

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.04.011

# 超声心动图联合 NT-proBNP 对心力衰竭容量状态的评估价值

蒋晓玲, 杨露珊, 肖勤涛

(金华文荣医院 B 超室, 浙江金华 321100)

**【摘要】目的** 探讨超声心动图联合 N 端脑钠肽前体(N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)对心力衰竭(heart failure, HF)容量状态的评估价值。**方法** 回顾性纳入 2023 年 2 月至 2025 年 4 月金华文荣医院心内科住院治疗的 HF 患者 100 例。患者于入院 24 h 内完成超声心动图和 NT-proBNP 检测,依据 72 h 内利尿反应构建临床复合参照标准,分为容量负荷偏高组(42 例)、可能容量负荷偏高组(28 例)和容量相对稳定组(30 例)。根据左房容积指数(left atrial volume index, LAVI)、E/e'、下腔静脉(inferior vena cava, IVC)内径及塌陷率构建 0~4 分超声充血评分,并以  $\ln(\text{NT-proBNP})$  和超声充血评分建立联合评估模型。比较三组指标差异,分析超声参数与 NT-proBNP 的相关性,并采用 Kappa 检验、受试者操作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线和 DeLong 检验评价不同方法的评估效能。**结果** 三组 NT-proBNP 和超声心动图参数比较,差异均具有显著性(均  $P < 0.001$ )。NT-proBNP 与 LAVI、E/e' 及 IVC 内径呈正相关,与 IVC 塌陷率呈负相关。联合模型为  $\text{Logit}(P) = -12.056 + 1.126 \times \ln(\text{NT-proBNP}) + 0.984 \times \text{超声充血评分}$ 。联合评估与临床复合参照标准的一致性较高(Kappa=0.616),AUC 为 0.856(95%CI: 0.784~0.928),高于超声充血评分的 0.783 和 NT-proBNP 的 0.745(DeLong 检验  $P=0.032, 0.006$ );敏感度和特异度分别为 85.71% 和 79.31%。**结论** 超声心动图容量参数与 NT-proBNP 具有互补价值,二者联合可提高对明确容量负荷偏高的识别效能,可作为 HF 临床容量评估的无创辅助工具。

**【关键词】** 心力衰竭; 容量状态; 超声心动图; N 端脑钠肽前体**【中图分类号】** R541.6; R445.1**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2026) 04-0057-06

## The evaluation value of echocardiography combined with NT-proBNP in assessing the volume status of heart failure

JIANG Xiaoling, YANG Lushan, XIAO Qintao

(B-ultrasound Room, Jinhua Wenrong Hospital, Jinhua 321100, Zhejiang, China)

**【Abstract】Objective** To explore the value of echocardiography combined with N-terminal pro-brain natriuretic peptide (NT-proBNP) for evaluating the volume status of heart failure (HF). **Methods** This retrospective study included 100 patients hospitalized for HF at Jinhua Wenrong Hospital from February 2023 to April 2025. Echocardiography and NT-proBNP measurement were completed within 24 h of admission. A clinical composite reference based on the diuretic response within 72 hours was used to classify patients as definite volume overload ( $n=42$ ), possible volume overload ( $n=28$ ), or relatively stable volume status ( $n=30$ ). An echocardiographic congestion score (0-4 points) was derived from left atrial volume index (LAVI), E/e' ratio, inferior vena cava (IVC) diameter, and IVC collapsibility. A combined model incorporating  $\ln$ -transformed NT-proBNP and the echocardiographic congestion score was developed. Group differences, correlations, agreement, and discriminative performance were evaluated using Kappa statistics, receiver operating characteristic (ROC) curves, and DeLong tests. **Results** NT-proBNP and all echocardiographic parameters differed significantly across the three groups (all  $P < 0.001$ ). NT-proBNP was positively correlated with LAVI, E/e', and IVC diameter and negatively correlated with IVC collapsibility. The combined equation was  $\text{Logit}(P) = -12.056 + 1.126 \times \ln(\text{NT-proBNP}) + 0.984 \times \text{echocardiographic congestion score}$ . The combined assessment showed substantial agreement with the clinical composite reference (Kappa=0.616) and achieved an area under the curve of 0.856 (95%CI: 0.784-0.928), exceeding that of the echocardiographic score (0.783;  $P=0.032$ ) and NT-proBNP alone (0.745;  $P=0.006$ ). Sensitivity and specificity were 85.71% and 79.31%, respectively. **Conclusion** Echocardiographic congestion

收稿日期: 2025-06-25。

作者简介: 蒋晓玲, 本科, 主治医师, 研究方向: 心力衰竭的影像诊断。E-mail: 1148901628@qq.com。

parameters and NT-proBNP provide complementary information. Their combined use improves identification of definite volume overload and may serve as a practical noninvasive adjunct to clinical volume assessment in HF.

【Key words】 Heart failure; Volume status; Echocardiography; N-terminal pro-brain natriuretic peptide

心力衰竭(heart failure, HF)是多种心血管疾病的终末阶段,容量潴留和充血既是症状加重、反复住院的重要病理基础,也是利尿治疗和液体管理的核心<sup>[1]</sup>。准确识别容量负荷,有助于实现改善充血与避免低灌注、肾功能恶化之间的临床平衡。然而,临床常规评估指标易受年龄、肥胖和基础疾病干扰,对隐匿性或残余充血的识别能力有限<sup>[2]</sup>。

超声心动图可从心腔结构、左心充盈压和静脉回流等维度评价容量负荷<sup>[3]</sup>。左房容积指数(left atrial volume index, LAVI)、二尖瓣口舒张早期峰值速度(E)/二尖瓣环间隔侧、侧壁侧舒张早期运动速度(e')以及下腔静脉(inferior vena cava, IVC)内径和塌陷率均可提供无创评估信息,但其单项参数易受心律、右心功能、呼吸状态及操作者经验影响<sup>[4]</sup>。N末端脑钠肽前体(N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)可反映心肌壁张力,在HF诊断中应用广泛,但其水平也受年龄、肾功能、心房颤动(简称房颤)及HF表型等因素干扰<sup>[5]</sup>。近年来,多参数联合评估逐渐成为容量管理的发展方向,但现有研究对超声指标与NT-proBNP的组合方式、量化界值及临床操作流程尚未形成统一共识。本研究基于住院HF患者的临床资料,构建包含超声充血评分和NT-proBNP的联合评估方法,并在校正肾功能、左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)及心功能分级后评价其一致性与区分能力,旨在为入院早期容量状态判断提供可重复、易实施的无创评估手段。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

回顾性纳入金华文荣医院2023年2月至2025年4月住院治疗的HF患者100例。纳入标准:①年龄 $\geq 18$ 岁;②符合HF诊断标准<sup>[6]</sup>,因充血表现或容量管理需住院治疗;③入院24 h内完成超声心动图和NT-proBNP检测,2项检查间隔 $\leq 6$  h;④住院期间接受利尿治疗,72 h内体质量、出入量及充血体征记录完整;⑤临床资料可用于HF表型及肾功能分层。排除标准:①合并急性冠脉综合征、急性肺栓塞、感染性休克等可显著改变血流动力学的急性事件;

②严重瓣膜病需急诊手术或介入治疗;③估算肾小球滤过率(estimated glomerular filtration rate, eGFR) $< 15$  ml/(min $\cdot 1.73$  m<sup>2</sup>)或接受维持性透析;④有创机械通气、明显腹腔高压或其他严重影响IVC测量的情况;⑤首次静脉利尿剂使用超过2 h后方完成基线检查;⑥关键资料缺失。轻中度肾功能不全患者不予排除,并在后续分析中按eGFR分层和校正。以联合评估较单项指标预期提高曲线下面积(area under the curve, AUC)0.10、双侧 $\alpha = 0.05$ 、检验效能80%、阳性病例比例约40%估算,至少需88例;考虑约10%的资料不完整风险,目标样本量为98例,实际纳入100例,满足分析要求。所有患者均接受规范化抗HF治疗及容量管理。本研究经金华文荣医院伦理委员会审批[批件号:金文伦(论)批(2025-005)]。

### 1.2 容量状态的临床参照标准

本研究采用基于早期利尿反应的临床复合标准判定容量状态。超声心动图和NT-proBNP均在基线完成,随后按临床方案给予利尿及其他抗HF治疗,于治疗后72 h评价<sup>[7]</sup>:①体质量下降 $\geq 2.0$  kg或较基线下降 $\geq 2\%$ ;②48~72 h累计液体负平衡 $\geq 1\ 500$  ml;③充血表现改善,定义为呼吸困难数字评分下降 $\geq 2$ 分、下肢水肿分级下降 $\geq 1$ 级或肺部湿啰音累及范围减少 $\geq 1$ 个肺野区域中的任意1项。满足 $\geq 2$ 条判定为容量负荷偏高,满足1条判定为可能容量负荷偏高,均不满足判定为容量相对稳定。100例HF患者根据容量状态不同分为容量负荷偏高组(A组)、可能容量负荷偏高组(B组)和容量相对稳定组(C组)。

### 1.3 检测方法

超声检查采用PHILIPS EPIQ7彩色多普勒超声诊断仪和1.5~4.0 MHz相控阵探头。检查尽可能于首次静脉利尿剂使用前完成;需紧急利尿者在首剂后2 h内完成。患者取左侧卧位并连接同步心电图,在平静呼吸状态下采集图像。LVEF采用Simpson双平面法测量;LAVI于心室收缩末期采用双平面法计算并按体表面积校正;E与e'均值用于计算E/e';IVC于剑突下长轴切面距右房入口1~2 cm处测量呼气末最大内径和吸气末最小内径,IVC塌陷率=

(呼气末最大内径-吸气末最小内径)/呼气末最大内径 $\times 100\%$ 。窦性心律连续测量3个心动周期,房颤患者测量5个心动周期并取平均值。

入院基线静脉血离心后,使用Cobas e601全自动电化学发光分析仪及Elecsys proBNP II试剂(罗氏诊断产品[上海]有限公司)检测NT-proBNP,检测范围5~35 000 pg/ml(本院参考上限: $<75$ 岁125 pg/ml、 $\geq 75$ 岁450 pg/ml)。同步记录血肌酐,并采用CKD-EPI方程计算eGFR。

收集年龄、性别、体重指数(body mass index, BMI)、HF病因、高血压和糖尿病病程及控制指标[入院收缩压、糖化血红蛋白(hemoglobin A1c, HbA1c)]、房颤、纽约心脏病协会(New York Heart Association, NYHA)心功能分级、LVEF、HF类型[射血分数降低型心衰(heart failure with reduced ejection fraction, HFrEF)/射血分数轻度降低型心衰(heart failure with mildly reduced ejection fraction, HFmrEF)/射血分数保留型心衰(heart failure with preserved ejection fraction, HFpEF)]、入院前抗HF药物使用情况[袪利尿剂、血管紧张素转换酶抑制剂(angiotensin-converting-enzyme inhibitor, ACEI)/血管紧张素II受体拮抗剂(angiotensin II receptor blocker, ARB)/血管紧张素受体脑啡肽酶抑制剂(angiotensin receptor-neprilysin inhibitor, ARNI)、醛固酮受体拮抗剂(mineralocorticoid receptor antagonist, MRA)、钠-葡萄糖协同转运蛋白2(sodium-glucose cotransporter 2, SGLT2)抑制剂]等临床资料。

#### 1.4 评估与判读标准

超声充血评分由4项指标构成:LAVI $>34$  ml/ $m^2$ 、平均E/e' $>14$ 、IVC最大内径 $>21$  mm、IVC塌陷率 $<50\%$ ,每项异常计1分,总分0~4分;ROC曲线确定 $\geq 3$ 分为超声评估阳性。

NT-proBNP呈偏态分布,在回归分析中进行自然对数转换。以临床复合参照标准中的“容量负荷偏高”为阳性结局,“可能容量负荷偏高”和“容量相对稳定”为非明确阳性结局;NT-proBNP单项评估的最佳界值由Youden指数确定。

联合评估采用二元Logistic回归,以ln(NT-proBNP)和超声充血评分为自变量计算容量负荷偏高概率 $P$ 。以受试者操作特征(receiver operator

characteristic, ROC)曲线的最大Youden指数确定联合概率界值;同时将“可能容量负荷偏高”分别归入阳性或阴性进行敏感性分析,并按eGFR $<60$  ml/(min $\cdot 1.73$  m $^2$ )、LVEF $<50\%$ 进行亚组分析。

#### 1.5 统计学方法

采用SPSS 26.0和R 4.4.2软件进行统计分析。连续变量采用Shapiro-Wilk检验判断分布;符合正态分布者以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示,三组比较采用单因素方差分析,事后比较采用Bonferroni法;非正态分布者以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,采用Kruskal-Wallis  $H$ 检验及Dunn-Bonferroni两两比较。分类变量以例(%)表示,采用 $\chi^2$ 检验或Fisher确切概率法。采用Spearman分析NT-proBNP与超声参数的相关性,并校正年龄、eGFR、LVEF和NYHA分级进行偏相关分析。采用二元Logistic回归构建联合模型。ROC曲线计算AUC及95%置信区间(95% confidence interval, 95%CI),以Youden指数确定最佳界值,采用DeLong法完成AUC两两比较;以Kappa检验评价不同方法与临床复合参照标准的一致性。采用1 000次Bootstrap进行内部验证,并开展肾功能、LVEF亚组及排除eGFR $<30$  ml/(min $\cdot 1.73$  m $^2$ )患者的敏感性分析。所有检验均为双侧, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 基线资料与一般临床特征

三组患者年龄、性别、BMI、HF病因等基线资料比较差异均无统计学意义(均 $P>0.05$ )。A组NYHA III~IV级比例较高,LVEF较低,组间差异均有统计学意义(均 $P<0.05$ )。100例中eGFR $<60$  ml/(min $\cdot 1.73$  m $^2$ )37例,其中eGFR $<30$  ml/(min $\cdot 1.73$  m $^2$ )6例(表1)。

### 2.2 不同容量状态患者NT-proBNP水平比较

三组NT-proBNP水平呈随容量负荷增加而升高的梯度,整体差异有统计学意义( $H=18.742, P<0.001$ )。Dunn-Bonferroni两两比较显示,A组高于B组和C组,B组亦高于C组(校正后均 $P<0.05$ )(表2)。

### 2.3 不同容量状态患者超声心动图参数比较

三组LAVI、E/e'、IVC内径、IVC塌陷率和超声充血评分比较差异均有统计学意义(均 $P<0.001$ )。随着容量负荷程度增加,LAVI、E/e'、IVC内径及超声

表 1 三组 HF 患者基线资料比较

| 指标                                                    | A 组 (n=42)   | B 组 (n=28)   | C (n=30)     | $F/\chi^2$ | P     |
|-------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------|-------|
| 年龄 ( $\bar{x}\pm s$ , 岁)                              | 68.45±11.32  | 66.71±12.08  | 65.83±10.94  | 0.412      | 0.663 |
| 男性 [例 (%)]                                            | 26 (61.90)   | 17 (60.71)   | 18 (60.00)   | 0.028      | 0.986 |
| BMI ( $\bar{x}\pm s$ , kg/m <sup>2</sup> )            | 24.78±3.41   | 24.36±3.27   | 24.11±3.19   | 0.428      | 0.653 |
| 缺血性 HF [例 (%)]                                        | 21 (50.00)   | 13 (46.43)   | 14 (46.67)   | 0.116      | 0.943 |
| 高血压 [例 (%)]                                           | 30 (71.43)   | 19 (67.86)   | 20 (66.67)   | 0.209      | 0.901 |
| 高血压病程 ( $\bar{x}\pm s$ , 年)*                          | 10.80±6.42   | 10.21±6.10   | 9.74±5.86    | 0.246      | 0.783 |
| 入院收缩压 ( $\bar{x}\pm s$ , mmHg)                        | 132.56±18.41 | 130.87±17.62 | 129.28±16.95 | 0.326      | 0.723 |
| 糖尿病 [例 (%)]                                           | 18 (42.86)   | 11 (39.29)   | 11 (36.67)   | 0.288      | 0.866 |
| 糖尿病病程 ( $\bar{x}\pm s$ , 年)*                          | 8.64±5.36    | 8.18±5.04    | 7.92±4.81    | 0.094      | 0.910 |
| HbA1c ( $\bar{x}\pm s$ , %)*                          | 7.62±1.12    | 7.48±1.08    | 7.39±1.05    | 0.136      | 0.873 |
| 房颤 [例 (%)]                                            | 15 (35.71)   | 8 (28.57)    | 7 (23.33)    | 1.315      | 0.518 |
| NYHA III ~ IV 级 [例 (%)]                               | 27 (64.29)   | 13 (46.43)   | 10 (33.33)   | 6.905      | 0.032 |
| LVEF ( $\bar{x}\pm s$ , %)                            | 41.26±9.87   | 44.53±10.21  | 47.68±9.95   | 4.982      | 0.009 |
| HF 类型 (HFrEF/HFmrEF/HFpEF) [例]                        | 18/13/11     | 10/9/9       | 6/8/16       | 6.631      | 0.157 |
| eGFR ( $\bar{x}\pm s$ , ml/(min·1.73m <sup>2</sup> )) | 61.78±18.66  | 68.24±19.12  | 72.15±18.47  | 2.822      | 0.064 |
| 血肌酐 ( $\bar{x}\pm s$ , μmol/L)                        | 106.42±34.58 | 99.36±30.27  | 94.21±28.64  | 1.344      | 0.266 |
| 袢利尿剂 [例 (%)]                                          | 25 (59.52)   | 15 (53.57)   | 14 (46.67)   | 1.167      | 0.558 |
| ACEI/ARB/ARNI [例 (%)]                                 | 22 (52.38)   | 16 (57.14)   | 17 (56.67)   | 0.202      | 0.904 |
| β受体阻滞剂 [例 (%)]                                        | 29 (69.05)   | 20 (71.43)   | 22 (73.33)   | 0.160      | 0.923 |
| MRA [例 (%)]                                           | 24 (57.14)   | 16 (57.14)   | 16 (53.33)   | 0.124      | 0.940 |
| SGLT2 抑制剂 [例 (%)]                                     | 18 (42.86)   | 13 (46.43)   | 15 (50.00)   | 0.362      | 0.834 |

注: HF: 心力衰竭; BMI: 体重指数; HbA1c: 糖化血红蛋白; NYHA: 纽约心脏病协会; LVEF: 左室射血分数; HFrEF: 射血分数降低型心衰; HFmrEF: 射血分数轻度降低型心衰; HFpEF: 射血分数保留型心衰; eGFR: 估算肾小球滤过率; ACEI: 血管紧张素转换酶抑制剂; ARB: 血管紧张素 II 受体拮抗剂; ARNI: 血管紧张素受体脑啡肽酶抑制剂; MRA: 醛固酮受体拮抗剂; SGLT2: 钠-葡萄糖协同转运蛋白 2。

表 2 不同容量状态患者 NT-proBNP 水平比较 [ $M(P_{25}, P_{75})$ ]

| 组别         | NT-proBNP ( $\bar{x}\pm s$ , pg/ml) | H      | P      |
|------------|-------------------------------------|--------|--------|
| A 组 (n=42) | 3 568.00 (2 486.00, 5 124.00)       |        |        |
| B 组 (n=28) | 2 146.00 (1 468.00, 3 285.00)       | 18.742 | <0.001 |
| C 组 (n=30) | 1 189.00 (756.00, 1 824.00)         |        |        |

注: NT-proBNP: N 末端脑钠肽前体。

充血评分升高, IVC 塌陷率降低。经 Bonferroni 校正, 三组间各指标两两比较差异均有统计学意义 (均  $P<0.05$ ) (表 3)。

表 3 不同容量状态患者超声心动图参数比较 ( $\bar{x}\pm s$ )

| 组别         | LAVI (ml/m <sup>2</sup> ) | E/e'       | IVC 内径 (mm) | IVC 塌陷率 (%) | 超声充血评分 (分) |
|------------|---------------------------|------------|-------------|-------------|------------|
| A 组 (n=42) | 46.38±9.42                | 16.82±4.37 | 21.46±3.28  | 31.24±8.56  | 3.14±0.75  |
| B 组 (n=28) | 39.27±8.61                | 14.21±3.96 | 19.02±3.11  | 41.87±9.12  | 2.43±0.79  |
| C 组 (n=30) | 33.84±7.95                | 11.98±3.41 | 16.73±2.89  | 53.69±10.28 | 1.47±0.86  |
| F          | 14.287                    | 12.906     | 18.354      | 29.671      | 41.228     |
| P          | <0.001                    | <0.001     | <0.001      | <0.001      | <0.001     |

注: LAVI: 左房容积指数; E/e': 二尖瓣口舒张早期峰值速度/二尖瓣环间隔侧、侧壁侧舒张早期运动速度; IVC: 下腔静脉。

## 2.4 超声心动图参数与 NT-proBNP 的相关性分析

Spearman 分析显示, NT-proBNP 与 LAVI、E/e' 和 IVC 内径呈正相关, 与 IVC 塌陷率呈负相关, 其中与

IVC 内径的相关程度最高 ( $r=0.517$ ); 与 LVEF 的相关性无统计学意义。校正年龄、eGFR、LVEF 和 NYHA 分级后, NT-proBNP 与 4 项超声容量参数的相关方向未改变, 相关性仍有统计学意义 ( $P<0.05$ ) (表 4)。

表 4 超声心动图参数与 NT-proBNP 的相关性分析

| 参数                        | Spearman $r$ | P      | 校正 $r$ | P      |
|---------------------------|--------------|--------|--------|--------|
| LAVI (ml/m <sup>2</sup> ) | 0.462        | <0.001 | 0.391  | <0.001 |
| E/e'                      | 0.438        | <0.001 | 0.356  | <0.001 |
| IVC 内径 (mm)               | 0.517        | <0.001 | 0.442  | <0.001 |
| IVC 塌陷率 (%)               | -0.489       | <0.001 | -0.418 | <0.001 |
| LVEF (%)                  | -0.121       | 0.228  | -0.084 | 0.409  |

注: NT-proBNP: N 末端脑钠肽前体; LAVI: 左房容积指数; E/e': 二尖瓣口舒张早期峰值速度/二尖瓣环间隔侧、侧壁侧舒张早期运动速度; IVC: 下腔静脉; LVEF: 左室射血分数。

## 2.5 联合评估模型构建

以明确容量负荷偏高为因变量进行 Logistic 回归,  $\ln(\text{NT-proBNP})$  和超声充血评分均与容量负荷偏高独立相关。简化模型:  $\text{Logit}(P) = -12.056 + 1.126 \times \ln(\text{NT-proBNP}) + 0.984 \times \text{超声充血评分}$ ,  $P = 1/[1 + e^{-\text{Logit}(P)}]$ 。在进一步纳入年龄、eGFR、LVEF 和 NYHA III ~ IV 级后,  $\ln(\text{NT-proBNP})$  (校正  $OR = 2.746$ , 95%CI: 1.327 ~ 5.682,  $P = 0.006$ ) 和超声充血

评分(校正  $OR=2.438$ ,  $95\%CI$ :  $1.365 \sim 4.354$ ,  $P=0.003$ )仍有统计学意义(表5)。

表5 超声充血评分联合 NT-proBNP 评估容量负荷偏高的

| Logistic 回归模型  |         |       |               |                          |       |
|----------------|---------|-------|---------------|--------------------------|-------|
| 变量             | $\beta$ | SE    | Wald $\chi^2$ | OR (95%CI)               | P     |
| 常量             | -12.056 | 3.516 | 11.759        | —                        | 0.001 |
| ln (NT-proBNP) | 1.126   | 0.384 | 8.600         | 3.083<br>(1.452 ~ 6.547) | 0.003 |
| 超声充血评分         | 0.984   | 0.292 | 11.355        | 2.675<br>(1.508 ~ 4.745) | 0.001 |

注: NT-proBNP: N末端脑钠肽前体。

## 2.6 不同评估方式的一致性 & 区分能力

超声充血评分、NT-proBNP 及联合评估与临床复合参照标准的一致性 Kappa 值分别为 0.477、0.429 和 0.616。联合评估概率界值为 0.430 时, 敏感度为

85.71%, 特异度为 79.31%, 阳性预测值为 74.47%, 阴性预测值为 88.46%。联合评估 AUC 为 0.856, 高于超声充血评分的 0.783 和 NT-proBNP 的 0.745; DeLong 检验显示, 联合评估与两种单项评估的差异均有统计学意义( $P=0.032, 0.006$ ), 而两种单项评估之间差异无统计学意义( $P=0.468$ )。见表 6、图 1。Bootstrap 1 000 次内部验证的校正 AUC 为 0.843 ( $95\%CI$ :  $0.771 \sim 0.914$ )。在  $eGFR < 60$  和  $\geq 60$  ml/(min $\cdot$ 1.73m $^2$ ) 亚组中, 联合评估 AUC 分别为 0.842 和 0.861; 在  $LVEF < 50\%$  和  $\geq 50\%$  亚组中分别为 0.850 和 0.864。排除 6 例  $eGFR < 30$  ml/(min $\cdot$ 1.73 m $^2$ ) 患者后, 联合评估 AUC 为 0.858。将 B 组归入阳性进行敏感性分析时, 联合评估 AUC 为 0.821, 主要结论未发生方向性改变。

表6 不同评估方式识别容量负荷偏高的效能

| 评估方式      | 最佳界值               | AUC   | 95%CI         | 敏感度 (%) | 特异度 (%) | Kappa |
|-----------|--------------------|-------|---------------|---------|---------|-------|
| 超声充血评分    | $\geq 3$ 分         | 0.783 | 0.693 ~ 0.873 | 76.19   | 72.41   | 0.477 |
| NT-proBNP | $\geq 2$ 540 pg/ml | 0.745 | 0.650 ~ 0.840 | 69.05   | 74.14   | 0.429 |
| 联合评估      | $P \geq 0.430$     | 0.856 | 0.784 ~ 0.928 | 85.71   | 79.31   | 0.616 |

注: AUC: 曲线下面积; NT-proBNP: N末端脑钠肽前体; ROC: 受试者操作特征。ROC 分析以明确容量负荷偏高为阳性结局; 界值均由最大 Youden 指数确定。

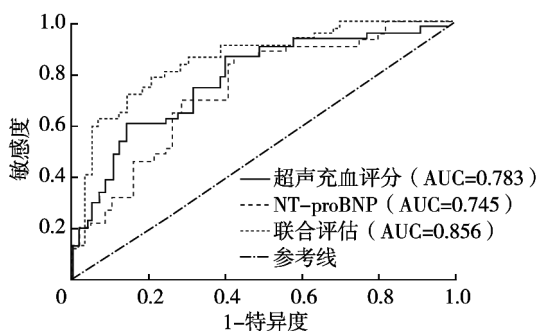


图1 不同评估方式识别容量负荷偏高的 ROC 曲线

注: NT-proBNP: N末端脑钠肽前体; AUC: 曲线下面积; ROC: 受试者操作特征。

## 3 讨论

容量状态评估贯穿 HF 入院处置、利尿剂调整及出院前残余充血判断全程<sup>[8-9]</sup>。本研究以早期利尿反应构建临床复合参照标准, 结果显示 NT-proBNP 和多项超声容量参数随容量负荷程度增加呈梯度变化。联合评估识别容量负荷偏高的 AUC 为 0.856, 与临床复合参照标准的一致性优于单项评估方法, 且经肾功能、LVEF 和 NYHA 分级校正后, 主要结果仍保持稳定。

LAVI 反映长期左心充盈压负荷, E/e' 主要用于

估算左心室充盈压, IVC 内径和塌陷率则更接近全身静脉系统压力和右心前负荷。本研究中 NT-proBNP 与 IVC 内径的相关系数最高, 与 IVC 塌陷率呈中等负相关, 提示静脉淤血指标与容量潴留存在较直接的关联。LVEF 与 NT-proBNP 无明显线性相关, 原因可能为 LVEF 主要反映收缩功能, 而容量淤滞可发生于 HFrEF、HFmrEF 及 HFpEF 各类患者, 因此不能仅凭 LVEF 判断当前容量状态。

NT-proBNP 对心肌壁张力虽较敏感, 但肾功能下降可延长其清除时间, 房颤和高龄也可能导致其水平升高<sup>[10]</sup>。本研究原始基线中容量负荷偏高组 NYHA 分级更高、LVEF 更低, 若仅行单因素比较, 可能夸大 NT-proBNP 或超声参数与容量状态的关联。本研究在相关和回归分析中同步校正 eGFR、LVEF 及 NYHA 分级, 且肾功能和 LVEF 亚组的 AUC 接近; 排除重度肾功能不全患者后结果亦稳定, 提示联合评估的增益并非完全由上述混杂因素所致。不过, 不同 HF 表型的病理生理差异仍需更大样本量进一步验证。

单项超声或 NT-proBNP 评估均存在灰区。将 4 项超声参数转化为简明评分后再与 ln (NT-

proBNP)联合,可同时整合心腔充盈压、静脉淤血和心肌壁张力三类信息。本研究联合模型的 AUC 和 Kappa 均高于单项评估,且 DeLong 检验证实其存在统计学增益。临床应用时,可在患者入院 24 h 内同步完成 NT-proBNP 检测与床旁超声评估:联合概率较高者结合血压、肾功能和尿量强化去充血治疗并动态复查;处于临界范围者综合体质量、液体平衡及体征复评;概率较低者应避免仅因 NT-proBNP 升高而盲目增加利尿剂。该流程仅用于辅助而非替代临床判断。

本研究作为单中心回顾性研究,存在选择偏倚、样本量有限,且利尿反应复合参照标准并非公认金标准,体质量与出入量记录存在测量误差,同时部分重症患者被剔除限制了结论的外推性。本模型仅完成 Bootstrap 内部验证,尚需多中心前瞻性队列开展外部验证,评估其指导利尿治疗、改善临床结局的实际价值。

综上, LVI、E/e'、IVC 内径和塌陷率与 NT-proBNP 可从不同层面反映 HF 患者充血状态。超声充血评分联合 NT-proBNP 可提升容量负荷偏高的识别效能,可作为入院早期容量评估的无创辅助方法,但其界值和模型仍需前瞻性外部验证。

#### 参考文献

[1] 何英, 廖深根, 王骁智, 等. 射血分数减低型心力衰竭患者

容量负荷评估及应用[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2023, 43 (12): 1663-1667.

[2] 马丽, 刘元生, 余剑波, 等. 急性心力衰竭 NT-proBNP 水平及下腔静脉塌陷指数对患者容量负荷及预后的预测价值[J]. 医学研究生学报, 2020, 33 (3): 289-295.

[3] KOBAYASHI M, HUTTIN O, DONAL E, *et al.* Association of estimated plasma volume status with hemodynamic and echocardiographic parameters[J]. Clin Res Cardiol, 2020, 109(8): 1060-1069.

[4] 陈俏. 超声心动图在心衰患者中早期诊断的价值[J]. 中国医疗器械信息, 2025, 31 (14): 127-129.

[5] 罗晓颖, 朱雪梅, 许燕, 等. 脑钠肽前体水平对无心力衰竭史的肺炎高龄住院患者预后的判断价值研究[J]. 诊断学理论与实践, 2019, 18 (3): 319-322.

[6] 中华医学会心血管病学分会, 中国医师协会心血管内科医师分会, 中国医师协会心力衰竭专业委员会, 等. 中国心力衰竭诊断和治疗指南 2024[J]. 中华心血管病杂志, 2024, 52 (3): 235-275.

[7] 冯斯婷, 范婧尧, 王溪, 等. 射血分数降低型急性心力衰竭患者院内肾功能恶化与容量状态的关系及其对预后的影响[J]. 中国医药, 2022, 17 (5): 641-645.

[8] 张晓丽, 张海柱, 可海霞, 等. H-FABP、NT-proBNP 与急性心力衰竭患者容量负荷状态及预后的相关性[J]. 河南医学研究, 2024, 33 (10): 1834-1837.

[9] 许超. 估测的血浆容量状态对心力衰竭患者全因死亡率的预测价值[D]. 张家口: 河北北方学院, 2024.

[10] 叶智勇, 余贤兴, 蒋辉. D-二聚体联合 Tei 指数评估急性失代偿心力衰竭患者容量负荷的价值[J]. 军事医学, 2025, 49 (4): 289-295.