

CADFlow超声血流监测技术对脓毒性休克患者死亡风险的预测价值研究

计宇^{1,2}, 董万国^{1,2}, 曹畅^{1,2}, 肖文艳¹, 华天凤^{1*}

¹安徽医科大学第二附属医院重症医学二科, 安徽 合肥

²安徽医科大学研究生院, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年2月6日; 录用日期: 2026年2月28日; 发布日期: 2026年3月11日

摘要

目的: 脓毒性休克患者早期血流动力学状态与预后密切相关, 但传统有创监测实施复杂, 常规经胸超声受声窗限制。因此, 本研究旨在探讨基于CADFlow技术的无创颈动脉血流监测参数, 特别是颈动脉速度-时间积分(cVTI), 对脓毒性休克患者ICU死亡风险的预测价值。方法: 采用单中心前瞻性观察研究设计, 纳入96例脓毒性休克患者。根据28天临床结局分为生存组(n = 59)和死亡组(n = 37)。应用CADFlow超声监测仪采集入室即刻的血流动力学参数。通过单因素及多因素Cox比例风险回归模型筛选预后独立危险因素; 绘制受试者工作特征(ROC)曲线评估cVTI及联合模型的预测效能, 计算曲线下面积(AUC)及最佳截断值; 采用Kaplan-Meier法绘制生存曲线, 通过Log-rank检验比较不同cVTI水平组间的生存率差异。并通过Bootstrap自助法(n = 1000次)验证模型效能。结果: 与生存组相比, 死亡组患者在0 h的cVTI水平显著降低(28.57 ± 5.65 vs 34.86 ± 7.66 , $P < 0.001$)。多因素Cox回归分析证实, 0 h cVTI是患者ICU的独立危险因素(HR = 0.916, 95%CI: 0.869~0.965, $P = 0.001$)。ROC曲线分析显示, 基于0 h cVTI构建的联合预测模型AUC为0.87 (95%CI: 0.80~0.95), 其预测死亡的最佳截断值为33.5 cm。Kaplan-Meier生存分析显示, 低cVTI组(<33.5 cm)患者的ICU累积死亡率显著高于高cVTI组(Log-rank $P < 0.0001$)。结论: 入室早期cVTI < 33.5 cm是识别脓毒性休克患者高死亡风险的独立预警信号, “低流速”状态可能提示隐匿性低灌注, 具有重要的临床分层与预后评估价值。

关键词

脓毒性休克, 颈动脉超声, 速度-时间积分, 血流动力学监测, 预后

Predictive Value of CADFlow Ultrasound Blood Flow Monitoring Technology for Mortality Risk in Patients with Septic Shock

*通讯作者。

文章引用: 计宇, 董万国, 曹畅, 肖文艳, 华天凤. CADFlow 超声血流监测技术对脓毒性休克患者死亡风险的预测价值研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 1706-1716. DOI: 10.12677/acm.2026.163956

Yu Ji^{1,2}, Wanguo Dong^{1,2}, Chang Cao^{1,2}, Wenyan Xiao¹, Tianfeng Hua^{1*}

¹Department of Critical Care Medicine II, The Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

²Graduate School, Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: February 6, 2026; accepted: February 28, 2026; published: March 11, 2026

Abstract

Objective: The early hemodynamic status of patients with septic shock is closely correlated with prognosis. However, traditional invasive monitoring is complex to implement, while conventional transthoracic echocardiography is limited by acoustic windows. This study aims to evaluate the reliability of non-invasive carotid hemodynamic parameters based on CADFlow technology—Particularly, the Carotid Velocity-Time Integral (cVTI) demonstrates significant predictive value for ICU mortality risk in patients with septic shock. **Methods:** A single-center, prospective observational study was conducted involving 96 patients with septic shock. Patients were stratified into a survivor group (n = 59) and a non-survivor group (n = 37) based on 28-day clinical outcomes. Hemodynamic parameters were acquired immediately upon ICU admission using a CADFlow ultrasound monitor. Univariate and multivariate Cox proportional hazards regression models were utilized to identify independent prognostic risk factors. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were plotted to assess the predictive efficacy of cVTI and a combined model, calculating the Area Under the Curve (AUC) and the optimal cut-off value. Survival curves were generated using the Kaplan-Meier method, and the Log-rank test was employed to compare survival differences between cVTI groups. The model performance was validated through the bootstrap resampling method (with 1000 repetitions). **Results:** Compared with the survivor group, the 0h cVTI levels in the non-survivor group were significantly lower (28.57 ± 5.65 cm vs. 34.86 ± 7.66 cm, $P < 0.001$). Multivariate Cox regression analysis confirmed that 0h cVTI is an independent risk factor for ICU mortality (HR = 0.916, 95% CI: 0.869~0.965, $P = 0.001$). ROC curve analysis indicated that the combined predictive model constructed based on 0 h cVTI achieved an AUC of 0.87 (95% CI: 0.80~0.95), with an optimal cut-off value for mortality prediction of 33.5 cm. Kaplan-Meier survival analysis demonstrated that the cumulative survival rate of patients in the low cVTI group (<33.5 cm) was significantly lower than that of the high cVTI group (Log-rank $P < 0.0001$). **Conclusion:** An early admission cVTI < 33.5 cm serves as an independent warning signal for high mortality risk in patients with septic shock. This “low flow velocity” state may suggest occult hypoperfusion and holds significant value for clinical stratification and prognostic assessment.

Keywords

Septic Shock, Carotid Ultrasound, Velocity-Time Integral (VTI), Hemodynamic Monitoring, Prognosis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

脓毒性休克是重症医学科(Intensive Care Unit, ICU)常见的危重症, 尽管“拯救脓毒症运动(Save Sepsis

Campaign, SSC) 集束化治疗指南不断更新, 患者病死率仍居高不下[1][2]。早期识别组织低灌注并实施精准的血流动力学复苏是改善预后的关键[3][4]。然而, 临床现有的监测手段面临两难困境: 肺动脉导管等有创监测虽精准, 但操作复杂且具有侵入性, 难以在急诊或入室早期迅速部署[5][6]; 而平均动脉压(mean arterial pressure, MAP)、中心静脉压(Central venous pressure, CVP)、乳酸等传统指标往往存在反应滞后, 极易忽视血流动力学尚未优化的“隐匿性休克”状态[7]。尽管经胸超声心动图实现了可视化评估, 但其常受机械通气、手术敷料及患者超声透声条件的限制, 难以实现床旁连续动态监测[8][9]。

颈动脉作为向中枢神经系统供血的关键通路, 在休克病理生理状态下受机体“脑优先机制”调控。理论上, 监测颈动脉血流动力学变化能比外周循环更早、更灵敏地反映中心循环泵功能及每搏输出量的改变[10][11]。CADFlow (Continuous Auto Doppler Flow) 超声血流监测技术通过无创贴片探头, 可连续获取颈动脉速度-时间积分(Carotid velocity-time integral, cVTI)等参数, 克服了传统超声的操作壁垒, 为实现从“压力导向”向“流量导向”的复苏转变提供了技术基础。然而, 目前针对 CADFlow 技术的研究缺乏关于其核心参数对脓毒性休克患者长期预后价值的系统性临床证据。特别是入室早期的 cVTI 水平能否作为独立的预警信号预测患者死亡风险, 尚不明确。因此, 本研究通过前瞻性观察, 旨在通过多因素模型探讨早期 cVTI 水平对脓毒性休克患者 ICU 死亡率的预测价值及最佳截断值, 为临床精准分层管理提供依据。

2. 对象与方法

2.1. 研究对象

本研究为单中心前瞻性观察研究, 收集 2024 年 8 月至 2026 年 2 月入住安徽医科大学第二临床医学院重症医学二科确诊为脓毒性休克的患者。纳入标准参照 Sepsis-3.0 诊断标准。排除标准: 颈部手术史、严重的颈动脉狭窄、心律失常(如房颤)干扰监测者。最终纳入 96 例患者, 根据入室后 28 天临床结局分为生存组($n = 59$)和死亡组($n = 37$)。

2.2. 监测方法

记录入组患者一般人口学特、既往病史等。临床理化指标包括白细胞计数、红细胞压积、血小板计数、胆红素、血肌酐、血清钾离子浓度、血清钠离子浓度, 计算患者入 ICU 时的疾病严重程度评分, 包括急性生理与慢性健康评分系统第二版(Acute Physiology and Chronic Health Evaluation II, APACHEII)和序贯器官衰竭评估(Sequential Organ Failure Assessment, SOFA)评分, 收集患者入住 ICU 时间、ICU 预后情况等指标。应用 CADFlow 超声心输出量监测仪, 于患者确诊脓毒性休克入 ICU 后的 0 h (基线)进行监测, 收集相关血流动力学指标及基础生命体征和血气分析结果。

2.3. 统计学方法

采用 SPSS 27.0 及 R 语言 4.2.0 进行数据分析。计量资料组间比较采用 t 检验或 Mann-Whitney U 检验。应用 Cox 比例风险回归模型筛选死亡的独立危险因素。绘制 ROC 曲线计算曲线下面积(AUC)并确立最佳截断值。生存分析采用 Kaplan-Meier 法及 Log-rank 检验。并采用 Bootstrap 自助法进行模型内部验证及校准度评价。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2.4. 伦理审查

本研究为一项前瞻性、单中心、观察性队列研究。研究方案已通过安徽医科大学第二附属医院伦理委员会的审核批准(伦理批号: [YX2025-243]), 并严格遵守《赫尔辛基宣言》及其修订版的相关伦理准则。

3. 结果

3.1. 基线资料比较

本研究共纳入 96 例脓毒性休克患者，其中生存组 59 例，死亡组 37 例。与生存组相比，死亡组患者在入室即刻(0 h)的病情更为危重，具体表现为 SOFA 评分及血乳水平均显著升高($P < 0.05$)。在血流动力学方面，死亡组 0 h 的 cVTI 及每搏量指数(Stroke Volume Index, SVI)均显著低于生存组，差异具有统计学意义($P < 0.01$)；而两组在性别分布等一般资料上无显著差异，具体细则见表 1。

Table 1. Statistical summary of patient demographics

表 1. 患者一般资料统计表

变量	总体(n = 96)	生存组(n = 59)	死亡组(n = 37)	P 值
人口学特征				
身高(cm)	167.00 (160.00, 172.00)	165.00 (160.00, 172.00)	169.00 (161.50, 170.50)	0.609
体重(kg)	65.00 (59.00, 74.00)	67.00 (59.00, 72.50)	62.00 (59.50, 76.00)	0.707
年龄, 年	61.96 ± 14.40	59.41 ± 16.34	66.03 ± 9.43	0.014
APACHEII 总分	22.27 ± 5.15	20.76 ± 5.71	24.68 ± 2.79	<0.001
SOFA 总分	9.35 ± 4.39	7.97 ± 4.06	11.57 ± 4.02	<0.001
基础生命体征				
MAP	83.83 ± 19.91	84.83 ± 21.30	82.24 ± 17.65	0.538
VIS	8.59 ± 4.45	8.1 ± 4.75	9.36 ± 3.85	0.158
心率	109.40 ± 24.61	111.86 ± 26.02	105.46 ± 21.94	0.216
呼吸	24.24 ± 10.78	24.19 ± 11.99	24.32 ± 8.65	0.952
体温	38.04 ± 8.60	37.91 ± 7.80	38.23 ± 9.86	0.862
实验室指标				
血清钠	141.84 ± 7.11	142.21 ± 8.07	141.26 ± 5.39	0.538
血清钾	4.04 (3.62, 4.50)	4.03 (3.68, 4.46)	4.04 (3.53, 4.61)	0.676
肌酐	194.37 ± 162.75	156.91 ± 123.97	251.61 ± 197.03	0.013
总胆红素	16.60 (9.85, 31.25)	20.50 (10.70, 36.25)	12.10 (7.88, 23.43)	0.050
血小板	148.52 ± 125.83	138.09 ± 99.75	164.44 ± 157.91	0.331
白细胞	12.55 ± 9.06	10.97 ± 7.39	14.96 ± 10.81	0.058
红细胞压积	30.00 (24.50, 38.50)	31.00 (25.50, 38.50)	28.00 (23.75, 35.25)	0.231
血气指标(0 h)				
LAC	4.72 ± 2.52	4.04 ± 2.10	5.79 ± 2.78	<0.001
PH	7.37 ± 0.14	7.39 ± 0.12	7.36 ± 0.17	0.353
PO	109.99 ± 60.39	107.31 ± 65.09	114.10 ± 53.03	0.602
PCO ₂	32.15 ± 9.68	32.01 ± 8.21	32.35 ± 11.70	0.873
HCO ₃	18.50 (15.15, 22.25)	19.90 (15.25, 23.05)	17.90 (15.02, 19.85)	0.211
P/F	244.37 ± 132.62	240.34 ± 117.51	250.53 ± 154.46	0.722

续表

	CADFlow 指标(0 h)			
cVTI	32.44 ± 7.58	34.86 ± 7.66	28.57 ± 5.65	<.001
CPV	6.42 ± 1.59	6.83 ± 1.59	5.76 ± 1.36	0.001
Vmax	113.50 (92.0, 132.0)	118.00 (105.5, 136.0)	106.00 (88.0, 122.0)	0.017
Vmin	27.62 ± 11.88	28.25 ± 12.14	26.65 ± 11.56	0.532
SV	60.48 ± 16.01	64.88 ± 15.42	53.46 ± 14.52	<0.001
SVI	35.85 ± 9.70	38.71 ± 9.02	31.30 ± 9.09	<0.001
CO	6.22 ± 1.52	6.42 ± 1.59	5.91 ± 1.36	0.106
CI	3.68 ± 0.81	3.83 ± 0.81	3.44 ± 0.76	0.020
TAV	53.00 (40.00, 61.50)	53.00 (44.00, 60.00)	51.50 (37.75, 64.50)	0.906
ccFT	308.68 ± 42.15	304.18 ± 41.93	315.56 ± 42.12	0.210
ΔCDPV	12.48 ± 7.71	12.60 ± 5.44	12.29 ± 10.55	0.900
PI	1.53 ± 0.53	1.51 ± 0.49	1.55 ± 0.58	0.688
RI	0.73 (0.67, 0.82)	0.73 (0.65, 0.82)	0.72 (0.68, 0.82)	0.661
dvMAX	15.39 ± 5.32	15.29 ± 4.94	15.55 ± 5.92	0.816
ΔVTI	11.50 (6.75, 18.00)	12.00 (7.90, 17.00)	9.90 (6.10, 21.00)	0.778
SVV	13.00 (7.00, 18.00)	13.00 (8.00, 17.00)	11.45 (6.33, 21.75)	0.841
SVR	1219.25 ± 453.92	1221.04 ± 467.59	1216.53 ± 438.73	0.963
SVRI	2063.58 ± 787.95	2081.85 ± 823.93	2035.67 ± 740.13	0.786
DO2	787.84 ± 308.77	811.11 ± 320.72	752.94 ± 290.84	0.384

3.2. 单因素 COX 回归分析

为进一步评估超声血流监测技术所采集的血流动力学指标对预后的预测价值, 将入室即刻(0 h)的相关参数纳入单因素 Cox 比例风险回归模型。分析结果见表 2 所示, 其显示, cVTI [HR = 0.908, 95%CI (0.863~0.955), $P < 0.001$]、SVI [HR = 0.919, 95%CI (0.877~0.963), $P < 0.001$]; cVTI 与 SVI 均与患者 ICU 死亡风险显著相关。同时, 其他反映心脏泵血功能及收缩力的指标也表现出显著的统计学意义, 其中包括 CPV (HR = 0.711, $P = 0.002$)、SV [HR = 0.959, 95% CI (0.935~0.983), $P = 0.001$]和 Vmax (HR = 0.985, $P = 0.013$)、CI (HR = 0.580, $P = 0.017$)。上述所有指标的风险比均小于 1, 提示这些血流动力学参数水平的降低是导致脓毒性休克患者死亡的危险因素, 即参数值越低, 患者的 ICU 死亡风险越高。

Table 2. Single-factor COX regression analysis of CADFlow indicators

表 2. CADFlow 指标单因素 COX 回归

Variables	β	S. E	Z	P	HR (95%CI)
Cvti 0 h	-0.096	0.026	-3.753	<0.001	0.908 (0.863~0.955)
Cpv 0 h	-0.341	0.111	-3.065	0.002	0.711 (0.571~0.884)
Vmax 0 h	-0.015	0.006	-2.493	0.013	0.985 (0.974~0.997)
SV 0 h	-0.042	0.013	-3.288	0.001	0.959 (0.935~0.983)
SVI 0 h	-0.084	0.024	-3.526	<0.001	0.919 (0.877~0.963)
CI 0 h	-0.545	0.228	-2.389	0.017	0.580 (0.370~0.907)

3.3. 多因素 Cox 回归分析

在指标选择上,虽然单因素分析显示 SV、CO、Vmax 等多个指标均具有统计学意义,但考虑到血流动力学参数间存在高度的共线性,为保证模型的稳定性,选取了最具代表性的 cVTI 纳入多因素模型,见图 2。为校正潜在混杂因素的影响,确认上述指标的独立预测价值,本研究纳入了公认的脓毒症预后相关临床指标:年龄代表生理储备,SOFA 评分代表器官功能衰竭程度,以及乳酸代表组织代谢灌注水平。构建多因素 Cox 比例风险模型。将 0 h 的相关指标纳入模型,表 3 结果显示 SOFA 评分[HR = 1.147, 95%CI (1.062~1.238), $P < 0.001$]与 cVTI_0 h [HR = 0.916, 95%CI (0.869~0.965), $P = 0.001$]均为 ICU 死亡的独立危险因素。

Table 3. Multivariate Cox regression analysis for 0 h CVI, SOFA, 0 h LAC, and age
表 3. 0 h cVTI、SOFA、0 h LAC、age 多因素 COX 回归

Variables	β	S. E	Wald	P	95%CI	HR
Cvti 0 h	-0.088	0.027	-3.285	0.001	0.869~0.965	0.916
SOFA	0.137	0.039	3.513	<0.001	1.062~1.238	1.147
LAC 0 h	0.085	0.049	1.749	0.080	0.990~1.198	0.080
age	0.015	0.015	0.981	0.327	0.986~1.045	1.015

3.4. 单多因素 ROC 结果分析

为直观评估并比较各时间点超声血流监测技术指标对脓毒性休克预后的预测效能,本研究绘制了 ROC 曲线并计算相应的 AUC 值及最佳截断值,见表 4 所示,单因素 0 h cVTI 的 AUC 为 0.75 (95%CI: 0.65~0.85),灵敏度为 58%,特异度为 86%,最佳截断值(Cut-off)为 33.5,ROC 曲线图见图 1。为进一步提高预后预测的准确性,本研究基于多因素 Cox 回归筛选出的独立危险因素,构建了包含超声血流监测技术指标、乳酸、SOFA 评分及年龄的联合预测模型,并计算其 ROC 曲线下面积。多指标联合模型的预测效能显著优于单一指标如表 5 所示,多因素。“0 h cVTI + 0 h Lac + SOFA + age”联合模型,其 AUC 高达 0.87 (95%CI: 0.80~0.95),见图 2。该联合模型在保证 73%灵敏度的同时,表现出极高的特异度(95%),提示该组合是入室早期评估患者死亡风险的最佳方案。

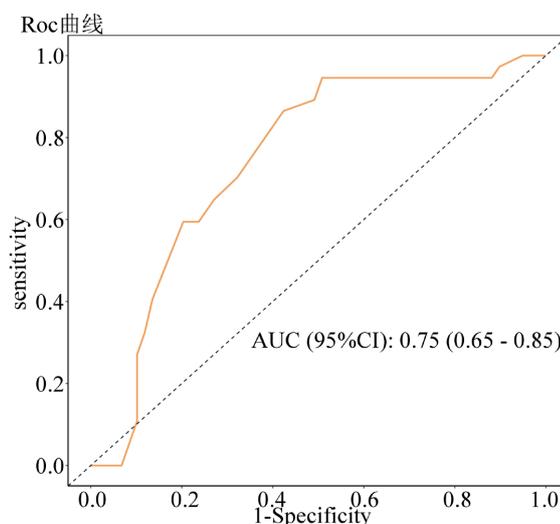


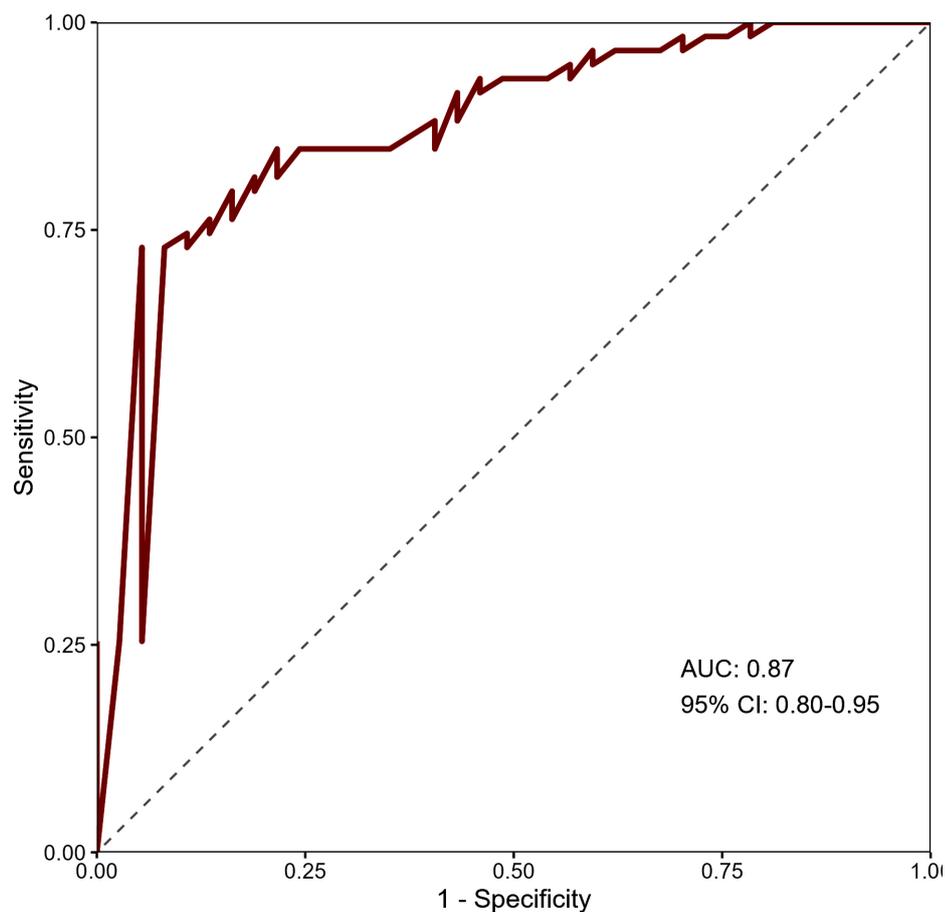
Figure 1. cVTI single-factor ROC curve at 0 hours
图 1. cVTI 单因素 ROC 曲线图 0 h

Table 4. Results of single-factor ROC curve plots**表 4.** 单因素 ROC 曲线图结果

指标	AUC	95%CI	敏感度/%	特异度/%	Cut-off
0 h cVTI	0.75	0.65~0.85	58	86	33.5

Table 5. Multifactorial ROC curve results**表 5.** 多因素 ROC 曲线图结果

指标	AUC	95%CI	敏感度/%	特异度/%
0 h cVTI + 0 h Lac + SOFA + age	0.87	0.80~0.95	73	95

**Figure 2.** cVTI multi-factor ROC curves at 0 hours**图 2.** cVTI 多因素 ROC 曲线图 0 h

3.5. 绘制 K-M 生存曲线比较 ICU 死亡率差异

以 ROC 曲线分析确定的最佳截断值(Cut-off)为界限, 将超声血流监测技术的核心指标转化为二分类变量(具体 Cut-off 值详见表 4), 进行 Kaplan-Meier 生存曲线分析, 并使用 Log-rank 检验比较组间差异。如图 3 所示, 0 h cVTI < 33.5 的低 cVTI 组与 cVTI ≥ 33.5 的高 cVTI 组之间患者 28 天生存率存在显著差异($P < 0.0001$), 低 cVTI 组 28 天生存率更低。

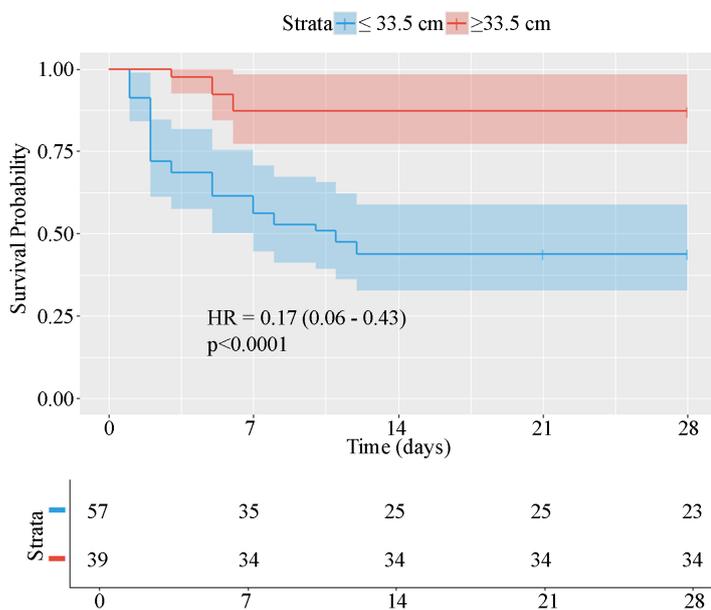


Figure 3. ICU survival curves for patients grouped by cVTI cut-off at 0 hours
图 3. 以 cVTI Cut-off 分组患者 ICU 生存曲线图 0 h

3.6. Bootstrap 内部验证

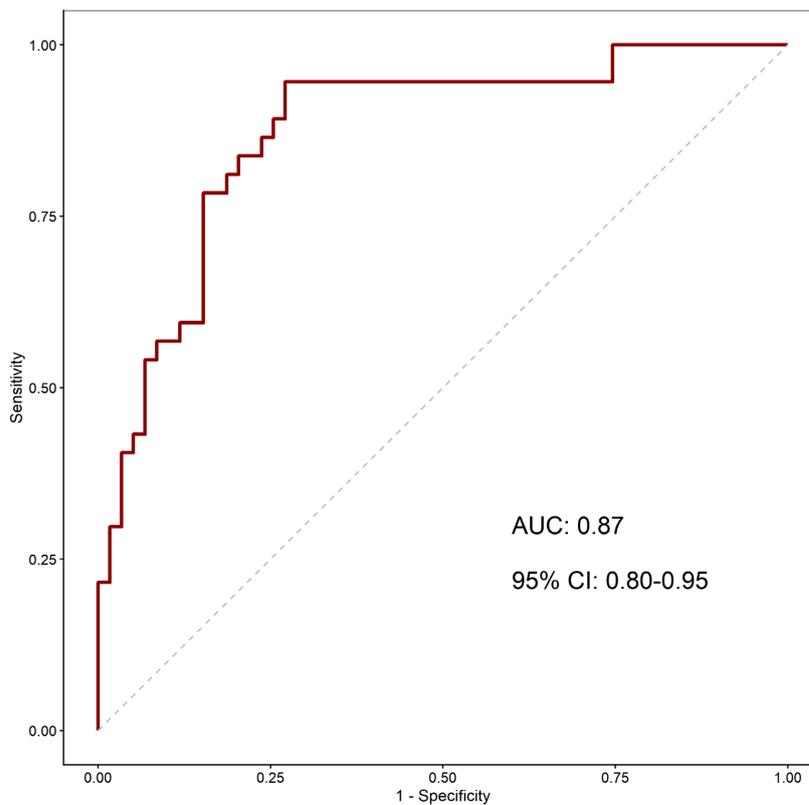


Figure 4. Internal validation of the cVTI combined model using 1000 bootstrap resamples at 0 hour
图 4. cVTI 联合模型内部验证 bootstrap 1000 次 0 h

为了验证上述多因素联合预测模型的稳健性及可靠性,并评估模型在样本量受限情况下是否存在过拟合风险,本研究采用 Bootstrap 重抽样法(Re-sampling, $n = 1000$ 次)对联合模型进行了内部验证。如图 4 所示,验证集结果与原始 ROC 分析结果高度一致:cVTI 联合模型验证在 1000 次重抽样验证后,基于 cVTI 的联合模型在入室即刻(0 h)的平均 AUC 保持为 0.87 (95%CI: 0.80~0.95),证实了本研究构建的预后模型并非样本偶然性导致的过拟合结果,进一步支持了将 cVTI 纳入脓毒性休克预后评估体系的科学性与可靠性。

4. 讨论

4.1. CADFlow 技术在脓毒性休克预后评估中的临床价值

脓毒性休克作为 ICU 内常见的致死性病理状态,其本质特征在于循环灌注衰竭导致的广泛组织缺氧及细胞代谢紊乱[12][13]。目前临床复苏虽然长期使用 MAP、CVP 等压力参数作为指导,但学术界已逐步确立了由“压力目标”转向“流量优化”的治疗范式[14]。鉴于此,本项前瞻性队列研究着眼于 CADFlow 技术,首次系统评估了其在脓毒性休克患者临床管理中的应用潜能。数据分析揭示,入室即刻(0 h)的 cVTI 与患者 28 天临床结局之间存在着紧密的内在联系。具体而言,死亡组患者在入室初期的 cVTI 水平呈现出显著的低动力状态,均值仅为 28.57 ± 5.65 cm,远低于生存组的 34.86 ± 7.66 cm ($P < 0.001$)。即便在纳入年龄、SOFA 评分及乳酸等传统预后因子进行多因素 Cox 回归校正后,低 cVTI 依然表现为预测 ICU 死亡的独立危险因素(HR = 0.916)。进一步的阈值分析锁定 33.5 cm 为最佳截断值,处于该水平以下的患者其生存曲线呈现断崖式下跌。值得关注的是,当 cVTI 被整合进包含年龄、SOFA 及乳酸的联合预测模型时,其整体预测效能(AUC)跃升至 0.87,显著超越了任何单一指标的诊断价值。上述证据表明,将 CADFlow 技术引入脓毒性休克的早期集束化治疗流程,作为临床决策的辅助工具,具有坚实的循证医学基础。

4.2. 颈动脉血流参数预测预后的病理生理学基础

颈动脉血流动力学参数之所以能成为全身性不良预后的敏锐“哨点”,其根源在于休克状态下机体发生的血流重分布及“脑优先保护机制”的演变规律[15][16]。处于休克代偿期时,交感-肾上腺髓质系统的激活导致儿茶酚胺大量释放,驱动皮肤、内脏及骨骼肌等外周血管强烈收缩,以此维持中心灌注压。基于颈动脉作为低阻力血管的特性,在自身调节机制作用下,即便心输出量(CO)出现波动,脑灌注理论上仍应保持相对稳态,甚至通过代偿性充血以对抗缺氧[17][18]。然而,本研究数据呈现出截然不同的病理图景:死亡组患者入室伊始即处于极度低流速状态,cVTI 均值仅为 28.57 cm。这种显著的血流抑制揭示了一个严峻事实——机体的“脑优先”代偿防线已全线溃败。低 cVTI 信号的出现,不仅意味着心泵功能衰竭或绝对容量亏空已突破了维持中枢循环的底线,更标志着机体已滑入严重失代偿阶段,随之而来的将是多器官功能衰竭与死亡风险的剧增。数据分析中另一引人注目的发现是:尽管无统计学差异($P = 0.538$),生存组与死亡组在入室时的 MAP 水平看似相当(84.83 vs 82.24 mmHg),但两组的 cVTI 却呈显著分离态势。这一结果有力地印证了临床常被忽视的“压力与流量分离”现象。在去甲肾上腺素等血管活性药物维持下,患者常表现出“血压达标”的虚假安全感,而实质上的每搏输出量(流量)可能仍处于严重赤字。相较于受血管张力严重干扰的压力指标,作为流速积分参数的 cVTI 能更直接地映射每搏输出量,从而穿透血压假象,精准识别出潜在的隐匿性低灌注。此外,本研究发现生存组与死亡组在入室即刻(0h)的 VIS 评分无显著统计学差异。这主要是受限于 ICU 早期复苏的临床流程:在入室初期,由于中心静脉通路建立的时间滞后性,高剂量血管活性药物的滴定往往尚未达到峰值。这一治疗时间窗的存在,虽然导致治疗初期 VIS 评分暂时无法区分病情严重程度,却构成了一个适宜进行 cVTI 测量的时间窗口。由

于此时不存在超大剂量血管收缩药物的强效干扰，死亡组观测到的低 cVTI 水平更真实地反映了其每搏输出量的绝对亏空及中心循环的衰竭。

4.3. 多模态联合模型的构建优势：立体化预后评估体系的建立

脓毒症病理过程的极度复杂性决定了单一指标常常难以窥其全貌。鉴于此，本研究构建并验证了包含“0 h cVTI + 乳酸 + SOFA + 年龄”的多因子联合预测模型，其 AUC 值达到 0.87，在预测效能上对单一 cVTI (AUC = 0.75) 或单一乳酸指标形成了显著的压倒性优势。这一优异表现深刻诠释了多模态监测在重症管理中的必要性。该联合模型的独特价值在于其成功实现了时间维度的整合，将“既往累积损伤(乳酸/SOFA)”与“即时功能状态(cVTI)”有机融合。从临床场景来看，一名年轻患者虽因严重的早期缺氧导致乳酸飙升，但若复苏后 cVTI 迅速反弹，提示其当前泵功能已恢复，其预后潜力往往优于那类乳酸水平尚可但 cVTI 持续低迷的高龄患者。正是基于对这种深层次供需平衡关系的精准捕捉，本研究提出的联合模型为临床提供了更为立体、动态的风险分层工具。同时本研究界定的 33.5 cm 截断值，实质上为临床提供了一个极简的“红绿灯”预警系统。一旦发现入室早期患者 cVTI 低于该阈值，即提示其已置身于高危死亡风险区，这要求临床医生必须立即启动更为积极的血流动力学优化策略(如 PLR 试验或调整正性肌力药物)，而非被动等待乳酸水平的滞后性下降。

4.4. 研究局限性

尽管本研究结论具有明确的临床指导意义，但必须客观审视其内在局限：首要限制在于单中心与样本规模。本研究虽纳样 96 例满足统计需求，但单中心设计不可避免地受到特定治疗习惯(如复苏策略偏好、抗生素时机)的影响，这使得 33.5 cm 这一截断值的普适性尚待多中心、大样本研究的进一步验证。其次是血管活性药物对颈动脉管径的影响。Bonyhay 等[19]的研究指出，血管活性药物确实会改变动脉张力，但颈总动脉作为弹性大动脉，其顺应性与外周阻力血管存在差异。更重要的是，基于流体力学原理，若假定去甲肾上腺素导致颈动脉显著收缩，在心输出量恒定的前提下，流速积分 cVTI 应出现代偿性升高。然而，本研究的死亡组患者在普遍使用血管活性药物的背景下，并未出现 VTI 的假性升高，反而表现为显著的某些降低。这种低流速现象在逻辑上提供了更强的证据：这表明患者的每搏输出量衰竭程度极重，即便潜在的血管收缩效应试图通过增加流速来代偿，也无法掩盖流量下跌的事实。cVTI 作为每搏量替代指标的前提是颈动脉横截面积相对恒定。然而既往生理学证据提示，在大剂量 α -受体激动剂(如去甲肾上腺素)作用下，血管平滑肌收缩可能导致管径缩窄。依据流体力学原理，若流量不变而面积缩小，流速将出现代偿性升高。这种“解耦”效应可能导致极高剂量升压药使用背景下，cVTI 对实际每搏量产生高估。最后，心律失常的排除标准限制了适用人群。本研究未纳入房颤患者，因不规则心律引发的逐拍波动会严重干扰自动算法。这一技术盲区在老年合并房颤的高发人群中仍需突破。

5. 结论

综上所述，本研究不仅证实了 CADFlow 核心参数 cVTI 对脓毒性休克死亡风险的独立预测效能，更深刻揭示了早期“低流速”背后潜藏的病理生理危机。入室早期 cVTI < 33.5 cm 构成了识别高危患者的关键抓手。推动该无创、实时技术融入常规诊疗路径，将有力促进重症治疗从“经验性压力调控”向“精准化流量管理”的跨越，最终实现患者预后的实质性改善。

基金项目

国家自然科学基金(编号：82072134)；安徽省转化医学研究院科研基金(编号：2023zhyx-C64)。

参考文献

- [1] Seymour, C.W., Liu, V.X., Iwashyna, T.J., Brunkhorst, F.M., Rea, T.D., Scherag, A., *et al.* (2016) Assessment of Clinical Criteria for Sepsis: For the Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3). *JAMA*, **315**, 762-774. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.0288>
- [2] Shankar-Hari, M., Phillips, G.S., Levy, M.L., Seymour, C.W., Liu, V.X., Deutschman, C.S., *et al.* (2016) Developing a New Definition and Assessing New Clinical Criteria for Septic Shock: For the Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3). *JAMA*, **315**, 775-787. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.0289>
- [3] Gildea, A., Mulvihill, C., McFarlane, E., Gray, A. and Singer, M. (2024) Recognition, Diagnosis, and Early Management of Suspected Sepsis: Summary of Updated NICE Guidance. *BMJ*, **385**, q1173. <https://doi.org/10.1136/bmj.q1173>
- [4] Hidalgo, J.L., Kumar, V.K., Akech, S.O., Myatra, S.N., Jacob, S.T., Kortz, T., *et al.* (2025) The Sepsis Chain of Survival: A Comprehensive Framework for Improving Sepsis Outcomes. *Critical Care Medicine*, **53**, e1886-e1892. <https://doi.org/10.1097/ccm.0000000000006796>
- [5] Thakkar, A.B. and Desai, S.P. (2018) Swan, Ganz, and Their Catheter: Its Evolution over the Past Half Century. *Annals of Internal Medicine*, **169**, 636-642. <https://doi.org/10.7326/m17-2145>
- [6] Li, C., Wang, H., *et al.* (2021) The Effects of Hemodynamic Monitoring Using the PiCCO System on Critically Ill Patients. *American Journal of Translational Research*, **13**, 10578-10585.
- [7] Cheong, I., Otero Castro, V., Sosa, F.A., Tort Oribe, B., Früchtenicht, M.F., Tamagnone, F.M., *et al.* (2023) Passive Leg Raising Test Using the Carotid Flow Velocity-Time Integral to Predict Fluid Responsiveness. *Journal of Ultrasound*, **27**, 97-104. <https://doi.org/10.1007/s40477-023-00824-1>
- [8] Andrei, M., Dragoescu, N.A., Stanculescu, A., Chiutu, L., Dragoescu, O. and Istratoaie, O. (2024) Picco or Cardiac Ultrasound? Which Is Better for Hemodynamic Monitoring in ICU? *Medicina*, **60**, Article 1884. <https://doi.org/10.3390/medicina60111884>
- [9] Aslan, N., Yildizdas, D., Horoz, O.O., Coban, Y., Demir, F., Erdem, S., *et al.* (2020) Comparison of Cardiac Output and Cardiac Index Values Measured by Critical Care Echocardiography with the Values Measured by Pulse Index Continuous Cardiac Output (PiCCO) in the Pediatric Intensive Care Unit: A Preliminary Study. *Italian Journal of Pediatrics*, **46**, Article No. 47. <https://doi.org/10.1186/s13052-020-0803-y>
- [10] Kenny, J.S. (2024) The Left Ventricular Outflow Tract and Carotid Artery Velocity Time Integrals. *Frontiers in Medical Technology*, **6**, Article ID: 1320810. <https://doi.org/10.3389/fmedt.2024.1320810>
- [11] Chanthawatthanarak, S., Boonasa, K., Apiratwarakul, K., Cheung, L.W., Tiamkao, S. and Ienghong, K. (2025) Agreement between Carotid and LVOT Non-Invasive Cardiac Output Measurements in ED Septic Shock Patients: A Prospective Observational Study. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 19911. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05077-y>
- [12] 杜欣欣, 于湘友. 2021 脓毒症指南: 临床研究回顾与思考[J]. 中国急救医学, 2022, 42(4): 281-284.
- [13] 马雨, 尹云翔, 周艺蕉, 等. 脓毒性休克初始液体复苏的争议与研究进展[J]. 中国急救医学, 2023, 43(1):70-75.
- [14] Monnet, X., Messina, A., Greco, M., Bakker, J., Aissaoui, N., Cecconi, M., *et al.* (2025) ESICM Guidelines on Circulatory Shock and Hemodynamic Monitoring 2025. *Intensive Care Medicine*, **51**, 1971-2012. <https://doi.org/10.1007/s00134-025-08137-z>
- [15] Peachey, T., Tang, A., Baker, E.C., Pott, J., Freund, Y. and Harris, T. (2016) The Assessment of Circulating Volume Using Inferior Vena Cava Collapse Index and Carotid Doppler Velocity Time Integral in Healthy Volunteers: A Pilot Study. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, **24**, Article No. 108. <https://doi.org/10.1186/s13049-016-0298-0>
- [16] D'Arrigo, S., Dell'Anna, A.M., Sandroni, C., Messina, A., Cacciola, S., Pacini, C., *et al.* (2023) Can Carotid Artery Doppler Variations Induced by the End-Expiratory Occlusion Maneuver Predict Fluid Responsiveness in Septic Shock Patients? *Critical Care*, **27**, Article No. 153. <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04422-9>
- [17] Rudziński, W., Swiat, M., Tomaszewski, M., *et al.* (2007) Cerebral Hemodynamics and Investigations of Cerebral Blood Flow Regulation. Nuclear Medicine Review. *Central & Eastern Europe*, **10**, 29-42.
- [18] Li, R., Zhang, Y., Zheng, S., Zhang, W., Du, K., He, W., *et al.* (2023) Biomechanical Characteristics in the Carotid Artery: Noninvasive Assessment Using Subharmonic Emissions from Microbubbles. *Medical Physics*, **50**, 6857-6863. <https://doi.org/10.1002/mp.16542>
- [19] Kim, S.G., Jo, I.J., Kang, S.Y., Yoo, J., Lee, G., Park, J.E., *et al.* (2021) The Effect of Norepinephrine on Common Carotid Artery Blood Flow in Septic Shock Patients. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 16763. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96082-4>