approx 0.133 kPa)$: 5.0(4.0, 6.0)比2.0(0.5, 2.0),均 $P < 0.05$]。Pearson相关性分析显示, $\Delta P_{ET}CO_2\%$ 与 $\Delta CO\%$ 呈明显正相关($r=0.350, P < 0.001$)。ROC曲线分析显示, $\Delta P_{ET}CO_2$ 联合PLR对脓毒性休克行气管插管机械通气患者容量反应性有一定预测作用,ROC曲线下面积(AUC)=0.876, 95%可信区间(95%CI)为0.787~0.965;当最佳截断值为0.092时,其敏感度为87.0%,特异度为79.8%。**结论** $P_{ET}CO_2$ 联合PLR能有效预测脓毒性休克机械通气患者的容量反应性,该方法无创、简便、重复性好,为重症监护病房(ICU)实施个体化液体管理提供了实用的床旁工具。

【关键词】 脓毒性休克; 容量反应性; 被动抬腿试验; 呼气末二氧化碳分压; 血流动力学

基金项目:贵州省科技计划项目(2023-401);贵州医科大学附属医院博士科研启动基金项目(gyfybsky-2021-65)

DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2026.01.002

Predictive value of end-tidal carbon dioxide combined with passive leg raising for fluid responsiveness in patients with septic shock undergoing mechanical ventilation

Li Yun¹, Xie Sha¹, Zhu Ning², Rao Ouyang¹, Hu Jie¹, Li Yehong², Chen Hongcen¹, Chen Mingsheng¹, Liu Ying^{1,2}

¹Clinical Medical College, Guizhou Medical University, Guiyang 550000, Guizhou, China; ²Department of Critical Care Medicine, the Affiliated Hospital of Guizhou Medical University, Guiyang 550004, Guizhou, China

Corresponding author: Liu Ying, Email: 2356831401@qq.com

【Abstract】Objective To evaluate the value of partial pressure of end-tidal carbon dioxide ($P_{ET}CO_2$) combined with passive leg raising (PLR) in predicting fluid responsiveness in patients with septic shock undergoing mechanical ventilation. **Methods** A prospective cohort study was conducted. Patients with septic shock who underwent tracheal intubation and mechanical ventilation in the department of critical care medicine of the Affiliated Hospital of Guizhou Medical University from March 2025 to November 2025 were enrolled as the research subjects. All patients underwent PLR. $P_{ET}CO_2$ was recorded before PLR (baseline, T0) and during PLR (T1). Left ventricular outflow tract velocity time integral (VTI) was measured by echocardiography, and cardiac output (CO) was calculated. A PLR-induced $\Delta CO \geq 10\%$ was defined as fluid responsiveness positive. The Pearson correlation analysis method was used to evaluate the correlation between the PLR-induced $\Delta P_{ET}CO_2\%$ and $\Delta CO\%$ induced by PLR, and the predictive performance of $\Delta P_{ET}CO_2$ was assessed using the receiver operator characteristic curve (ROC curve). **Results** A total of 142 patients were included, comprising 119 (83.8%) in the fluid responsiveness positive group and 23 (16.2%) in the fluid responsiveness negative group. At T1, cardiac index (CI), stroke volume (SV), VTI, CO, and $P_{ET}CO_2$ were significantly increased compared with T0 in the fluid responsiveness positive group. The CI and CO in the fluid responsiveness negative group were increased compared to T0, but the magnitude of the increase was relatively small, and $P_{ET}CO_2$ in the fluid responsiveness positive group was significantly higher than that fluid responsiveness negative group (all $P < 0.05$). Further comparison of the changes (Δ) in these parameters between the two groups revealed that ΔCI , ΔSV , ΔVTI , ΔCO , and $\Delta P_{ET}CO_2$ were significantly higher in the fluid responsiveness positive group than in the fluid responsiveness negative group [$\Delta CI(mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2})$: 7.00(4.83, 10.17) vs. 1.17(0.50, 2.67); $\Delta SV(mL)$: 8.42(5.70, 11.78) vs. 1.35(0.53, 2.98); $\Delta VTI(cm)$: 3.13(2.31, 4.11) vs. 0.60(0.20, 0.95); $\Delta CO(L/min)$: 0.72(0.51, 1.09) vs. 0.12(0.04, 0.28); $\Delta P_{ET}CO_2(mmHg, 1 mmHg \approx 0.133 kPa)$: 5.0(4.0, 6.0) vs. 2.0(0.5, 2.0); all $P < 0.05$]. The Pearson correlation analysis showed that

$\Delta P_{ET}CO_2\%$ was positively correlated with $\Delta CO\%$ ($r = 0.350, P < 0.001$). The ROC curve analysis showed that $P_{ET}CO_2$ combined with PLR had a certain predictive effect on the volume responsiveness of patients with septic shock undergoing mechanical ventilation, area under the curve (AUC) of $\Delta P_{ET}CO_2$ for predicting fluid responsiveness = 0.876, with a 95% confidence interval (95%CI) was 0.787–0.965. At an optimal cut-off value of 0.092, the sensitivity was 87.0% and the specificity was 79.8%. **Conclusions** $P_{ET}CO_2$ combined with PLR effectively predicts fluid responsiveness in patients with septic shock undergoing mechanical ventilation. This method is noninvasive, simple, and reproducible, providing a practical bedside tool for individualized fluid management in the intensive care unit (ICU).

【Key words】 Septic shock; Fluid responsiveness; Passive leg raising; End-tidal carbon dioxide partial pressure; Hemodynamics

Fund program: Natural Science Foundation of Guizhou Provincial Department of Science and Technology (2023–401); Doctoral Research Start-up Fund of the Affiliated Hospital of Guizhou Medical University (gyfybsky–2021–65)

DOI: 10.3969/j.issn.1008–9691.2026.01.002

世界卫生组织(World Health Organization, WHO) 认定为脓毒症是所有国家和年龄层的全球卫生重点问题,其发病率和病死率居高不下^[1–3]。液体复苏作为脓毒性休克早期治疗的核心手段,旨在通过增加心排血量(cardiac output, CO)改善组织灌注^[4]。然而,并非所有患者都能从液体负荷中获益,盲目补液甚至可能导致容量过负荷与器官功能恶化。因此,准确评估容量反应性是实现精准液体管理的关键^[5]。评估容量反应性的方法很多,如临床常用的容量负荷试验(volume expansion, VE)、被动抬腿试验(passive leg raising, PLR)、呼气末阻断试验(end-expiratory occlusion test, EEO)、脉压和每搏量(stroke volume, SV)变化、潮气量激发试验(tidal volume challenge, TVC)等方法^[5]。目前 PLR 和 VE 被公认为是有效的方法。呼气末二氧化碳分压(partial pressure of end-tidal carbon dioxide, $P_{ET}CO_2$)作为一种无创、可连续监测的指标,能反映通气-灌注状态,且在机械通气患者中有良好的重复性。Huang 等^[6]经荟萃分析得出, $P_{ET}CO_2$ 不但是监测通气功能的指标,同时也可以反映血液循环情况。 $P_{ET}CO_2$ 的高低受细胞代谢水平、肺血流量及肺部清除二氧化碳(carbon dioxide, CO_2)能力的影响。所以在细胞代谢水平及肺部清除 CO_2 能力不变的情况下,其动态变化主要反映肺血流量的改变,在没有肺循环阻力改变的前提下,肺血流量主要受 CO 的影响。国内外已有研究证实, $P_{ET}CO_2$ 可作为预测容量反应性的有效指标^[7–9]。如高征环等^[10]通过监测脓毒性休克患者 VE 前后心率(heart rate, HR)、中心静脉压(central venous pressure, CVP)、SV、 $P_{ET}CO_2$ 等指标并进行分析,结果显示,脓毒性休克患者 $P_{ET}CO_2$ 变化与 SV 变化有很好的相关性,能有效评估患者容量反应性,指导液体复苏治疗。姚再先等^[11]通过监测急性循环衰竭机械通气患者 VE 前后 $P_{ET}CO_2$ 和心排血指数(cardiac index, CI)的变化,得出 VE

前后 $P_{ET}CO_2$ 的变化可以反映 CI 的变化,并能有效评估容量反应性。de Courson 等^[7]也尝试用 $P_{ET}CO_2$ 的变化评估手术室机械通气患者的容量反应性。

虽然在临床上已有多种评估容量反应性的方法,但对于经典的容量反应性评估,需要容量负荷或是 PLR 联合脉搏指示连续心排血量监测(pulse-indicated continuous cardiac output, PiCCO)等,均增加了感染的风险,且费用高,并对患者造成一定的创伤;如果用 PLR 联合超声,则要求操作者具备一定的超声检测能力^[12],不易普及。故本研究利用无创的方法,旨在评估 $P_{ET}CO_2$ 联合 PLR 用于预测脓毒性休克患者容量反应性的价值,以期为临床提供一种无创、简便、可靠的床旁评估工具。

1 资料与方法

1.1 研究对象:选择 2025 年 3 月至 11 月在贵州医科大学附属医院重症医学科住院接受治疗的脓毒性休克气管插管有创机械通气患者作为研究对象。

1.1.1 纳入标准:① 年龄 > 18 岁;② 符合脓毒性休克的国际诊断标准(脓毒症 3.0);③ 行气管插管机械通气治疗;④ 入组前 15 min 内患者血压及 HR 波动幅度低于基线值的 10%;⑤ 患者或家属知晓本研究目的、过程及意义,均签署知情同意书。

1.1.2 排除标准:① 存在 PLR 禁忌证者(如已知容量过负荷、颅内高压、腹腔高压、下肢深静脉血栓、骨盆骨折等);② 孕妇;③ 超声不能获取满意心脏切面等不能准确测量速度时间积分(velocity time integral, VTI)者;④ 存在明显肺实质病变或肺动脉高压;⑤ 存在严重心脏瓣膜病;⑥ 需要主动脉内球囊反搏或人工膜肺氧合治疗的重症患者。

1.1.3 伦理学:本研究符合医学伦理学标准,并经贵州医科大学附属医院伦理委员会审查批准(审批号:2025016X),对患者采取的治疗和检查均取得患者或家属知情同意。

1.2 研究方法:采用前瞻性队列研究方法。入选患

者均给予充分镇静镇痛以抑制自主呼吸。在 PLR 试验前后 10 min 保持机械通气参数、血管活性药物输注速率及输液速度等不变,并避免输注酸性或碱性液体。由经过统一培训的研究人员按以下流程操作。

1.2.1 试验流程: ① PLR 前基线值(T0): 患者保持 45° 半卧位至少 2 min, 记录基线血流动力学参数[HR、平均动脉压(mean arterial pressure, MAP)],同时利用超声测量左室流出道直径(left ventricular outflow tract diameter, LVOD) 和 VTI, 并连续记录 P_{ET}CO₂ 数值。② PLR 时(T1): 将患者调整为平卧位,并被动抬高双下肢 45°, 维持此体位 2 min。在 PLR 体位维持 1.5 min 时,再次测量并记录 VTI、P_{ET}CO₂、HR、MAP。③ 恢复期(T2): 恢复至步骤 1 的半卧位,保持 5 min 再次测量并记录 VTI、P_{ET}CO₂、HR、MAP。④ PLR 试验 T0 和 T1 时 CO 和 P_{ET}CO₂ 变化值(ΔCO 和 ΔP_{ET}CO₂): 以 PLR 时超声测量的 CO 增高且 ΔCO%≥10% 作为容量反应阳性的标准。将患者 PLR 试验 P_{ET}CO₂ 数值变化与超声测量判定的容量反应性标准进行比较。计算公式: ΔCO% = [(CO_{T1} - CO_{T0}) / CO_{T0}] × 100%; ΔP_{ET}CO₂% = [(P_{ET}CO_{2T1} - P_{ET}CO_{2T0}) / P_{ET}CO_{2T0}] × 100%。

1.2.2 CO 的测量: 使用超声仪于胸骨旁左室长轴切面测量 LVOD,于心尖五腔心切面用脉冲多普勒测量 LVOT 和 VTI 值,并根据公式计算 SV 与 CO。计算公式: SV = VTI × π × (LVOD/2)², CO = SV × HR。

1.2.3 P_{ET}CO₂ 监测: 应用呼气末二氧化碳监测仪监测 P_{ET}CO₂。

1.2.4 临床观察指标: ① 一般临床资料: 患者性别、年龄、体质量指数(body mass index, BMI)、急性生理学及慢性健康状况评分 II (acute physiology and

chronic health evaluation II, APACHE II) 评分、序贯器官衰竭评分(sequential organ failure assessment, SOFA) 评分、HR、呼吸频率、去甲肾上腺素当量(norepinephrine equivalent, NEE)、吸入氧浓度、潮气量、吸气末正压及是否合并糖尿病、高脂血症、高血压、脑梗死、冠心病、慢性肾衰竭、肿瘤等。② 血气分析: 血乳酸、pH 值、氧合指数等。③ 血流动力学: PLR 前后 CI、SV、CO、VTI, 分别计算 ΔCI、ΔSV、ΔCO、ΔVTI。

1.3 统计学方法: 采用 R 软件进行数据分析。符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,组间比较采用独立样本 t 检验,对于同一组内不同时间点(如 T0 与 T1)的比较,则采用配对样本 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验;非正态分布的计量资料以中位数(四分位数)[M(Q_L, Q_U)]表示,采用 Mann-Whitney U 检验。计数资料以例(百分数)表示,组间比较采用 χ² 检验或 Fisher 精确检验。采用 Pearson 相关性分析法评估 PLR 诱导的 ΔP_{ET}CO₂ 与 ΔCO 变化率的相关性。通过绘制受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic curve, ROC 曲线)评估 ΔP_{ET}CO₂ 联合 PLR 对脓毒性休克机械通气患者容量反应性的预测效能,并计算 ROC 曲线下面积(area under the ROC curve, AUC)及 95% 可信区间(95% confidence interval, 95%CI)、最佳截断值、敏感度、特异度。P < 0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

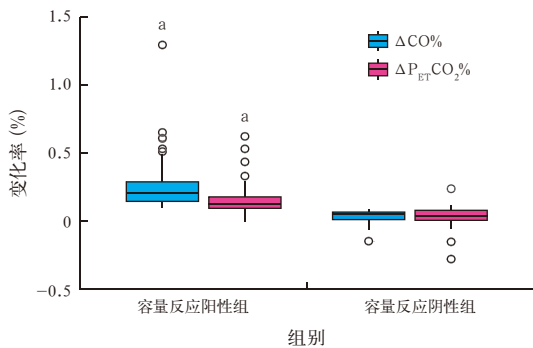
2.1 一般临床资料: 本研究共纳入 142 例脓毒性休克患者,其中容量反应阳性组 119 例(83.8%),容量反应阴性组 23 例(16.2%)。其基线特征与机械通气参数见表 1。机械通气模式为容量控制通气模式,潮气量(tidal volume, VT) 8 mL/kg。

表 1 142 例脓毒性休克患者基线特征和机械通气参数

项目	结果	项目	结果
性别[例(%)]		冠心病	26(18.2)
男性	100(70.4)	慢性肾衰竭	44(30.8)
女性	42(29.6)	肿瘤	7(4.9)
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$)	62.20 ± 15.42	HR(次/min, $\bar{x} \pm s$)	92.12 ± 19.61
BMI(kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	23.19 ± 4.55	呼吸频率(次/min, $\bar{x} \pm s$)	17.36 ± 3.86
APACHE II 评分[分, M(Q _L , Q _U)]	24.00(19.00, 29.00)	血乳酸[mmol/L, M(Q _L , Q _U)]	2.30(1.50, 4.50)
SOFA 评分[分, M(Q _L , Q _U)]	6.00(4.00, 8.00)	pH 值($\bar{x} \pm s$)	7.41 ± 0.08
合并症[例(%)]		氧合指数(mmHg, $\bar{x} \pm s$)	239.64 ± 87.90
糖尿病	43(30.1)	NEE 评分[μg · kg ⁻¹ · min ⁻¹ , M(Q _L , Q _U)]	0.15(0.00, 0.40)
高脂血症	4(2.8)	吸入氧浓度($\bar{x} \pm s$)	0.46 ± 0.11
高血压	58(40.6)	VT(mL, $\bar{x} \pm s$)	452.36 ± 31.69
脑梗死	10(7.0)	呼气末正压(cmH ₂ O, $\bar{x} \pm s$)	6.55 ± 2.15

注: 1 mmHg ≈ 0.133 kPa, 1 cmH₂O ≈ 0.098 kPa

2.2 PLR 过程中血流动力学与 $P_{ET}CO_2$ 的变化比较 (表 2~3; 图 1): 在 T1 时, 容量反应阳性组 CI、SV、VTI、CO 及 $P_{ET}CO_2$ 均较 T0 时显著升高 (均 $P < 0.05$); 而容量反应阴性组 CI 和 CO 虽均较 T0 时明显升高 (均 $P < 0.05$), 但升高幅度较小; 容量反应阳性组 $P_{ET}CO_2$ 明显高于容量反应阴性组 ($P < 0.05$)。进一步比较两组间各指标的变化量 (Δ 值) 表明, 容量反应阳性组 ΔCI 、 ΔSV 、 ΔVTI 、 ΔCO 及 $\Delta P_{ET}CO_2$ 均明显高于容量反应阴性组 (均 $P < 0.05$)。箱线图显示, 容量反应阳性组 $\Delta CO\%$ 与 $\Delta P_{ET}CO_2\%$ 的中位数及分布范围均显著高于容量反应阴性组 (均 $P < 0.05$); 容量反应阴性组的数据集中于 0 点附近, 表明其缺乏有效的容量反应。此图量化了容量反应阳性组和容量反应阴性组 PLR 诱导的 ΔCO 与 $\Delta P_{ET}CO_2$ 变化率的差异, 为 $\Delta P_{ET}CO_2$ 作为鉴别指标提供了直观的分布证据。



注: 与容量反应阴性组比较, ^a $P < 0.05$

图 1 容量反应阳性组与容量反应阴性组 $\Delta CO\%$ 和 $\Delta P_{ET}CO_2\%$ 的比较

2.3 $P_{ET}CO_2$ 与 CO 变化率的相关性分析 (图 2): Pearson 相关性分析显示, $\Delta P_{ET}CO_2\%$ 与 $\Delta CO\%$ 呈明显正相关 ($r = 0.350$, $P < 0.001$)。

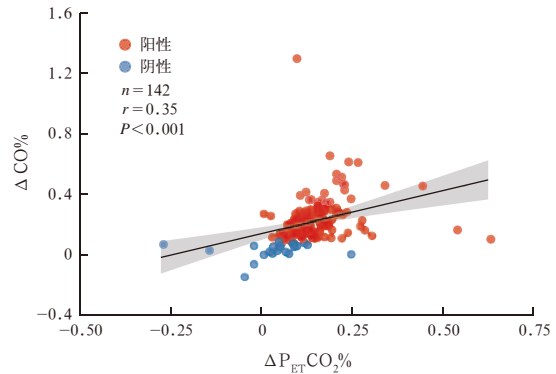


图 2 PLR 诱导的 $\Delta P_{ET}CO_2\%$ 与 $\Delta CO\%$ 的相关性分析

2.4 $\Delta P_{ET}CO_2$ 联合 PLR 预测容量反应性的效能及预测价值 (图 3): ROC 曲线分析表明, $\Delta P_{ET}CO_2$ 联合 PLR 预测容量反应性的 AUC 为 0.876 (95%CI 为 0.787~0.965), 说明其具有良好的预测能力。当最佳截断值为 0.092 时, 其敏感度为 87.0%, 特异度为 79.8%, 能为临床决策提供明确的阈值参考; 准确度为 81.0%, 阳性预测值 (positive predictive value, PPV) 为 94.7%, 阴性预测值 (negative predictive value, NPV) 为 59.4%; 阳性似然比 (positive likelihood ratio, PLR) 为 6.120, 阴性似然比 (negative likelihood ratio, NLR) 为 0.232, 约登指数为 0.668, P 值为 0.007。

表 2 两组患者 PLR 各时间点血流动力学和 $P_{ET}CO_2$ 的比较 ($\bar{x} \pm s$)

组别	例数 (例)	时间	CI ($mL \cdot s^{-1} \cdot m^2$)	SV (mL)	VTI (cm)	CO (L/min)	$P_{ET}CO_2$ (mmHg)
容量反应阳性组	119	T0	35.01 ± 13.84	39.90 ± 13.60	14.64 ± 3.98	3.65 ± 1.40	37.58 ± 10.02
	119	T1	42.68 ± 16.00 ^a	48.75 ± 15.22 ^a	17.88 ± 4.23 ^a	4.46 ± 1.62 ^a	42.85 ± 10.57 ^a
	119	T2	36.01 ± 14.50	41.00 ± 14.24 ^a	15.15 ± 4.99	3.75 ± 1.45	38.55 ± 10.07 ^a
容量反应阴性组	23	T0	39.51 ± 17.00	45.23 ± 15.93	15.58 ± 5.02	4.15 ± 1.77	34.91 ± 12.11
	23	T1	40.51 ± 16.84 ^a	46.44 ± 15.57	15.94 ± 4.39	4.27 ± 1.78 ^a	35.48 ± 11.03 ^b
	23	T2	38.17 ± 16.00 ^a	43.81 ± 15.36 ^a	15.10 ± 5.03 ^a	4.01 ± 1.66	33.83 ± 12.31

注: 与本组 T0 时比较, ^a $P < 0.05$; 与容量反应阳性组同期比较, ^b $P < 0.05$; 1 mmHg ≈ 0.133 kPa

表 3 两组患者 PLR 诱导的 ΔCI 、 ΔSV 、 ΔVTI 、 ΔCO 和 $\Delta P_{ET}CO_2$ 的变化比较 [$M(Q_L, Q_U)$]

组别	例数 (例)	ΔCI ($mL \cdot s^{-1} \cdot m^2$)	ΔSV (mL)	ΔVTI (cm)	ΔCO (L/min)	$\Delta P_{ET}CO_2$ (mmHg)
容量反应阳性组	119	7.00 (4.83, 10.17)	8.42 (5.70, 11.78)	3.13 (2.31, 4.11)	0.72 (0.51, 1.09)	5.0 (4.0, 6.0)
容量反应阴性组	23	1.17 (0.50, 2.67)	1.35 (0.53, 2.98)	0.60 (0.20, 0.95)	0.12 (0.04, 0.28)	2.0 (0.5, 2.0)
总体	142	6.17 (3.67, 9.67)	7.19 (4.50, 10.85)	2.78 (1.76, 3.94)	0.64 (0.39, 1.03)	4.0 (3.0, 6.0)
Z 值		11.620	11.150	10.710	11.560	5.370
P 值		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: 1 mmHg ≈ 0.133 kPa

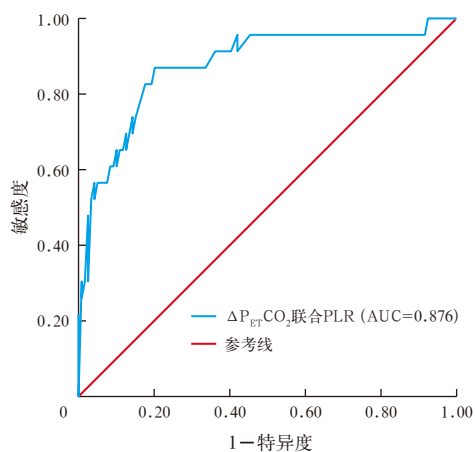


图3 $\Delta P_{ET}CO_2$ 联合PLR预测脓毒性休克患者容量反应性的ROC曲线

3 讨论

$P_{ET}CO_2$ 作为一项无创、连续的监测指标,其变化与CO之间存在明确的生理联系。在机械通气且代谢与通气状态相对稳定的条件下, $P_{ET}CO_2$ 主要受肺血流量的影响,在没有肺循环阻力改变的前提下,肺血流量主要受CO的影响。已有研究显示, $P_{ET}CO_2$ 的变化可用于预测容量反应性。例如,Monnet等^[5]的研究证实, $P_{ET}CO_2$ 的变化可反映CO,其在判断容量反应性方面优于脉压变异。另一项由Monge等^[13]开展的研究,通过对37例机械通气患者在PLR测试期间 $P_{ET}CO_2$ 与CI变化的分析,发现 $\Delta P_{ET}CO_2 \geq 5\%$ 对预测 $\Delta CI \geq 15\%$ 具有较高的敏感度(90.5%)与特异度(93.7%)。

传统的补液试验在评估容量反应性时存在局限性:如果过量补液(如500 mL)可能增加肺水肿等风险,从而影响组织氧合与微循环;而补液不足(如100~250 mL)则往往难以引起有意义的血流动力学改变,导致预测价值有限^[7-8, 14]。Budnick等^[8]的研究显示,在250 mL容量负荷后, $\Delta P_{ET}CO_2 \geq 2$ mmHg对预测SV指数(SV index, SVI)增加 $\geq 10\%$ 的敏感度仅为20.0%,其AUC=0.620。类似地,Wang等^[15]的研究发现,在脓毒性休克患者中,PLR引起的 $P_{ET}CO_2$ 变化可有效预测容量反应性,而在微量液体激发试验中则未见类似关联,因此目前临床更推荐采用PLR来模拟容量负荷以评估患者的容量反应性。PLR通过抬高双下肢45°,可动员约300~400 mL血液回流至中心循环,模拟容量负荷效应。该操作完全可逆,不增加总体容量负担^[16],且不受心律失常和自主呼吸的影响,因而有更好的安全性与可行性。大量研究已证实,PLR在评估容量反应

性方面的可靠性^[9, 17-18]。例如,Cherpanath等^[19]对23项临床试验进行的系统评价表明,PLR在不同临床环境和患者群体中均保持良好的诊断性能;Douglas等^[4]也指出,与传统的容量反应性评估方法相比,PLR后动态测量SV是一种安全、可行的评估手段;此外,Monnet等^[20]的荟萃分析进一步显示,PLR引起的CO变化预测容量反应性的合并敏感度为85.0%,特异度为91.0%,AUC达0.950。然而,PLR的效应持续时间较短,约1 min左右即达峰值^[21]。以往使用PLR评估容量反应性需依赖有创监测设备(如PiCCO、漂浮导管),不仅增加操作的复杂性及感染风险,且费用较高。近年来,床旁超声的普及为无创监测提供了可能,而 $P_{ET}CO_2$ 作为另一项无创指标,其在容量反应性评估中的价值也日益受到关注。

因此,通过监测PLR过程中 $P_{ET}CO_2$ 的动态变化,可间接反映CO对前负荷改变的响应,从而为容量反应性评估提供理论依据。然而,目前国内外关于 $P_{ET}CO_2$ 联合PLR预测容量反应性的研究多为单中心、小样本,且结果不尽一致^[22-23]。为此,本研究开展了一项前瞻性队列研究,基于142例较大样本,系统评估 $P_{ET}CO_2$ 联合PLR对脓毒性休克机械通气患者容量反应性的预测效能,以期为临床提供一种无创、简便且可靠的床旁评估工具。

本研究结果显示,PLR诱导的 $\Delta P_{ET}CO_2$ 对容量反应性有良好的预测效能,AUC为0.876,最佳截断值0.092对应的敏感度与特异度分别为87.0%和79.8%。这一发现与高征环等^[10]、姚再先等^[11]的研究结论一致,即 $P_{ET}CO_2$ 的变化与CO的变化趋势相符。本研究所获得的AUC高于部分同类研究^[24],并与Huang等^[6]Meta分析中报告的高诊断性能指标(合并敏感度79.0%,特异度90.0%)相吻合。这可能归因于本研究采用的前瞻性设计及相对较大的样本量,从而增强了统计效力。相关性分析显示, $\Delta P_{ET}CO_2$ 与 ΔCO 呈弱相关性($r=0.35$),这符合 $P_{ET}CO_2$ 的生理学特点:在机械通气与代谢状态相对稳定时, $P_{ET}CO_2$ 主要反映CO;然而,肺泡死腔通气比例及机体代谢率的变化也会对其产生影响^[7, 25]。这解释了为何 $\Delta P_{ET}CO_2$ 与 ΔCO 并非完全线性对应,但其变化趋势仍有明确的临床指导意义。

在临床应用中, $P_{ET}CO_2$ 联合PLR的策略有明显优势:该方法完全无创、操作简便、重复性好,且不依赖于昂贵或有创的监测设备。对于无法进行

PiCCO 等有创血流动力学监测,或心脏超声图像获取困难的患者, $P_{ET}CO_2$ 联合 PLR 可作为容量反应性评估的有效补充工具,有助于在床旁快速、安全地指导液体治疗决策。本研究也存在局限性:首先,此为单中心研究,结论的外推性需通过多中心研究进一步验证。其次,为控制混杂因素,本研究排除了有明显肺部疾病的患者,因此该方法在合并严重肺实质病变(如急性呼吸窘迫综合征)导致肺泡死腔显著增大的患者中的适用性仍需谨慎评估。最后,出于伦理及患者安全考虑,本研究未对预测为阳性的患者进行后续液体输注以验证其对实际补液反应的预测准确性。

综上所述, $P_{ET}CO_2$ 联合 PLR 不仅具有明确的生理机制支持,且在临床实践中表现出良好的预测效能与适用性,可作为重症监护病房(intensive care unit, ICU)中实施个体化容量管理可靠、便捷的辅助手段。未来仍需开展多中心、大样本的研究以进一步验证其普适性,并探讨其在合并严重肺部疾病等复杂人群中的应用价值。

4 结 论

对于脓毒性休克机械通气患者, $P_{ET}CO_2$ 联合 PLR(以 $\Delta P_{ET}CO_2 \geq 0.092$ 为界值)是一种诊断效能良好、操作简便的无创容量反应性评估方法,可作为 ICU 床旁实施个体化液体管理的实用工具。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Dugar S, Choudhary C, Duggal A. Sepsis and septic shock: guideline-based management [J]. *Cleve Clin J Med*, 2020, 87 (1): 53–64. DOI: 10.3949/ccjm.87a.18143.
- [2] Rudd KE, Johnson SC, Agesa KM, et al. Global, regional, and national sepsis incidence and mortality, 1990–2017: analysis for the Global Burden of Disease Study [J]. *Lancet*, 2020, 395 (10219): 200–211. DOI: 10.1016/S0140-6736(19)32989-7.
- [3] Chiu C, Legrand M. Epidemiology of sepsis and septic shock [J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2021, 34 (2): 71–76. DOI: 10.1097/ACO.0000000000000958.
- [4] Douglas IS, Alapat PM, Corl KA, et al. Fluid response evaluation in sepsis hypotension and shock: a randomized clinical trial [J]. *Chest*, 2020, 158 (4): 1431–1445. DOI: 10.1016/j.chest.2020.04.025.
- [5] Monnet X, Shi R, Teboul JL. Prediction of fluid responsiveness. What's new? [J]. *Ann Intensive Care*, 2022, 12 (1): 46. DOI: 10.1186/s13613-022-01022-8.
- [6] Huang H, Wu C, Shen Q, et al. Value of variation of end-tidal carbon dioxide for predicting fluid responsiveness during the passive leg raising test in patients with mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis [J]. *Crit Care*, 2022, 26 (1): 20. DOI: 10.1186/s13054-022-03890-9.
- [7] de Courson H, Chauvet J, Le Gall L, et al. Utility of changes in end-tidal carbon dioxide after volume expansion to assess fluid responsiveness in the operating room: a prospective observational study [J]. *Br J Anaesth*, 2020, 125 (5): 672–679. DOI: 10.1016/j.bja.2020.07.018.
- [8] Budnick IM, Popovich JJ, Barros AJ, et al. Change in end-tidal CO_2 after mini-fluid challenge to determine fluid

- responsiveness [J]. *Crit Care Explor*, 2022, 4 (12): e0816. DOI: 10.1097/CCE.0000000000000816.
- [9] 刘艳,唐雯,肖东.呼气末二氧化碳分压评估被动抬腿试验预测脓毒性休克患者容量反应性的价值[J].中华危重病急救医学,2022,34(2):133–137. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20211130-01810.
- [10] 高征环,梁永崧,李秋平.感染性休克患者 $P_{ET}CO_2$ 监测与容量负荷试验结果的关系[J].中外医学研究,2021,19(20):49–52. DOI: 10.14033/j.cnki.cfmr.2021.20.016.
- [11] 姚再先,梁婷.呼气末二氧化碳分压变化评估急性循环衰竭患者容量反应性的价值[J].宁夏医学杂志,2020,42(4):326–328. DOI: 10.13621/j.1001-5949.2020.04.0326.
- [12] Muller L, Toumi M, Bousquet PJ, et al. An increase in aortic blood flow after an infusion of 100 ml colloid over 1 minute can predict fluid responsiveness: the mini-fluid challenge study [J]. *Anesthesiology*, 2011, 115 (3): 541–547. DOI: 10.1097/ALN.0b013e318229a500.
- [13] Monge García MI, Gil Cano A, Gracia Romero M, et al. Non-invasive assessment of fluid responsiveness by changes in partial end-tidal CO_2 pressure during a passive leg-raising maneuver [J]. *Ann Intensive Care*, 2012, 2: 9. DOI: 10.1186/2110-5820-2-9.
- [14] Jacquet-Lagrèze M, Baudin F, David JS, et al. End-tidal carbon dioxide variation after a 100- and a 500-ml fluid challenge to assess fluid responsiveness [J]. *Ann Intensive Care*, 2016, 6 (1): 37. DOI: 10.1186/s13613-016-0141-9.
- [15] Wang XT, Zhao H, Liu DW, et al. Changes in end-tidal CO_2 could predict fluid responsiveness in the passive leg raising test but not in the mini-fluid challenge test: a prospective and observational study [J]. *J Crit Care*, 2015, 30 (5): 1061–1066. DOI: 10.1016/j.jcrc.2015.05.019.
- [16] Beurton A, Teboul JL, Gavelli F, et al. The effects of passive leg raising may be detected by the plethysmographic oxygen saturation signal in critically ill patients [J]. *Crit Care*, 2019, 23 (1): 19. DOI: 10.1186/s13054-019-2306-z.
- [17] 薛贻敏,曾丽娟,陈德伟,等.被动抬腿试验结合颈总动脉峰流速变异度预测保留自主呼吸机械通气的重症脓毒症患者的容量反应性[J].中华医学杂志,2018,98(31):2476–2480. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2018.31.005.
- [18] Mallat J, Fischer MO, Granier M, et al. Passive leg raising-induced changes in pulse pressure variation to assess fluid responsiveness in mechanically ventilated patients: a multicentre prospective observational study [J]. *Br J Anaesth*, 2022, 129 (3): 308–316. DOI: 10.1016/j.bja.2022.04.031.
- [19] Cherpanath TG, Hirsch A, Geerts BF, et al. Predicting fluid responsiveness by passive leg raising: a systematic review and Meta-analysis of 23 clinical trials [J]. *Crit Care Med*, 2016, 44 (5): 981–991. DOI: 10.1097/CCM.0000000000001556.
- [20] Monnet X, Marik P, Teboul JL. Passive leg raising for predicting fluid responsiveness: a systematic review and meta-analysis [J]. *Intensive Care Med*, 2016, 42 (12): 1935–1947. DOI: 10.1007/s00134-015-4134-1.
- [21] Weigl W, Adamski J, Onichimowski D, et al. Methods of assessing fluid responsiveness in septic shock patients: a narrative review [J]. *Anaesthesiol Intensive Ther*, 2022, 54 (2): 175–183. DOI: 10.5114/ait.2022.115368.
- [22] 张二辉,杨超,王玉珍,等. $P_{ET}CO_2$ 的变化联合被动抬腿试验在脓毒性休克机械通气患者容量反应性的应用[J].临床肺科杂志,2020,25(10):1533–1538. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6663.2020.10.017.
- [23] Barak M, Yussim E. Assessment of fluid responsiveness with end-tidal carbon dioxide using a simplified passive leg-raising maneuver: a prospective observational study [J]. *Can J Anaesth*, 2017, 64 (5): 546. DOI: 10.1007/s12630-017-0847-7.
- [24] 王地梅,王鸿.呼气末二氧化碳分压监测对感染性休克机械通气患者容量反应性的预测作用[J].基层医学论坛,2016,20(33):4632–4633.
- [25] 王嘉宇,杜贤进.呼气末二氧化碳监测在血流动力学监测中的应用[J].临床急诊杂志,2020,21(12):1009–1013. DOI: 10.13201/j.issn.1009-5918.2020.12.017.

(收稿日期:2025-12-31)

(责任编辑:邸美仙)