

膈肌超声参数联合浅快呼吸指数预测神经重症机械通气患者撤机结局的临床价值

廖利萍^{1,2}, 高英¹, 徐磊¹, 艾山木³, 王科¹, 陈鹏¹, 邓永兵¹, 吴晓苏¹, 黄翠¹

摘要 **目的** 探讨膈肌超声参数联合浅快呼吸指数(RSBI)预测神经重症机械通气患者撤机结局的临床价值。**方法** 选取我院机械通气超过 48 h 且符合撤机标准拟行撤机的神经重症患者 145 例,根据撤机后 48 h 患者呼吸状况分为撤机成功组 89 例和撤机失败组 56 例,比较两组自主呼吸试验前呼吸力学参数、RSBI,以及膈肌超声参数[膈肌移动度(DE)和膈肌增厚率(DTF)]的差异。采用单因素及多因素 Logistic 回归分析筛选预测神经重症机械通气患者撤机结局的影响因素;绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析各参数单独及联合应用预测神经重症机械通气患者撤机结局的诊断效能。**结果** 撤机失败组 RSBI 高于撤机成功组,DE、DTF 均低于撤机成功组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.001$)。单因素及多因素 Logistic 回归分析显示,RSBI、DE、DTF 均为预测神经重症机械通气患者撤机结局的独立影响因素(均 $P < 0.05$)。ROC 曲线分析显示,RSBI、DE、DTF 预测神经重症机械通气患者撤机结局的曲线下面积(AUC)分别为 0.791、0.777、0.805,灵敏度分别为 89.29%、80.36%、76.79%,特异度分别为 65.17%、65.17%、88.76%;RSBI 联合 DE、RSBI 联合 DTF、DE 联合 DTF 及三者联合应用预测神经重症机械通气患者撤机结局的 AUC 分别为 0.873、0.878、0.868、0.917,以三者联合应用的 AUC 最高,与其余方法比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。**结论** 膈肌超声参数联合 RSBI 在预测神经重症机械通气患者撤机结局中具有较高的临床价值。

关键词 超声检查;膈肌;浅快呼吸指数;神经重症;机械通气;撤机结局

[中图分类号]R445.1

[文献标识码]A

Clinical value of diaphragmatic ultrasound parameters combined with rapid shallow breathing index in predicting weaning outcomes from mechanical ventilation in neurocritical patients

LIAO Liping^{1,2}, GAO Ying¹, XU Lei¹, AI Shanmu³, WANG Ke¹, CHEN Peng¹, DENG Yongbing¹, WU Xiaosu¹, HUANG Cui¹

1.Department of Neurosurgery, 3.Department of Emergency Medicine, Chongqing Emergency Medical Center, Chongqing 400014, China. 2.School of Nursing, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610000, China

ABSTRACT **Objective** To investigate the clinical value of diaphragmatic ultrasound parameters combined with rapid shallow breathing index (RSBI) in predicting weaning outcomes from mechanical ventilation in neurocritical patients. **Methods** A total of 145 neurocritical patients who received mechanical ventilation for over 48 h and met weaning criteria were enrolled. According to the respiratory status within 48 h post-weaning, patients were divided into successful weaning group (89 cases) and failed weaning group (56 cases). The differences in respiratory mechanics parameters before spontaneous breathing trial, RSBI, and diaphragmatic ultrasound parameters [diaphragmatic excursion (DE) and diaphragmatic thickening fraction (DTF)] were compared between the two groups. Univariate and multivariate Logistic regression analysis were performed to screen the influencing factors for predicting weaning outcomes from mechanical ventilation in neurocritical patients. Receiver operating characteristic (ROC) curve was drawn to analyze the diagnostic efficacy of individual and combined parameters in predicting the weaning outcomes from mechanical ventilation in neurocritical patients. **Results** The failed weaning group

基金项目:重庆市科卫联合医学科研项目(2024MSXM145)

作者单位:1.重庆市急救医疗中心神经外科,3.急诊医学科,重庆 400014;2.成都中医药大学护理学院,四川 成都 610000

通讯作者:吴晓苏,Email:SUSU030118@163.com;黄翠,Email:huanguins@163.com

exhibited higher RSBI and lower DE and DTF than those of the successful group (all $P<0.001$). Univariate and multivariate Logistic regression analysis revealed that RSBI, DE and DTF were all independent influencing factors for predicting weaning outcomes from mechanical ventilation in neurocritical patients (all $P<0.05$). ROC curve analysis showed that the area under the curve of RSBI, DE and DTF in predicting the weaning outcomes from mechanical ventilation in neurocritical patients were 0.791, 0.777 and 0.805, with sensitivities of 89.29%, 80.36% and 76.79%, and specificities of 65.17%, 65.17% and 88.76%, respectively. The combination of RSBI with DE, RSBI with DTF, DE with DTF, and all three parameters yielded AUCs of 0.873, 0.878, 0.868 and 0.917, respectively, with the highest AUC achieved by the three-parameter combination, the differences were statistically significant compared with other methods (all $P<0.05$). **Conclusion** Diaphragmatic ultrasound parameters combined with RSBI demonstrates high clinical value in predicting weaning outcomes from mechanical ventilation in neurocritical patients.

KEY WORDS Ultrasonography; diaphragmatic; Rapid shallow breathing index; Neurocritical care; Mechanical ventilation; Weaning outcomes

神经重症患者由于气道保护功能受损, 往往需要依赖机械通气来维持生命体征。然而, 长时间的机械通气不仅会导致患者在重症加强护理病房(intensive care unit, ICU)停留时间延长, 还可能造成患者呼吸机依赖, 导致撤机困难, 增加死亡风险^[1]。因此, 探索准确有效的撤机评估方法, 确定撤机的最佳时机, 对缩短患者机械通气治疗时间和改善撤机失败后的不良预后具有重要的意义。传统的浅快呼吸指数(RSBI)即呼吸频率与潮气量的比值, 主要反映呼吸肌力量与呼吸负荷间的关系。但神经重症患者撤机过程受多种因素影响, 如呼吸中枢兴奋性、自主咳嗽能力、基础疾病病情变化等, 这些因素可能独立于呼吸肌力量与呼吸负荷间的关系之外, 并影响撤机结局, 致使 RSBI 的预测能力有限^[2-3]。近年来, 床旁超声通过测量膈肌移动度(DE)和膈肌增厚率(DTF)等参数在预测撤机结局方面显示出较好的应用潜力^[4-6]。基于此, 本研究探讨了膈肌超声参数与 RSBI 联合应用在预测神经重症机械通气患者撤机结局中的临床价值, 旨在降低撤机失败的发生风险。

资料与方法

一、研究对象

选取 2020 年 1 月至 2024 年 6 月我院神经外科收治的神经重症患者 145 例, 其中男 101 例, 女 44 例, 年龄 26~92 岁, 平均(59.74±13.57)岁。纳入标准: ①接受有创机械通气治疗时间≥48 h(不包括手术时长), 经临床评估达到撤机标准后拟行撤机; ②机械通气的原发病或诱因已基本得到控制或改善。排除标准: ①年龄<18 岁; ②非计划性撤机; ③患有神经肌肉疾病如格林巴利综合征、肌萎缩侧索硬化症等; ④存在呼吸中枢损伤、单侧或双侧膈肌麻痹; ⑤超声图像欠清晰。本研究经我院医学伦理委员会批准(批准号: 2024 年伦审

第 68 号), 为回顾性研究故免除患者及家属知情同意。

二、仪器与方法

1. 超声检查: 使用华声 Clivia 90 彩色多普勒超声诊断仪, C6-1B-H 凸阵探头, 频率 1~5 MHz; L15-4NB-H 线阵探头, 频率 3~12 MHz。所有患者均于撤机前进行超声检查, 取半卧位, 将凸阵探头横向置于右锁骨中线与右肋缘交界处下方, 此时膈肌表现为覆盖在肝脏上方的高回声线。于 B 型超声模式下找到膈肌位移幅度最大处(调整探头深度以确保能够捕捉其最大位移), 将 M 型超声的取样线垂直置于该处, 患者吸气过程中膈肌会向探头方向下移, 呼气过程中膈肌则向上远离探头, 形成类似正弦波的位移曲线, 测量该曲线最高点和最低点间的距离即为 DE^[7]。然后切换为线阵探头, 将其垂直置于患者胸壁, 具体体表位置为膈肌的对合区域(常位于右腋前线或腋中线的第八至十肋间)。于 B 型超声模式下可见膈肌表现为依次由高、低、高回声组成的 3 层结构, 其中 2 条高回声线分别代表胸膜和腹膜, 两线间的低回声区域即为膈肌。观察膈肌在呼吸过程中的厚度变化, 然后切换至 M 型超声模式, 将取样线垂直置于膈肌, 获得膈肌厚度变化曲线图, 测量吸气末、呼气末膈肌厚度, 计算 DTF, 公式为: $DTF = (\text{吸气末膈肌厚度} - \text{呼气末膈肌厚度}) / \text{呼气末膈肌厚度} \times 100\%$ ^[5]。上述参数于患者平静且规律的呼吸状态下连续测量 3 次, 取平均值。以上操作均由 4 名具有中国重症护理超声结业资格的医师完成, 为确保测量结果的准确性和一致性, 本研究采用双人复核制度, 即每个参数均由其中 2 名操作者独立测量, 取二者平均值作为最终结果。

2. RSBI 测量: 自主呼吸试验完成后 30 min 内, 在呼吸机的监测界面上记录患者的呼吸频率和潮气量, 连续记录 5 次数据取平均值计算 RSBI, 公式为: $RSBI = \text{呼吸频率} / \text{潮气量}$ ^[3]。

3.呼吸力学监测和临床撤机标准:收集患者自主呼吸试验前呼吸力学参数指标,包括呼吸频率、血氧饱和度、二氧化碳分压、氧合指数、乳酸、pH等。所有患者撤机前均需达到以下所有标准^[8]:①导致机械通气的病因好转或被消除;②吸入气体氧浓度 ≤ 0.40 ,氧合指数 $\geq 150 \sim 300$ mmHg(1 mmHg=0.133 kPa),呼气末正压 $\leq 5 \sim 8$ cmH₂O(1 cmH₂O=0.098 kPa), pH ≥ 7.25 ;③血流动力学稳定,无心肌缺血表现(如心率异常、血压波动等),无明显低血压[无需或仅需少量血管活性药物(多巴胺或多巴酚丁胺 $<5 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)];④有自主呼吸能力。

4.撤机结局判定标准^[9]及分组:所有患者在撤机前均完成自主呼吸试验评估。若撤机后48 h内患者未重新使用无创或有创机械通气治疗,判为撤机成功;若48 h内患者需要重新进行机械通气治疗,或患者在该时间段内死亡,判为撤机失败。本研究据此将145例患者分为撤机成功组89例和撤机失败组56例。

5.临床资料收集:查阅医院病历系统收集患者年龄、性别、格拉斯哥昏迷量表(GCS)评分、体质量指数、临床诊断、急性生理学及慢性健康状况评分系统(APACHE II)评分、机械通气原因、机械通气时间、ICU住院时间及结局(是否死亡)、总住院时间,以及有无吸烟史、手术史、基础病史等。

三、统计学处理

应用R语言(4.2.3版本)进行数据分析。计量资

料的正态性检验采用Shapiro-Wilk检验,符合正态分布者以 $\bar{x}\pm s$ 表示,采用独立样本 t 检验;不符合正态分布者以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,采用Mann-Whitney U 检验。计数资料以频数或率表示,采用 χ^2 检验或Fisher确切概率法。采用单因素及多因素Logistic回归分析筛选预测神经重症机械通气患者撤机结局的影响因素;绘制受试者工作特征(ROC)曲线分析各参数单独及联合应用预测神经重症机械通气患者撤机结局的诊断效能,曲线下面积(AUC)比较采用DeLong检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、两组临床资料比较

两组年龄、GCS评分、APACHE II评分、手术史、ICU死亡、ICU住院时间、总住院时间比较差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);两组性别、体质量指数、临床诊断、吸烟史、基础病史、机械通气原因及机械通气时间比较差异均无统计学意义。见表1。

二、两组呼吸力学参数比较

两组呼吸频率、血氧饱和度、二氧化碳分压、氧合指数、乳酸及pH比较差异均无统计学意义。见表2。

三、两组RSBI、膈肌超声参数比较

撤机失败组RSBI高于撤机成功组,DE、DTF均低于撤机成功组,差异均有统计学意义(均 $P<0.001$)。见图1,2和表3。

表1 两组一般资料比较

组别	年龄(岁)	性别(例)		GCS评分 (分)	体质量指数 (kg/m ²)	临床诊断(例)				
		男	女			颅脑损伤	脑出血	脑梗死	蛛网膜下腔出血	其他
撤机成功组(89)	57.19±12.55	61	28	8.37±2.16	25.65±3.14	29	27	5	24	4
撤机失败组(56)	63.80±14.23	40	16	5.09±1.35	25.02±3.13	23	18	6	5	4
<i>Z/t/χ²</i> 值	-2.932	0.136		1.218	1.176	-				
<i>P</i> 值	0.004	0.713		0.036	0.242	0.075				

组别	APACHE II 评分 (分)	吸烟史(例)		手术史(例)		基础疾病史(例)		ICU死亡(例)	
		无	有	无	有	无	有	否	是
撤机成功组(89)	24.42±4.43	67	22	13	76	47	42	77	12
撤机失败组(56)	29.59±5.72	40	16	20	36	24	32	34	22
<i>Z/t/χ²</i> 值	-5.768	0.264		8.711		1.362		12.749	
<i>P</i> 值	<0.001	0.608		0.003		0.243		<0.001	

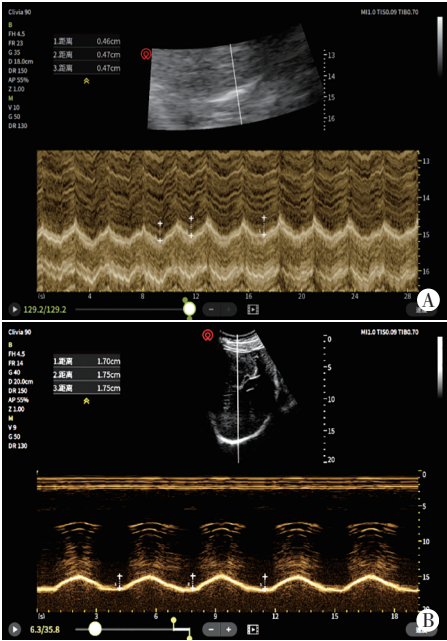
组别	机械通气原因(例)					机械通气时间 (d)	ICU住院时间 (d)	总住院时间 (d)
	术后使用	呼吸衰竭	肺部感染	自主呼吸弱	氧饱和度低			
撤机成功组(89)	51	27	5	5	1	6.00(4.00,9.00)	8.50(5.00,16.00)	15.00(6.00,25.25)
撤机失败组(56)	21	28	1	5	1	5.50(4.00,15.25)	13.00(8.00,20.00)	25.00(13.00,40.00)
<i>Z/t/χ²</i> 值	-					0.516	-2.914	-2.844
<i>P</i> 值	0.061					0.606	0.004	0.004

-示采用Fisher确切概率法。GCS:格拉斯哥昏迷量表;APACHE II:急性生理学及慢性健康状况评分系统;ICU:重症加强护理病房

表 2 两组呼吸力学参数比较

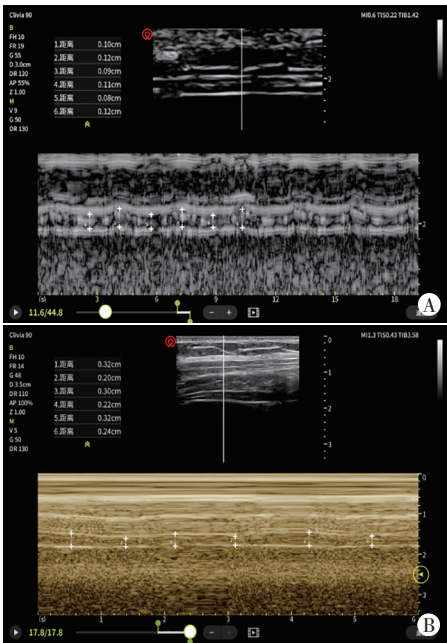
组别	呼吸频率(次/min)	血氧饱和度(%)	二氧化碳分压(mmHg)	氧合指数(mmHg)	乳酸(mmol/L)	pH
撤机成功组(89)	23.00(19.00,31.00)	99.00(97.00,99.00)	33.00(30.00,37.00)	287.67±95.72	2.24(1.40,3.35)	7.43(7.40,7.47)
撤机失败组(56)	26.50(19.00,33.25)	99.00(96.75,99.25)	33.00(29.00,39.00)	297.50±99.40	2.24(1.40,3.42)	7.42(7.32,7.48)
Z/t 值	1.001	0.041	0.528	-0.448	0.175	-1.006
P 值	0.317	0.967	0.597	0.655	0.861	0.314

1 mmHg=0.133 kPa



A: 撤机失败组患者(男,49岁)DE为4.67 mm;B: 撤机成功组患者(男,23岁)DE为17.33 mm

图 1 两组 DE 测量超声图



A: 撤机失败组患者(男,49岁)吸气末膈肌厚度为0.117 mm,呼气末膈肌厚度为0.090 mm,DTF为30.00%;B: 撤机成功组患者(男,23岁)吸气末膈肌厚度为0.313 mm,呼气末膈肌厚度为0.220 mm,DTF为42.27%

图 2 两组 DTF 测量超声图

表 3 两组 RSBI、膈肌超声参数比较 $[M(Q_1, Q_3)]$

组别	RSBI(次·min ⁻¹ ·L ⁻¹)	DE(mm)	DTF(%)
撤机成功组(89)	63(56,85)	17.85(14.43,20.22)	39.69(33.13,47.63)
撤机失败组(56)	89(79,97)	13.40(11.50,15.97)	25.84(22.73,29.69)
Z 值	5.899	-5.602	-6.179
P 值	<0.001	<0.001	<0.001

RSBI: 浅快呼吸指数;DE: 膈肌移动度;DTF: 膈肌增厚率

四、单因素及多因素 Logistic 回归分析结果

将上述单因素分析中差异有统计学意义的变量纳入单因素及多因素 Logistic 回归分析,结果显示 GCS 评分、RSBI、DE、DTF 均为预测神经重症机械通气患者撤机结局的独立影响因素(均 $P<0.05$)。见表 4、5。

表 4 单因素 Logistic 回归分析结果

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	OR 值及其 95% 可信区间	P 值
年龄	0.038	0.014	7.783	1.039(1.011~1.067)	0.005
GCS 评分	-0.425	0.105	16.377	0.654(0.532~0.803)	<0.001
APACHE II 评分	0.199	0.040	24.232	1.220(1.127~1.321)	<0.001
ICU 死亡	1.424	0.414	11.838	4.152(1.845~9.342)	0.001
手术史	-1.178	0.410	8.267	0.308(0.138~0.687)	0.004
ICU 住院时间	-0.051	0.021	5.935	0.950(0.911~0.990)	0.015
总住院时间	0.000	0.005	0.005	1.000(0.990~1.009)	0.944
RSBI	0.070	0.013	30.624	1.073(1.047~1.100)	<0.001
DE	-0.291	0.056	26.674	0.747(0.669~0.835)	<0.001
DTF	-0.127	0.023	30.919	0.881(0.843~0.921)	<0.001

表 5 多因素 Logistic 回归分析结果

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	OR 值及其 95% 可信区间	P 值
年龄	0.026	0.024	1.214	1.027(0.980~1.076)	0.270
GCS 评分	-0.357	0.176	4.116	0.700(0.496~0.988)	0.042
APACHE II 评分	0.058	0.097	0.363	1.060(0.877~1.282)	0.547
ICU 死亡	0.519	0.976	0.283	1.681(0.248~11.395)	0.595
手术史	-1.083	0.745	2.116	0.338(0.079~1.457)	0.146
ICU 住院时间	-0.007	0.029	0.066	0.993(0.939~1.050)	0.797
RSBI	0.048	0.018	7.116	1.050(1.013~1.087)	0.008
DE	-0.332	0.092	13.099	0.718(0.600~0.859)	<0.001
DTF	-0.095	0.030	9.969	0.910(0.858~0.965)	0.002

五、ROC 曲线分析结果

ROC 曲线分析显示,RSBI、DE、DTF 预测神经重症机械通气患者撤机结局的 AUC 分别为 0.791、0.777、0.805,灵敏度分别为 89.29%、80.36%、76.79%,特异度

分别为65.17%、65.17%、88.76%；RSBI联合DE、RSBI联合DTF、DE联合DTF及三者联合应用预测神经重症机械通气患者撤机结局的AUC分别为0.873、0.878、0.868、0.917，其中三者联合应用的AUC最高，与其余方法比较差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。见表6和图3。

表6 RSBI、膈肌超声参数单独及联合应用预测神经重症机械通气患者撤机结局的诊断效能

方法	截断值	灵敏度 (%)	特异度 (%)	AUC及其95%可信区间	P 值
RSBI	74次·min ⁻¹ ·L ⁻¹	89.29	65.17	0.791(0.719~0.864)	<0.001
DE	16.34 mm	80.36	65.17	0.777(0.703~0.851)	<0.001
DTF	30.06%	76.79	88.76	0.805(0.730~0.881)	<0.001
RSBI联合DE	-	78.57	84.27	0.873(0.818~0.928)	<0.001
RSBI联合DTF	-	75.00	87.64	0.878(0.817~0.939)	<0.001
DE联合DTF	-	87.50	76.40	0.868(0.808~0.929)	<0.001
三者联合	-	91.07	80.90	0.917(0.872~0.962)	<0.001

AUC:曲线下面积

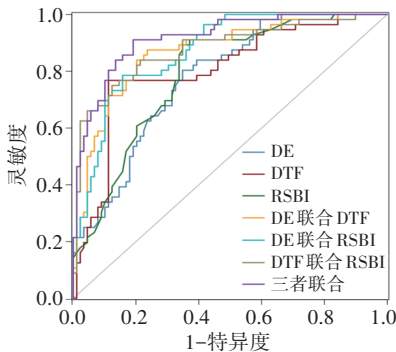


图3 RSBI、膈肌超声参数单独及联合应用预测神经重症机械通气患者撤机结局的ROC曲线图

讨 论

机械通气作为神经重症患者重要的生命支持手段,其撤机时机的精准判断直接影响患者预后和医疗成本。GCS评分包括睁眼反应、言语反应和肢体运动反应评分,是临床常用的评估患者意识状态的标准化工具,可间接反映神经系统损伤程度及对呼吸功能的影响;本研究单因素和多因素Logistic回归分析结果也显示,GCS评分是预测神经重症机械通气患者撤机结局的独立影响因素($P<0.05$),符合临床实际。RSBI因无法识别神经损伤导致的膈肌功能障碍及呼吸中枢驱动异常,在神经重症机械通气患者撤机结局中的预测价值有限。近年来研究^[10]证实,床旁超声通过测量DE和DTF,可动态评估膈肌功能状态,联合传统指标可提高预测撤机时机的准确性。本研究旨在探讨膈肌超声与RSBI联合应用在预测神经重症机械通气患

者撤机结局中的临床价值,以期降低撤机失败的发生风险。

RSBI通过计算呼吸频率与潮气量的比值以预测机械通气患者成功撤机的可能性^[11]。本研究结果显示,撤机失败组RSBI高于撤机成功组,差异有统计学意义($P<0.001$),表明RSBI较高的患者在撤机过程中可能面临更高的失败风险。本研究ROC曲线分析显示,RSBI以74次·min⁻¹·L⁻¹为截断值,预测神经重症机械通气患者撤机结局的AUC为0.791,高于孙晨靛等^[12]研究结果(AUC为0.773),但略低于黄晓丽等^[13]研究结果(AUC为0.792)。分析原因可能与研究人群的异质性有关,不同研究纳入标准差异导致基线特征偏移。本研究纳入的神经重症患者以颅脑损伤(占35.86%,52/145)和脑出血(占31.03%,45/145)为主,神经系统损伤可能影响呼吸中枢调控,从而导致预后差异。既往研究^[14]认为当RSBI<105次·min⁻¹·L⁻¹时,患者撤机成功率较高,且其值越低撤机成功率越高,但本研所得RSBI截断值远低于此,国内外也有文献^[15-17]得出相似结果。分析RSBI截断值存在差异的原因可能与研究对象存在异质性有关,本研究仅纳入神经重症患者,其他研究可能纳入了更广泛的患者群体;且不同疾病背景亦可能导致呼吸驱动力和膈肌功能具有差异,从而影响RSBI截断值^[18]。神经重症患者由于颅脑损伤,常伴有意识障碍、呼吸中枢功能障碍和周围神经病变^[19],这些因素导致呼吸驱动力下降和膈肌功能受损,增加了呼吸衰竭的发生风险并延长了机械通气时间^[20]。长时间的机械通气可能导致患者膈肌功能减弱,机体依赖辅助呼吸肌,使其呼吸频率和潮气量在短期内保持正常,故RSBI可能不会出现明显变化^[21]。但辅助呼吸肌的耐力有限,因此在膈肌收缩力降低的情况下,仅依据RSBI预测撤机结局的准确性可能降低。

膈肌功能受损是机械通气患者的常见并发症,显著影响撤机成功率^[22]。多项研究^[23-24]表明,应用膈肌超声可无创、重复、实时地监测膈肌状态,在预测撤机结局方面具有重要价值,且膈肌厚度、DE和DTF均为临床评估呼吸肌肉负荷能力的关键参数。本研究结果显示,撤机失败组DTF和DE均低于撤机成功组,差异均有统计学意义(均 $P<0.001$)。提示撤机失败患者可能存在膈肌结构损害和功能障碍,导致其在撤机后无法保持有效的自主呼吸。研究^[25]指出,当机械通气时间为18~69 h,约50%患者会出现膈肌萎缩,而在更长时间机械通气的患者中,约80%会发生膈肌功能

障碍。本研究撤机成功组 DTF 更高,表明撤机成功患者在吸气过程中膈肌增厚,具有较强的收缩力,能够有效地进行气体交换;而撤机失败组 DTF 较低,分析可能为撤机失败患者由于膈肌疲劳、肌肉萎缩或神经肌肉功能障碍,导致膈肌收缩力减弱^[26]。Lin 等^[27]研究显示 DTF 预测机械通气患者撤机结局的灵敏度、特异度、AUC 和截断值分别为 77.2%、72.7%、0.72 和 29.3%;黄晓丽等^[13]研究显示 DTF 以 33.08% 为截断值时预测机械通气患者撤机结局的灵敏度、特异度分别为 76.92%、81.08%。上述研究结果均证实了 DTF 预测机械通气患者撤机结局的可行性,为本研究提供了理论支持。本研究 ROC 曲线分析显示,DTF 以 30.06% 为截断值,预测神经重症机械通气患者撤机结局的灵敏度、特异度分别为 76.79%、88.76%,进一步证实了 DTF 在撤机指导中的作用。

孙丽颖等^[28]研究显示,联合 DTF、RSBI 及呼吸肌功能指标可显著提高对高龄重症肺炎患者撤机结局的预测效能;一项前瞻性研究^[29]结果表明,单独应用 RSBI、RSBI 与 DE 比值在预测撤机结局方面的诊断效能均较低(均 AUC<0.60),但联合 DE、DTF 及临床特征构建的多参数模型预测 7 d 撤机成功率的诊断效能有一定提高[AUC 为 0.77(95% 可信区间:0.64~0.90)],为多参数联合优化撤机决策提供了关键证据支持。基于此,本研究将研究视角延伸至神经重症患者这一特殊群体,该类患者因中枢神经系统损伤常导致呼吸驱动与外周肌群活动发生解耦联,当中枢驱动异常增强如脑干网状激活系统受累导致过度呼吸驱动时,外周膈肌因神经传导阻滞无法进行有效收缩^[30],临床表现为呼吸频率代偿性增快但潮气量进行性下降,导致 RSBI 下降。本研究撤机失败组中亦有 2 例脑出血患者 RSBI<85 次·min⁻¹·L⁻¹,但 DTF<30%。反之,当外周肌群因废用性萎缩导致收缩效能下降时(DTF<30%),中枢可能通过抑制呼吸节律进行保护性调节^[31]。本研究中有 1 例颅脑损伤患者 RSBI 降至 68 次·min⁻¹·L⁻¹,这种双向代偿机制使得单一参数评估撤机结局时存在局限性,如高估中枢代偿能力(仅监测 RSBI)或低估外周肌功能储备(仅依赖 DE、DTF),最终导致撤机失败。本研究结果显示,RSBI、DE 及 DTF 三者联合应用预测神经重症机械通气患者撤机结局的 AUC 最高,为 0.917(95% 可信区间:0.872~0.962),对应的灵敏度、特异度分别为 91.07%、80.90%,证实了多参数联合应用在评估复杂病理生理机制中的独特优势。于生理角度而言,RSBI 反映呼吸中枢的输出效率,DE 反映膈

肌收缩幅度的机械效能,DTF 反映单位时间内能量代谢状态,分别对应呼吸链的关键环节,即神经驱动、机械做功和能量代谢,三者联合可从呼吸力学、神经驱动和肌肉功能 3 个维度构建一个全面的撤机评估体系。于病理学层面而言,神经重症患者常存在中枢神经系统与外周神经系统之间信号传导障碍^[32],导致应用单一参数进行评估时出现“盲区”。本研究中有 3 例脑干损伤患者虽 RSBI<105 次·min⁻¹·L⁻¹,但已表现为膈肌疲劳(DTF<23%),多参数联合应用成功识别其撤机高风险,证实了多参数联合应用能提高预测的准确性。

本研究的局限性:①为单中心、回顾性研究,样本量较小,纳入患者包括颅脑损伤、脑出血等多种疾病,未进行亚组分析不同神经系统损伤对呼吸中枢影响的差异;②多参数联合应用策略存在临床转化瓶颈,包括操作复杂性增加(膈肌超声测量需要专业培训,与 RSBI 的床旁快速获取特性形成效率矛盾)、各参数间可能存在非线性交互作用;③因神经重症患者特有的中枢-外周呼吸失协调特性,联合诊断模型的特异度尚存在优化空间。后续研究拟纳入脑干反射评估等神经功能参数完善联合诊断模型,建立多中心、前瞻性队列研究进一步验证。

综上所述,膈肌超声联合 RSBI 在预测神经重症机械通气患者撤机结局中具有较高的临床价值,可为神经重症个体化撤机方案的制定提供参考依据。

参考文献

- [1] 王华芬,卢芳燕,董丽,等.肝移植术后机械通气时间延长的危险因素及预后分析[J].浙江医学教育,2024,23(3):181-187.
- [2] Bureau C, Demoule A. Weaning from mechanical ventilation in neurocritical care[J].Rev Neurol(Paris),2022,178(1-2):111-120.
- [3] Trivedi V, Chaudhuri D, Jinah R, et al.The usefulness of the rapid shallow breathing index in predicting successful extubation: a systematic review and Meta-analysis [J].Chest,2022,161(1):97-111.
- [4] Liu Y, Zhou Y, Liu P, et al.Combined lung and diaphragm ultrasound predicts extubation outcomes in ARDS: a prospective study[J].Eur J Med Res,2024,29(1):510.
- [5] 尹莉,葛辉玉,王斯宇,等.膈肌移动度预测重症肺炎患者有创机械通气需求及死亡风险的临床价值[J].临床超声医学杂志,2023,25(10):775-779.
- [6] Coiffard B, Dianti J, Telias I, et al.Dyssynchronous diaphragm contractions impair diaphragm function in mechanically ventilated patients[J].Crit Care,2024,28(1):107.
- [7] Haaksma ME, Smit JM, Boussuges A, et al.Expert consensus on diaphragm ultrasonography in the critically ill(EXODUS): a Delphi Consensus Statement on the measurement of diaphragm ultrasound-

- derived parameters in a critical care setting [J]. Crit Care, 2022, 26(1):99.
- [8] 中华医学会重症医学分会. 慢性阻塞性肺疾病急性加重患者机械通气指南 (2007) [J]. 中华急诊医学杂志, 2007, 16(4): 350-357.
- [9] 储蕴, 郭闯, 付海燕. 老年机械通气患者膈肌浅快呼吸指数与肺部超声评分的相关性及其对撤机结局的预测价值 [J]. 中华危重病急救医学, 2024, 36(2): 152-155.
- [10] Marques MR, Pereira JM, Paiva JA, et al. Ultrasonography to access diaphragm dysfunction and predict the success of mechanical ventilation weaning in critical care: a narrative review [J]. J Ultrasound Med, 2024, 43(2): 223-236.
- [11] Duarte H, Fran A DLG, Portes MCF, et al. Comparison of different methods of obtaining the rapid shallow breathing index [J]. Braz J Anesthesiol, 2023, 73(5): 578-583.
- [12] 孙晨枫, 向淑麟, 陆舒, 等. 膈肌超声联合浅快呼吸指数对指导机械通气患者撤机的价值研究 [J]. 中国医学装备, 2020, 17(10): 66-70.
- [13] 黄晓丽, 李颖川, 封凯旋, 等. 床旁超声膈肌功能监测对机械通气患者撤机的指导价值 [J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(6): 657-661.
- [14] Albashir SM, Robert RC, Jairath NN, et al. The rapid shallow breathing index (RSBI) as a predictor for extubation success in medical and surgical ICU patients: a retrospective cohort study [J]. Heart Lung, 2025, 70: 321-328.
- [15] 刘芳欣, 陈昭杰, 王洲, 等. 剪切波弹性成像联合膈肌增厚率及浅快呼吸指数预测机械通气患者撤机结果的临床研究 [J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2023, 22(1): 38-43.
- [16] Shamil PK, Gupta NK, Ish P, et al. Prediction of weaning outcome from mechanical ventilation using diaphragmatic rapid shallow breathing index [J]. Indian J Crit Care Med, 2022, 26(9): 1000-1005.
- [17] Pham T, Heunks L, Bellani G, et al. Weaning from mechanical ventilation in intensive care units across 50 countries (wean safe): a multicentre, prospective, observational cohort study [J]. Lancet Respir Med, 2023, 11(5): 465-476.
- [18] Varón-Vega F, Tuta-Quintero E, Robayo-Amortegui H, et al. Clinical utility of rapid shallow breathing index in predicting successful weaning: secondary analysis of the COBRE-US trial [J]. Med Intensiva (Engl Ed), 2025, 49(2): 72-77.
- [19] Hu S, Exner C, Sienel RI, et al. Characterization of vasogenic and cytotoxic brain edema formation after experimental traumatic brain injury by free water diffusion magnetic resonance imaging [J]. J Neurotrauma, 2024, 41(3-4): 393-406.
- [20] da Silva AR, Novais MCM, Neto MG, et al. Predictors of extubation failure in neurocritical patients: a systematic review [J]. Aust Crit Care, 2023, 36(2): 285-291.
- [21] Ma J, Zhang H, Pang X, et al. Diaphragmatic ultrasonography as a predictor of respiratory muscle fatigue in myasthenia gravis [J]. Muscle Nerve, 2024, 69(2): 199-205.
- [22] 宋伟, 王明明, 凌受毅, 等. 床旁膈肌超声评价电针预防脓毒症患者获得性肌无力的效果 [J]. 临床超声医学杂志, 2021, 23(5): 355-359.
- [23] 孙瑞祥, 方可, 江海娇, 等. 膈肌增厚分数联合 MRC 评分对 ICU 获得性衰弱患者机械通气撤机结局的预测价值 [J]. 中华危重病急救医学, 2023, 35(10): 1080-1084.
- [24] 赵浩天, 王华伟, 龙玲, 等. 心脏、肺和膈肌超声联合预测重症机械通气患者撤机的价值 [J]. 临床超声医学杂志, 2022, 24(8): 608-612.
- [25] Powers SK. Ventilator-induced diaphragm dysfunction: phenomenology and mechanism(s) of pathogenesis [J]. J Physiol, 2024, 602(19): 4729-4752.
- [26] Coiffard B, Dianti J, Telias I, et al. Dyssynchronous diaphragm contractions impair diaphragm function in mechanically ventilated patients [J]. Crit Care, 2024, 28(1): 107.
- [27] Lin H, Yao M, Qin Z, et al. Predictive values of ultrasonic diaphragm thickening fraction combined with integrative weaning index in weaning patients with mechanical ventilation: a retrospective study [J]. J Cardiothorac Surg, 2024, 19(1): 66.
- [28] 孙颖颖, 王林琳, 叶旭辉, 等. DTF-RSBI、DE-RSBI 联合呼吸肌功能指标预测高龄重症肺炎机械通气撤机结局的价值研究 [J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2024, 19(10): 1307-1311, 1315.
- [29] Fossat G, Daillet B, Desmalles E, et al. Does diaphragm ultrasound improve the rapid shallow breathing index accuracy for predicting the success of weaning from mechanical ventilation? [J]. Aust Crit Care, 2022, 35(3): 233-240.
- [30] Roshdy A. Respiratory monitoring during mechanical ventilation: the present and the future [J]. J Intensive Care Med, 2023, 38(5): 407-417.
- [31] Ziaka M, Exadaktylos A. Pathophysiology of acute lung injury in patients with acute brain injury: the triple-hit hypothesis [J]. Crit Care, 2024, 28(1): 71.
- [32] Huang Y, Liu B, Sinha SC, et al. Mechanism and therapeutic potential of targeting cGAS-STING signaling in neurological disorders [J]. Mol Neurodegener, 2023, 18(1): 79.

(收稿日期: 2024-12-09)