

超声监测膈肌运动指标对机械通气撤机的指导价值

樊麦英 罗杰英 文辉 宁凤玲 高敏 韩小彤

410005 湖南长沙,湖南省人民医院(湖南师范大学第一附属医院)急诊科,急危重症代谢组学湖南省重点实验室

通讯作者:韩小彤,Email:744953695@qq.com

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2018.11.006

【摘要】 目的 通过超声评估机械通气撤机患者的膈肌运动指标,探讨膈肌超声指标对撤机的指导价值。方法 选择2017年9月至2018年2月在湖南省人民医院急诊重症加强治疗病房(EICU)进行有创机械通气至少48h的40例患者,采用低水平压力支持通气(PSV)进行自主呼吸试验(SBT),在SBT 1h内采用床旁M型超声评估患者的膈肌运动指标,包括膈肌位移、膈肌浅快呼吸指数(D-RSBI),应用呼吸机测量浅快呼吸指数(RSBI),对符合临床撤机标准者进行撤机。根据撤机成功与否将患者分为撤机成功组和撤机失败组。采用受试者工作特征曲线(ROC)评价各项指标对撤机失败的预测价值。结果 40例患者均纳入最终分析,其中撤机成功组28例,撤机失败组12例。撤机失败组膈肌位移明显小于撤机成功组($\text{mm}: 9.56 \pm 2.13$ 比 13.66 ± 4.10 , $P < 0.01$), D-RSBI和RSBI明显大于撤机成功组[D-RSBI($\text{次} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$): 2.06 ± 0.68 比 1.44 ± 0.66 , RSBI($\text{次} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$): 61.70 ± 25.00 比 44.91 ± 14.51 , 均 $P < 0.05$]。膈肌位移、D-RSBI、RSBI的ROC曲线下面积(AUC)分别为0.830、0.851和0.711,以膈肌位移和D-RSBI的预测价值较大。当膈肌位移的最佳临界值为11.15 mm时,预测撤机失败的敏感度为83.3%,特异度为71.4%;当D-RSBI的最佳临界值为1.42 $\text{次} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,预测撤机失败的敏感度为91.7%,特异度为82.1%。结论 膈肌超声指标的膈肌位移及D-RSBI可以准确预测撤机失败,其在指导撤机上优于传统的RSBI。

【关键词】 超声; 膈肌运动; 撤机指标

基金项目: 湖南省卫生计生委科研项目(B20180536)

Value of the diaphragm movement index tested by ultrasonography for ventilation weaning Fan Maiying, Luo Jieying, Wen Hui, Ning Fengling, Gao Min, Han Xiaotong

Department of Emergency Medicine, Hunan Provincial People's Hospital (the First Affiliated Hospital of Hunan Normal University), Hunan Key Laboratory of Critical and Critical Metabolomics, Changsha 410005, Hunan, China

Corresponding author: Han Xiaotong, Email: 744953695@qq.com

【Abstract】 Objective To evaluate the diaphragm movement index of mechanical ventilation weaning patients by ultrasonography, and to explore its value for weaning. **Methods** Forty patients undergoing invasive mechanical ventilation for at least 48 hours admitted to emergency intensive care unit (EICU) of Hunan Provincial People's Hospital from September 2017 to February 2018 were enrolled. Low level pressure support ventilation (PSV) was used for spontaneous breathing test (SBT), and bedside M-mode ultrasonography was used to assess the diaphragm movement index of the patient within 1 hour of SBT, including the excursion of the diaphragm, diaphragmatic-rapid shallow breathing index (D-RSBI). The rapid shallow breathing index (RSBI) was measured by ventilator. The patients who met the clinical weaning criteria were weaned. According to the success or failure of the weaning, the patients were divided into the successful weaning group and the failure weaning group. The receiver operating characteristic (ROC) curve was used to evaluate the predictive value of each indicator to the failure of the weaning. **Results** A total of 40 patients were enrolled in the final analysis, including 28 patients in the successful weaning group and 12 patients in the failure weaning group. The excursion of the diaphragm in the failure weaning group was significantly less than that in the successful weaning group ($\text{mm}: 9.56 \pm 2.13$ vs. 13.66 ± 4.10 , $P < 0.01$), and the D-RSBI and RSBI were significantly higher than those in the successful weaning group [D-RSBI ($\text{times} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$): 2.06 ± 0.68 vs. 1.44 ± 0.66 , RSBI ($\text{times} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$): 61.70 ± 25.00 vs. 44.91 ± 14.51 , both $P < 0.05$]. The area under the ROC curve (AUC) of diaphragm displacement, D-RSBI, and RSBI was 0.830, 0.851 and 0.711, respectively, and the predicted value of diaphragm excursion and D-RSBI was higher. When the optimal critical value of diaphragmatic excursion was 11.15 mm, the sensitivity of predicting weaning failure was 83.3%, the specificity was 71.4%; when the optimal critical value of D-RSBI was 1.42 $\text{times} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$, the sensitivity of predicting the failure of weaning was 91.7%, and the specificity was 82.1%. **Conclusion** Diaphragm excursion and D-RSBI of the diaphragmatic ultrasonography index could accurately predict the failure of the weaning, which was superior to the traditional RSBI in guiding weaning.

【Key words】 Ultrasonography; Diaphragm movement; Weaning indicator

Fund program: Research Project of Hunan Provincial Health and Family Planning Commission (B20180536)

机械通气是危重症患者常用的一种生命支持手段,而机械通气撤机问题是临床医师经常面临的难题。研究表明,机械通气患者大约有40%的时间用于撤机^[1],而临床上撤机失败率在12%~50%^[2]。撤机失败会导致重症加强治疗病房(ICU)住院时间延长,病死率增加^[3-4]。膈肌功能障碍是导致机械通气撤离失败的重要原因之一。目前有研究表明,床旁超声可准确评估膈肌功能,膈肌位移、膈肌增厚分数等膈肌超声指标可以预测撤机结局^[5-7]。本研究通过对机械通气撤机患者进行床旁超声检查,监测膈肌位移、膈肌浅快呼吸指数(D-RBSI),评价超声下膈肌运动指标预测撤机结局的能力。

1 对象与方法

1.1 研究对象:选择2017年9月至2018年2月在湖南省人民医院急诊重症加强治疗病房(EICU)进行有创机械通气至少48 h的患者,所有患者由临床医师判断均达到进行自主呼吸试验(SBT)的标准。根据患者撤机结局分为撤机成功组和撤机失败组。

1.1.1 纳入标准:①年龄>18岁。②符合SBT标准:疾病处于恢复期,具有有效咳嗽能力;精神活动良好[可唤醒,格拉斯哥昏迷评分(GCS)≥13分,无连续镇静剂输注];有足够氧合[动脉血氧分压(PaO₂)≥60 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)、吸入氧浓度(FiO₂)≤0.35,氧合指数(PaO₂/FiO₂)≥150 mmHg,呼气末正压(PEEP)≤10 cmH₂O(1 cmH₂O=0.098 kPa)];循环稳定[心率(HR)≤140次/min,血压稳定],不需或仅需小剂量血管活性药;代谢状态稳定(无高热,血红蛋白≥80 g/L,血钾、血钠和血钙等主要电解质水平基本正常,无明显的呼吸性酸中毒)。

1.1.2 排除标准:①妊娠期;②大量胸腔积液、气胸、连枷胸;③膈下感染;④原发神经肌肉疾病;⑤研究前48 h内使用肌松药;⑥既往存在或新近发现单侧或者双侧膈肌瘫痪或存在矛盾运动。

1.2 伦理学:本研究符合医学伦理学要求,已通过医院伦理委员会批准(审批号:2018-30),所有患者均由其直系亲属签署知情同意书。

1.3 研究方法

1.3.1 资料收集:收集纳入患者的基本生理特征资料,包括性别、年龄、体重指数(BMI)、是否吸烟、急性生理学与慢性健康状况评分II(APACHE II)、机械通气原因、合并症、是否手术和药物使用情况。

1.3.2 SBT:采用低水平压力支持通气(PSV)进行SBT。压力支持(PS)水平设置在5 cmH₂O, PEEP设

置在5 cmH₂O, FiO₂设置在0.35,持续1 h。

1.3.3 撤机指标测定:于SBT 30 min或SBT失败重新建立机械通气前进行床旁膈肌超声检查,获得膈肌位移;同时应用呼吸机监测患者自主呼吸频率(RR)、潮气量(VT)。根据公式计算浅快呼吸指数(RSBI, RSBI=RR/VT)和D-RSBI(D-RSBI=RR/膈肌位移)。

1.3.4 右侧膈肌超声检查:患者取半卧位(床头抬高45°),使用索诺声床旁超声仪,采用3.5 MHz超声探头,探测窗为肝脏,将探头置于患者右侧肋缘下锁骨中线上,探头朝向患者头部,超声束指向膈肌中后部,即膈肌运动幅度最大的位置^[8-9]。先在二维模式下寻找最佳位置,然后固定探头,进行M型超声测量膈肌运动幅度,获得膈肌位移值,测量3次,取平均值。

1.3.5 撤机结果评价:对耐受1 h SBT的患者,由临床医师判断予以拔除气管导管,继续观察48 h,追踪记录患者机械通气时间、住院时间及预后。以下几种情况认为撤机失败^[10]: SBT失败;或者SBT成功拔管后48 h内再次进行有创或无创机械通气;或者SBT后48 h内死亡。

1.3.6 SBT失败的临床评估指标:①主观标准:患者出现焦虑、烦躁、大汗、发绀、过度呼吸用力、呼吸窘迫、胸腹矛盾呼吸等主要临床表现。②客观标准: FiO₂≥0.50, PaO₂≤60 mmHg或者脉搏血氧饱和度(SpO₂)<0.90;动脉血二氧化碳分压(PaCO₂)>50 mmHg或PaCO₂升高>8 mmHg; pH<7.32或pH值降低>0.07; RR≥35次/min或增加幅度≥50%, HR>140次/min或增加幅度≥20%;收缩压(SBP)>180 mmHg或<90 mmHg,心律失常。

1.4 统计学方法:采用SPSS 19.0软件进行统计学分析。正态分布计量资料以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,经方差齐性检验后,采用成组t检验进行两组间比较。计数资料以频数表示,采用 χ^2 检验。采用受试者工作特征曲线(ROC)评价RSBI、膈肌位移、D-RSBI对撤机失败的预测价值。以P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者基本资料比较(表1):共40例患者纳入研究,其中撤机成功组28例,撤机失败组12例;在撤机失败患者中,慢性阻塞性肺疾病(COPD)5例(占41.7%),重症肺炎3例(占25.0%),手术后1例(占8.3%),脑血管病变3例(占25.0%)。两组患者

表1 撤机成功与撤机失败两组有创机械通气至少48h患者基本资料比较

基本资料	撤机成功组 (n=28)	撤机失败组 (n=12)	χ^2/t 值	P 值	基本资料	撤机成功组 (n=28)	撤机失败组 (n=12)	χ^2 值	P 值
性别(例) 男性	20	8	0.091	0.763	合并症(例)				
女性	8	4			高血压	6	4	0.159	0.690
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$)	63.96 ± 15.41	70.42 ± 9.21	-1.345	0.187	糖尿病	2	2	0.119	0.730
BMI(kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	23.63 ± 3.20	24.02 ± 3.31	0.391	0.698	肿瘤	2	0	0.025	0.874
吸烟(例) 是	17	6	0.395	0.530	冠心病	4	3	0.132	0.716
否	11	6			CKD	3	0	0.275	0.600
APACHE II(分, $\bar{x} \pm s$)	17.39 ± 5.90	16.00 ± 4.97	0.716	0.478	COPD	5	5	1.429	0.232
机械通气原因(例)					手术(例)	2	1	0.000	1.000
呼吸衰竭	15	7	0.077	0.781	药物使用情况(例)				
颅内病变	9	3	0.000	1.000	肌松药	2	3	1.088	0.297
脓毒症	15	8	0.589	0.443	糖皮质激素	5	3	0.007	0.931
其他	4	1	0.000	1.000	血管活性药物	5	2	0.000	1.000

注: BMI 为体重指数, APACHE II 为急性生理学与慢性健康状况评分 II, CKD 为慢性肾脏病, COPD 为慢性阻塞性肺疾病

性别、年龄、BMI、吸烟与否、APACHE II、机械通气原因、合并症、是否手术、药物使用情况等基本资料比较差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$), 说明两组患者基本资料均衡, 具有可比性。

2.2 两组患者 SBT 前参数比较(表 2): 两组患者 SBT 前 pH 值、PaO₂/FiO₂、PaCO₂、HR、SBP 比较差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。

表2 撤机成功与撤机失败两组有创机械通气至少48h患者SBT前参数比较($\bar{x} \pm s$)

组别	例数 (例)	pH 值	PaO ₂ /FiO ₂ (mmHg)	PaCO ₂ (mmHg)
撤机成功组	28	7.47 ± 0.07	290.49 ± 165.96	33.10 ± 8.45
撤机失败组	12	7.43 ± 0.05	230.11 ± 52.52	41.95 ± 13.33
t 值		1.521	1.234	-1.834
P 值		0.143	0.236	0.087

组别	例数 (例)	HR (次/min)	SBP (mmHg)
撤机成功组	28	90.46 ± 5.63	123.77 ± 16.13
撤机失败组	12	90.10 ± 13.09	131.10 ± 21.20
t 值		0.082	-0.943
P 值		0.936	0.356

注: SBT 为自主呼吸试验, PaO₂/FiO₂ 为氧合指数, PaCO₂ 为动脉血二氧化碳分压, HR 为心率, SBP 为收缩压; 1 mmHg = 0.133 kPa

2.3 两组患者临床预后指标比较(表 3): 撤机失败组患者机械通气时间、住院时间较撤机成功组更长, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$); 而两组患者住院病死率比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。

表3 撤机成功与撤机失败两组有创机械通气至少48h患者临床预后指标比较

组别	例数 (例)	机械通气时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	住院时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	住院病死率 [% (例)]
撤机成功组	28	7.03 ± 3.55	15.31 ± 6.06	0 (0)
撤机失败组	12	12.50 ± 5.43	22.18 ± 3.97	16.7 (2)
t / χ^2 值		-2.488	-2.776	2.030
P 值		0.022	0.023	0.154

2.4 两组患者 SBT 过程中撤机参数比较(表 4): 两组患者 SBT 30 min 时 RR、VT 比较差异无统计学意义(均 $P > 0.05$); 但撤机失败组膈肌位移较撤机成功组明显减小, D-RSBI、RSBI 较撤机成功组明显增加, 差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。

表4 撤机成功与撤机失败两组有创机械通气至少48h患者SBT过程中撤机参数比较($\bar{x} \pm s$)

组别	例数 (例)	VT (mL)	RR (次/min)	膈肌位移 (mm)
撤机成功组	28	474.52 ± 190.91	19.67 ± 6.02	13.66 ± 4.10
撤机失败组	12	409.37 ± 202.33	21.29 ± 6.07	9.56 ± 2.13
t 值		0.972	-0.781	-3.263
P 值		0.337	0.440	0.002

组别	例数 (例)	D-RSBI (次·min ⁻¹ ·mm ⁻¹)	RSBI (次·min ⁻¹ ·L ⁻¹)
撤机成功组	28	1.44 ± 0.66	44.91 ± 14.51
撤机失败组	12	2.06 ± 0.68	61.70 ± 25.00
t 值		-2.755	-2.676
P 值		0.009	0.011

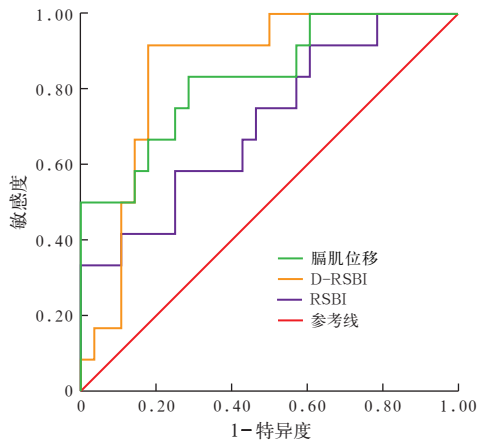
注: SBT 为自主呼吸试验, VT 为潮气量, RR 为呼吸频率, D-RSBI 为膈肌浅快呼吸指数, RSBI 为浅快呼吸指数

2.5 各项指标对撤机失败的预测能力(表 5; 图 1): 膈肌位移、D-RSBI、RSBI 对撤机失败均有预测效能, 以 D-RSBI 的预测价值最大, 膈肌位移次之。当 D-RSBI 的最佳临界值为 1.42 次·min⁻¹·mm⁻¹ 时, 预测撤机失败的敏感度为 91.7%, 特异度为 82.1%。

表5 各项指标对有创机械通气至少48h患者撤机失败的预测能力

参数	最佳 临界值	AUC (95%CI)	敏感度 (%)	特异度 (%)	P 值
膈肌位移	11.15	0.830 (0.690 ~ 0.970)	83.3	71.4	0.001
D-RSBI	1.42	0.851 (0.729 ~ 0.973)	91.7	82.1	0.000
RSBI	53.46	0.711 (0.534 ~ 0.888)	58.3	75.0	0.036

注: D-RSBI 为膈肌浅快呼吸指数, RSBI 为浅快呼吸指数, AUC 为受试者工作特征曲线下面积, 95%CI 为 95% 可信区间



注：D-RSBI 为膈肌浅快呼吸指数，RSBI 为浅快呼吸指数，ROC 曲线为受试者工作特征曲线

图 1 膈肌位移、D-RSBI、RSBI 预测有创机械通气至少 48 h 患者撤机失败的 ROC 曲线

3 讨论

机械通气患者常因不同原因导致撤机失败，主要包括原发的严重呼吸系统疾病（COPD 或严重限制性疾病）、心力衰竭、感染并发症和呼吸肌无力（主要是膈肌）、危重症神经病变、心理问题等^[11]。撤机失败的病理生理机制是复杂且与多因素相关的，本质上是撤机时呼吸负荷与呼吸能力之间不平衡所致。膈肌作为主要呼吸肌，是影响机械通气患者成功撤机的主要因素^[12-14]。研究表明，COPD 急性加重期（AECOPD）患者机械通气期间膈肌收缩强度降低，并随时间延长而加重，最大跨膈压可能成为预测 AECOPD 机械通气患者脱机成功的一项指标^[12]。然而，重症患者膈肌功能评估手段有限，有研究表明床旁超声是评估膈肌功能的有效方法^[15]，其无创、简便易操作、可床旁即时使用，并具有准确性高、组间及组内可重复性高^[16-17]的优点。而临床上很少用超声来评估膈肌功能，说明临床医师对膈肌的认知尚不足。本研究通过对 ICU 机械通气患者在撤机前进行床旁超声评估膈肌运动，利用膈肌超声指标对撤机进行指导，以期引起临床医师对膈肌的重视，通过膈肌超声指标指导撤机时机的选择，进一步优化撤机决策。

本研究结果显示，与撤机成功组相比，撤机失败组患者膈肌位移更小、D-RSBI 及 RSBI 更高；撤机失败组患者机械通气时间、住院时间较撤机成功组更长，说明膈肌功能可能影响撤机结局及患者预后。两组患者住院病死率无明显差异，可能与本研究样本量不大相关。本研究中膈肌位移、D-RSBI、RSBI 均可指导机械通气患者撤机，其中以 D-RSBI 预测

撤机失败价值最高。

RSBI 是最常用的预测撤机结局的指标之一，一般以小于 $105 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$ 为预测撤机成功的最佳值。然而研究显示，RSBI 在不同人群及检测方法下，预测撤机结局的临界值及敏感度均不同^[18-20]，指导撤机价值不高^[21-22]。从该指标的计算公式可知，以适当的 RR 维持足够的 VT，患者脱离呼吸机并自主呼吸的可能性较大。研究报告，撤机失败患者在撤机早期（SBT 30 min）即出现浅而快的呼吸，即 RSBI 值增加，并随时间延长呈进行性增加，说明撤机失败患者在 SBT 早期即出现呼吸负荷增加^[23]。本研究中监测 SBT 30 min 时的 RSBI 值，结果显示撤机成功组患者 RSBI 值明显低于撤机失败组，而单一的 RR、VT 在两组患者间差异无统计学意义。

膈肌位移是通过测量膈肌在呼吸周期中的移动距离来反映膈肌功能，一般以小于 10 mm 认为膈肌功能障碍。Kim 等^[24]的研究表明，SBT 时膈肌位移小于 10 mm 的患者撤机失败发生率更高。本研究结果显示，撤机失败患者膈肌位移较撤机成功患者小，即撤机失败患者存在膈肌功能减退。膈肌位移预测撤机失败的敏感度、特异度较 RSBI 更高。分析原因可能是：RSBI 反映所有呼吸肌的通气效率，膈肌位移能特异性反映膈肌功能状态。撤机时若存在膈肌功能障碍，机体为维持通气需要，增加呼吸中枢驱动，动员肋间肌、呼气肌、辅助呼吸肌肉产生 VT，代偿的同时掩盖膈肌功能障碍^[25-27]，这时 RSBI 在正常范围可能是机体代偿的表现，而肋间肌、呼气肌、辅助呼吸肌肉的强度和耐力远不及膈肌^[28]，若此时撤机则容易导致撤机失败，因此膈肌位移预测撤机结局较 RSBI 更为准确。

基于膈肌在 VT 产生中占主导地位，本研究将 RSBI 公式中的 VT 以膈肌位移替代，获得 D-RSBI，结果显示，撤机失败组患者 D-RSBI 较撤机成功组低，以 $1.42 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ 预测撤机失败的敏感度、特异度高，较膈肌位移、RSBI 的预测价值更大。这要从撤机失败本质来说明，撤机失败的实质是呼吸系统应对负荷的能力与所承受的负荷之间不平衡，而 D-RSBI 能反映撤机过程中膈肌承担的负荷与应对负荷能力之间的平衡状况；此外膈肌活动度测量结果易受呼吸、腹内压及呼吸机使用的影响^[29]，D-RSBI 将 RR 考虑在内，进一步减少了对 RR 的影响，因此准确性更高。D-RSBI 能特异性反映膈肌的通气效率，因此预测撤机结局较传统 RSBI 准确度

更高。

目前已明确脓毒症^[30-31]和药物(肌松药^[32]、激素^[33])的使用会造成膈肌损伤,本研究将两组患者的疾病情况(包括脓毒症)、药物使用情况(包括肌松药、糖皮质激素、血管活性药物)考虑在内,结果显示,撤机成功组与撤机失败组患者的疾病情况及药物使用情况差异无统计学意义,排除了它们对研究结果的影响。

综上所述,超声监测膈肌运动指标的膈肌位移及D-RSBI可以准确预测有创机械通气至少48 h患者撤机失败,其在指导撤机上优于传统的RSBI,对临床撤机结局的预测具有指导作用。

参考文献

- [1] Esteban A, Ferguson ND, Meade MO, et al. Evolution of mechanical ventilation in response to clinical research [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2008, 177 (2): 170-177. DOI: 10.1164/rccm.200706-893OC.
- [2] Jeong BH, Ko MG, Nam J, et al. Differences in clinical outcomes according to weaning classifications in medical intensive care units [J]. *PLoS One*, 2015, 10 (4): e0122810. DOI: 10.1371/journal.pone.0122810.
- [3] Thille AW, Cortés-Puch I, Esteban A. Weaning from the ventilator and extubation in ICU [J]. *Curr Opin Crit Care*, 2013, 19 (1): 57-64. DOI: 10.1097/MCC.0b013e32835c5095.
- [4] Zein H, Baratloo A, Negida A, et al. Ventilator weaning and spontaneous breathing trials: an educational review [J]. *Emerg (Tehran)*, 2016, 4 (2): 65-71.
- [5] DiNino E, Gartman EJ, Sethi JM, et al. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation [J]. *Thorax*, 2014, 69 (5): 423-427. DOI: 10.1136/thoraxjnl-2013-204111.
- [6] Ferrari G, De Filippi G, Elia F, et al. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation [J]. *Crit Ultrasound J*, 2014, 6 (1): 8. DOI: 10.1186/2036-7902-6-8.
- [7] Boussuges A, Gole Y, Blanc P, et al. Diaphragmatic motion studied by m-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values [J]. *Chest*, 2009, 135 (2): 391-400. DOI: 10.1378/chest.08-1541.
- [8] Harris RS, Giovannetti M, Kim BK. Normal ventilatory movement of the right hemidiaphragm studied by ultrasonography and pneumotachography [J]. *Radiology*, 1983, 146 (1): 141-144. DOI: 10.1148/radiology.146.1.6849035.
- [9] Jousela I, Mäkeläinen A, Tahvanainen J, et al. Diaphragmatic movement using ultrasound during spontaneous and mechanical ventilation: effect of tidal volume [J]. *Acta Anaesthesiol Belg*, 1992, 43 (3): 165-171.
- [10] Peñuelas O, Frutos-Vivar F, Fernández C, et al. Characteristics and outcomes of ventilated patients according to time to liberation from mechanical ventilation [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2011, 184 (4): 430-437. DOI: 10.1164/rccm.201011-1887OC.
- [11] Doorduyn J, van der Hoeven JG, Heunks LM. The differential diagnosis for failure to wean from mechanical ventilation [J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2016, 29 (2): 150-157. DOI: 10.1097/ACO.0000000000000297.
- [12] 王飞飞, 朱晓萍, 张常晶, 等. 机械通气对AECOPD患者膈肌收缩功能的影响 [J]. *中华危重病急救医学*, 2017, 29 (11): 988-993. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2017.11.006.
- [12] Wang FF, Zhu XP, Zhang CJ, et al. Effects of mechanical ventilation on diaphragmatic contractile function in patients with AECOPD [J]. *Chin Crit Care Med*, 2017, 29 (11): 988-993. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2017.11.006.
- [13] Buscher H, Valta P, Boie T, et al. Assessment of diaphragmatic function with cervical magnetic stimulation in critically ill patients [J]. *Anaesth Intensive Care*, 2005, 33 (4): 483-491.
- [14] Carlucci A, Ceriana P, Priniakakis G, et al. Determinants of weaning success in patients with prolonged mechanical ventilation [J]. *Crit Care*, 2009, 13 (3): R97. DOI: 10.1186/cc7927.
- [15] Hermans G, Agten A, Testelmans D, et al. Increased duration of mechanical ventilation is associated with decreased diaphragmatic force: a prospective observational study [J]. *Crit Care*, 2010, 14 (4): R127. DOI: 10.1186/cc9094.
- [16] Boussuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic motion studied by m-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values [J]. *Chest*, 2009, 135 (2): 391-400. DOI: 10.1378/chest.08-1541.
- [17] Goligher EC, Laghi F, Detsky ME, et al. Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity [J]. *Intensive Care Med*, 2015, 41 (4): 642-649. DOI: 10.1007/s00134-015-3687-3.
- [18] Patel KN, Ganatra KD, Bates JH, et al. Variation in the rapid shallow breathing index associated with common measurement techniques and conditions [J]. *Respir Care*, 2009, 54 (11): 1462-1466.
- [19] El-Khatib MF, Zeineldine SM, Jamaledine GW. Effect of pressure support ventilation and positive end expiratory pressure on the rapid shallow breathing index in intensive care unit patients [J]. *Intensive Care Med*, 2008, 34 (3): 505-510. DOI: 10.1007/s00134-007-0939-x.
- [20] Krieger BP, Isher J, Breitenbacher A, et al. Serial measurements of the rapid-shallow-breathing index as a predictor of weaning outcome in elderly medical patients [J]. *Chest*, 1997, 112 (4): 1029-1034. DOI: 10.1378/chest.112.4.1029.
- [21] Huang CT, Yu CJ. Conventional weaning parameters do not predict extubation outcome in intubated subjects requiring prolonged mechanical ventilation [J]. *Respir Care*, 2013, 58 (8): 1307-1314. DOI: 10.4187/respcare.01773.
- [22] Savi A, Teixeira C, Silva JM, et al. Weaning predictors do not predict extubation failure in simple-to-wean patients [J]. *J Crit Care*, 2012, 27 (2): 221. e1-8. DOI: 10.1016/j.jccr.2011.07.079.
- [23] 穆玉, 彭民, 苏艳超, 等. 自主呼吸浅快指数趋势分析对拔管成功预测准确性的影响 [J]. *中华医学杂志*, 2013, 93 (5): 357-361. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2013.05.009.
- [23] Mu Y, Peng M, Su YC, et al. Trend analysis of rapid shallow breathing indices during spontaneous breathing trial may improve predictive accuracy of extubation success [J]. *Natl Med J China*, 2013, 93 (5): 357-361. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2013.05.009.
- [24] Kim WY, Suh HJ, Hong SB, et al. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation [J]. *Crit Care Med*, 2011, 39 (12): 2627-2630. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3182266408.
- [25] Parthasarathy S, Jubran A, Laghi F, et al. Sternomastoid, rib cage, and expiratory muscle activity during weaning failure [J]. *J Appl Physiol* (1985), 2007, 103 (1): 140-147. DOI: 10.1152/jappphysiol.00904.2006.
- [26] Laghi F, Cattapan SE, Jubran A, et al. Is weaning failure caused by low-frequency fatigue of the diaphragm? [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2003, 167 (2): 120-127. DOI: 10.1164/rccm.200210-1246OC.
- [27] Yan S, Lichros I, Zakyntinos S, et al. Effect of diaphragmatic fatigue on control of respiratory muscles and ventilation during CO₂ rebreathing [J]. *J Appl Physiol* (1985), 1993, 75 (3): 1364-1370. DOI: 10.1152/jappl.1993.75.3.1364.
- [28] Dres M, Dubé BP, Mayaux J, et al. Coexistence and impact of limb muscle and diaphragm weakness at time of liberation from mechanical ventilation in medical intensive care unit patients [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 195 (1): 57-66. DOI: 10.1164/rccm.201602-0367OC.
- [29] Llamas-Álvarez AM, Tenza-Lozano EM, Latour-Pérez J. Diaphragm and lung ultrasound to predict weaning outcome: systematic review and meta-analysis [J]. *Chest*, 2017, 152 (6): 1140-1150. DOI: 10.1016/j.chest.2017.08.028.
- [30] Jung B, Nougaret S, Conseil M, et al. Sepsis is associated with a preferential diaphragmatic atrophy: a critically ill patient study using tridimensional computed tomography [J]. *Anesthesiology*, 2014, 120 (5): 1182-1191. DOI: 10.1097/ALN.0000000000000201.
- [31] Maes K, Stamiris A, Thomas D, et al. Effects of controlled mechanical ventilation on sepsis-induced diaphragm dysfunction in rats [J]. *Crit Care Med*, 2014, 42 (12): e772-782. DOI: 10.1097/CCM.0000000000000685.
- [32] Testelmans D, Maes K, Wouters P, et al. Rocuronium exacerbates mechanical ventilation-induced diaphragm dysfunction in rats [J]. *Crit Care Med*, 2006, 34 (12): 3018-3023. DOI: 10.1097/01.CCM.0000245783.28478.AD.
- [33] Song Y, Demmer DL, Pinniger GJ, et al. Effect of maternal steroid on developing diaphragm integrity [J]. *PLoS One*, 2014, 9 (3): e93224. DOI: 10.1371/journal.pone.0093224.

(收稿日期: 2018-08-24)