

综述

有创机械通气患儿呼吸评估与治疗进展

薛洋¹ 徐培峰² 单玲¹ 郎丽刚¹ 综述 杜琳¹ 贾飞勇¹ 审校

(1. 吉林大学第一医院发育行为儿科, 吉林 长春 130021;
2. 浙江大学邵逸夫医院呼吸治疗科, 浙江 杭州 310016)

[摘要] 机械通气技术的广泛应用使得很多呼吸衰竭患儿得到成功救治。同时, 强制通气、肺部正常呼吸生理及呼吸力学的改变会导致呼吸功能减退以及气道廓清能力下降。因此, 如何根据儿童自身生理特点进行全面、精准的呼吸功能评估, 进行适宜的呼吸功能康复, 以尽快拔除气管插管, 缩短机械通气时间, 是目前儿童重症机械通气有效撤机的研究重点。该文就有创机械通气患儿呼吸功能评估与治疗方法进展进行综述。

[中国当代儿科杂志, 2019, 21(1): 94-99]

[关键词] 机械通气; 呼吸功能评估; 呼吸治疗; 儿童

Advances in respiratory assessment and treatment in children undergoing invasive mechanical ventilation

XUE Yang, XU Pei-Feng, SHAN Ling, LANG Li-Gang, DU Lin, JIA Fei-Yong. Department of Developmental and Behavioral Pediatrics, First Hospital of Jilin University, Changchun 130021, China (Jia F-Y, Email: erkekangfujia@163.com)

Abstract: The widespread use of mechanical ventilation technology has contributed to the successful treatment of many children with respiratory failure. At the same time, forced ventilation and changes in normal respiratory physiology and mechanics may lead to respiratory dysfunction and decreased airway clearance ability. Therefore, how to perform a comprehensive and accurate respiratory function assessment, conduct appropriate respiratory function rehabilitation, perform extubation as soon as possible, and shorten the duration of mechanical ventilation based on the children's own physiological characteristics, is a focus of the research on effective weaning from mechanical ventilation in children with severe conditions. This article reviews the advances in the respiratory function assessment and treatment methods in children undergoing invasive mechanical ventilation.

[Chin J Contemp Pediatr, 2019, 21(1): 94-99]

Key words: Mechanical ventilation; Respiratory function assessment; Respiratory therapy; Child

机械通气技术在儿科重症领域应用广泛, 据报道重症监护病房 (ICU) 中约 30% 患儿接受了有创机械通气支持^[1], 这使得很多呼吸衰竭患儿成功得到救治, 但与此同时, 强制通气以及肺部正常呼吸生理及力学的改变会引起呼吸机相关的并发症, 如呼吸机相关性肺炎、呼吸机相关性肺损伤、呼吸肌废用性萎缩、气道廓清能力下降等。因此, 如何对患儿进行全面、精准的呼吸功能评估, 针对性地进行呼吸功能康复, 以尽快拔除气管插管, 缩短机械通气时间, 是目前儿童重症机械通气有

效撤机的研究重点。

1 有创机械通气患儿早期呼吸功能的评估方法

1.1 膈肌功能评估

1.1.1 膈肌超声 膈肌是介于胸腔和腹腔之间的圆顶形扁薄阔肌, 为人体最为主要的呼吸肌, 为成人正常吸气提供 60%~80% 的通气动力^[2]; 而在儿童中由于辅助呼吸肌的发育不成熟, 膈肌在

[收稿日期] 2018-09-05; [接受日期] 2018-11-06

[作者简介] 薛洋, 男, 硕士, 医师。

[通信作者] 贾飞勇, 男, 教授。Email: erkekangfujia@163.com。

吸气时所提供的通气动力会更高；此外，儿童的膈肌所含I型肌纤维较成人少，膈肌耐力较差，易出现呼吸肌疲劳^[3]。在ICU机械通气时，因感染及营养问题均会导致膈肌收缩功能下降，与撤机困难及再次插管有密切的关系。有报道，在儿童中机械通气时间48 h内膈肌功能下降速度最快^[4]。而存在膈肌功能障碍的患者中约33%出现延迟撤机^[5]。Glau等^[6]研究发现，在急性呼吸衰竭行机械通气的患儿存在膈肌萎缩，且萎缩程度与呼吸机支持程度呈正相关。此外，膈肌功能障碍不仅与撤机成功与否息息相关，有研究显示，存在膈肌功能障碍的患者住院病死率也随之升高^[7]。随着重症超声的普及，通过超声来评估膈肌结构及功能是常用的方法。评估膈肌的指标主要有膈肌呼气末厚度、膈肌增厚分数(diaphragmatic thickening fraction, DTF)、膈肌活动度以及膈肌位移的方向，其中DTF更能反映膈肌功能。当膈肌呼气末厚度 $<2\text{ mm}$ 时考虑存在膈肌功能障碍^[8]。DTF计算方法为(吸气末厚度-呼气末厚度)/呼气末厚度 $\times 100\%$ ，当DTF $<20\%$ 时诊断为膈肌功能障碍^[9]。由于膈肌超声在儿童中应用时间较短，目前还没有统一的参考值，在台湾长庚纪念医院对PICU患儿行膈肌超声发现，当DTF $<17\%$ 提示膈肌功能障碍^[4]。在平静呼吸时膈肌活动度一般 $<10\text{ mm}$ 时可诊断为膈肌功能障碍^[10]，但控制性通气时呼吸机可在肺内产生驱动力，因此该指标不适用于控制性通气时的评估。膈肌位移方向有助于识别是否存在胸腹矛盾呼吸、有无膈肌麻痹，以及膈肌功能丧失。膈肌超声的主要缺点在于存在一定的主观性，与操作者熟练程度相关，但是此种评估手段具有较大的临床应用价值，适合在ICU中广泛开展。

1.1.2 膈肌电活动 近年来随着神经调节辅助通气(neurally adjusted ventilator assist, NAVA)技术的发展，为儿童尤其早产儿提供了新的通气策略^[11]。NAVA通过一个嵌入电极的胃管获得膈肌电活动(electrical activity of the diaphragm, EAdi)信号，信号通过处理传入装有NAVA模块的呼吸机上即可监测膈肌电活动^[12]。目前EAdi可对ICU患儿膈肌进行持续性监测，所监测到的信号不仅可以调节NAVA模式的支持强度，还可以为临床医生提供呼吸驱动力以及膈肌活动功能的评估^[13]。

EAdi信号对于膈肌功能的反应具有较好的特异性。陈正等^[14]研究发现，NAVA模式能改善触发同步性，降低气道峰压，并减少膈肌负荷和呼吸做功。因此通过EAdi信号的变化可以对呼吸机的参数设置进行及时的调整，较少呼吸机过度支持引发膈肌萎缩的发生，在配合NAVA模式下尤其适合于ICU的儿科患者。但EAdi信号易受食管、心脏等器官信号的干扰，因此电极位置十分重要。

1.1.3 膈肌张力-时间指数 膈肌张力-时间指数(tension-time index of the diaphragm, TTI_{di})是反映膈肌耐力的良好指标，对于呼吸肌而言评价耐力比力量更为重要。因而TTI_{di}被认为是决定能否成功拔管的决定性因素之一^[15]。将膈肌收缩产生的跨膈压(P_{di})的平均值和最大跨膈压(P_{dimax})的比值用来反映收缩强度，吸气时间(T_i)与呼吸周期总时间(T_{tot})的比值反映膈肌收缩持续的时间，两者的乘积即为TTI_{di}。用公式表示为： $TTI_{di} = (P_{di}/P_{dimax}) \times (T_i/T_{tot})$ 。吸气阻力负荷存在的情况下，当TTI_{di}值 <0.15 时不容易发生膈肌疲劳，而当TTI_{di}值 >0.15 时发生膈肌疲劳的时间将明显缩短^[16]。不同年龄段的儿童个体差异明显，膈肌力量受个体差异影响较大，因此通过TTI_{di}评价膈肌的耐力对于ICU的儿科患者更为适用，且具有较高的特异性及敏感性^[16]。

1.2 机械通气患儿撤机前呼吸功能评估指标

1.2.1 浅快呼吸指数 浅快呼吸指数(rapid shallow breathing index, RSBI)是自主呼吸试验时所测得的一项生理指标，主要用来预测撤机成功率。自主呼吸试验时测量呼吸频率(RR)与潮气量(VT)的比值 $[RR(\text{次}/\text{min})/VT(\text{L})]$ ，即可得到RSBI。成人RSBI <105 时拔管成功率较高，其敏感性为97%，特异性为64%^[17]。而在儿童中，由于不同年龄段的RR及VT有所差异，因此多采用RR(次/min)/VT(mL/kg)表示。Thiagarajan等^[18]研究显示，儿童RSBI <8 对于预测拔管成功率敏感性为83%，特异性为53%。Saikia等^[19]在预测儿童拔管成功的研究中显示，RSBI越高提示吸气肌肌力越弱，拔管的失败率越高，且自主呼吸试验前后RSBI的变异度对预测拔管成功率的价值更大。

1.2.2 最大吸气压力 最大吸气压力(maximal inspiratory pressure, MIP)是在对闭合气道进行强制吸气，进而从残气量开始做最大吸气努力期间产

生至少 1 s 的最大吸气负压。它反映患者吸气努力程度以及评价有无吸气肌萎缩。MIP 所产生的压力由所有吸气肌、肺及胸廓的弹性回缩力共同构成。MIP 的测量在 ICU 中具有安全、便捷的特点。MIP < -30 cm H₂O 预测拔管成功具有较高的敏感性 (86%~100%)，但特异性欠佳 (7%~69%)^[20]。对于一些年龄较小、认知较差的儿童也可行 MIP 检查，虽然其预测撤机成功的特异性较差，但可较好地反映患者的吸气肌功能，因此也可作为呼吸肌力量评估的一项指标。

1.2.3 咳嗽峰流速 咳嗽峰流速 (peak cough expiratory flow, PCEF) 可用来评估患者的呼吸肌力量及咳嗽反射，对于有创机械通气患者，一般 <60 L/min 提示咳痰能力减弱，具有较高撤机失败风险^[21]。多项研究证实 PCEF 是预测撤机成功与否的关键指标。Terzi 等^[22] 拔管前测得的 PCEF 与拔管后是否应用无创呼吸机、辅助咳嗽机及再插管密切相关，可作为预测拔管后呼吸衰竭的客观指标。Gobert 等^[23] 研究结果显示，PCEF 能够预测撤机成功与否，同时可以识别哪些是撤机失败的高风险患者，进而增加撤机成功率。PCEF 测量时常规需要接流速测量仪，也可以在患者咳嗽时观察流速时间曲线监测患者咳嗽的流速。PCEF 测量时常规需要患者配合，对于无法配合的患儿可使用非自主咳嗽测量方法。常规的做法是在气道内快速滴入 2 mL 生理盐水后观察患儿的咳嗽流速，>60 L/min 提示患儿有较好的咳嗽能力。

1.2.4 闭合压 P0.1 闭合压 P0.1 的测量是在机械通气过程中一次呼气后将吸气阀保持关闭，并测量初始 100 ms 期间患者吸气活动产生的气道压力的下降。呼吸机常规将吸气活动期间所测得的 PEEP-0.5 cm H₂O 的负压作为起始压力，标记为 P1，间隔 100 ms 后测定第二个压力值 P2，然后打开吸气阀，P2-P1 的差值即为 P0.1。该值是神经肌肉呼吸动力的直接测量值，用来评估中枢系统的呼吸驱动力。P0.1 的正常值为 3~4 cm H₂O，较高及较低的 P0.1 均对拔管失败有预测意义^[24]。有研究显示，当 P0.1 > 2.33 cm H₂O 时预测拔管失败的敏感性为 73%，特异性为 56%^[25]。对于 P0.1 < 0.5 cm H₂O 的患者，考虑是由于中枢系统存在呼吸驱动力不足而导致拔管失败。要获取较可靠的 P0.1 值需要进行 4 次测量然后取平均值^[24]。

1.2.5 电阻抗成像 电阻抗成像 (electrical impedance tomography, EIT) 是一种无创的、无放射性的新型成像模式，其成像原理主要是基于在机械通气过程中随着肺容量变化电导率也随之变化而形成。EIT 已被证明可用于气胸的检测、肺水肿的量化和不同通气模式之间通气分布的比较。与现有方法相比，可提供更好的滴定 PEEP 和设置呼吸机参数^[26]。最近的研究显示，EIT 对于预测撤机结局也具有一定的临床价值。Bickenbach 等^[27] 对 31 名行自主呼吸试验 (T 管或 PSV 模式) 的机械通气患者监测其 EIT，结果显示 EIT 可以监测自主呼吸试验期间的区域通气分布情况，并且能估计自主呼吸试验是否对一些延迟撤机患者有益，有助于延迟撤机患者的临床决策，增加撤机的成功率。台湾的一项观察性研究通过 EIT 发现，机械通气患者在行自主呼吸试验期间，低水平支持的患者肺内气体分布更均匀，撤机成功率更好^[28]。

2 有创机械通气患儿呼吸治疗方法

2.1 吸气肌训练

机械通气吸气肌训练 (inspiratory muscle training, IMT) 的主要目的是提高患儿吸气肌的力量及耐力，帮助缩短机械通气的时间、ICU 住院时间、提高自主排痰功能、改善氧合状况等。IMT 训练方法主要是：将呼吸机压力触发值调整为 MIP 的 20%~40%^[29] 或在呼吸机吸气端连接压力负荷装置，目前临床上更多采用压力负荷装置进行吸气肌训练^[30]。Vorona 等^[31] 的 Meta 分析纳入了 28 项关于吸气肌训练对 ICU 患者影响的研究，与对照组相比，行 IMT 的患者吸气肌及呼气肌力量明显增加，同时住院时间及机械通气时间均较对照组缩短。Martin 等^[32] 进行随机对照研究结果显示行 IMT 患者有 71% 成功脱机，明显优于对照组 (47%)。上述研究均证实 IMT 对于吸气肌的力量及耐力有显著提升，而与力量提升相比，呼吸肌的耐力在脱机后维持自主呼吸方面所发挥的作用更为重要。但目前的研究对于耐力评估及训练重视程度不够，这也是今后研究的重点。脱机后的 IMT 对于患儿的预后十分重要。最近的一项随机对照研究纳入了 70 名成功脱机 48 h 的患者 (机械通气 > 7 d)，研究结果显示，与对照组相比，IMT 组在生活质

量上有明显升高^[33]。澳大利亚关于IMT的临床实用指南当中推荐一个较高强度的IMT(每天5组,每组6次,每次的吸气负荷至少为MIP的50%)对患者的吸气肌肌力以及生活质量的提升是有益的^[34]。

目前的新型呼吸训练器Powerbreath[®]在一些ICU进行了应用,该类型的呼吸训练器可对患者的吸气肌功能进行评估,进而根据评估结果设定进阶式的IMT,实现个体化治疗,同时避免出现呼吸肌疲劳及训练负荷过低等情况。有研究者在ICU中对气管切开患者通过Powerbreath[®]行IMT,其结果提示与对照组相比,IMT组患者的吸气肌力量明显增强^[35]。但目前Powerbreath[®]在儿童ICU中的应用较少。

2.2 气道廓清技术

2.2.1 徒手肺膨胀 徒手肺膨胀(manual hyperinflation)技术促进痰液排出的原理是,通过呼吸气囊将大于患者自主呼吸1.5倍的潮气量缓慢挤压送入患者肺内,模拟深吸气,使肺膨胀,在吸气末短暂停2~3s后快速放松呼吸气囊,模拟咳嗽以达到排痰的目的。徒手肺膨胀技术对于痰液引流的有效性已得到国内外研究的证实。周君桂等^[36]研究结果显示,徒手肺膨胀联合胸廓震动挤压应用于重症病房气管切开患者能提高痰液清除效果及降低肺部感染发生。Goñi-Viguria等^[37]对ICU中患者的呼吸物理治疗进行系统回顾分析,结果发现徒手肺膨胀技术对于气道痰液的清除是非常有效的方法。

2.2.2 主动循环呼吸技术 主动循环呼吸技术(active cycle of breathing techniques, ACBT)可以有效清除气道分泌物,改善肺功能和气道阻塞,改善氧合功能。主要分为3个部分:呼吸控制(breath control, BC)、胸廓扩张运动(thoracic expansion exercises, TEE)和用力呼气技术(forced expiration technique, FET)。该技术起源于新西兰,其原理主要是通过深吸气对气道产生一个挤压力,呼气时,气管管壁会产生内在的振动,从而松动痰液,有利于痰液的清除。此外,由于痰液的黏稠度呈剪切力依赖关系,呼气产生的纵向剪切力可以降低痰液的黏稠度^[38]。Cabillic等^[39]对徒手气道廓清技术进行系统回顾分析发现,ACBT在气道廓清效果方面具有较高的循证级别(B级)。吴娇华等^[40]

研究发现,ACBT对机械通气撤机后患者自主咳痰能力的恢复同样具有较好的效果。ACBT在儿童气道廓清的效果在Hristara-Papadopoulou等^[38]的研究中也得到了肯定的答案。

2.2.3 呼气正压 与成人相比,儿童,尤其是婴幼儿的肺顺应性差,弹性阻力更高,功能残气量更低,在呼气末气道较易陷闭。新生儿,尤其是早产儿,气管软骨发育不完全,当发生肺部疾病导致肺顺应性变差及气道水肿后气道更易陷闭,引发肺不张及痰液引流不畅^[41]。呼气正压(positive expiratory pressure, PEP)可以有效改善呼气末气道塌陷,增加功能残气量,有助于痰液引流。PEP是一种新型辅助排痰装置,通过一个阻力器在呼气中段产生10~20 cm H₂O的压力以维持气道开放,或通过增加远端胸腔内压以提高功能残气量或侧支通气来促进分泌物排出^[42]。Lee等^[43]对9项气道廓清技术研究进行了回顾性分析发现,PEP与传统气道廓清技术相比同样具有良好的气道廓清效果。

2.2.4 震荡呼气正压 震荡呼气正压(oscillatory positive expiratory pressure, OPEP)治疗装置是在PEP基础上增加一种机械的方式产生震荡气流,以松解痰液,有助于痰液的排出。目前新型的OPEP装置有瑞士生产的烟斗状的Flutter[®]以及美国生产的Acapella[®]。相比与通过重力产生震荡作用的Flutter[®],Acapella[®]通过平衡磁阀产生震荡,不受体位限制,儿童配合度更好,其痰液清除作用效果明显,一项前瞻性研究结果显示,应用Acapella[®]联合IMT与单独IMT相比,痰液排除量明显增多^[44]。Walsh等^[41]对OPEP在哮喘患儿中进行应用,发现OPEP不仅可以有效清除痰液,还可改善肺功能。

2.3 早期活动

ICU中的患者在早期多数存在制动,导致骨骼肌萎缩。而骨骼肌萎缩与撤机困难及延迟是否存在直接联系还存在争议。有研究对ICU中患者行早期活动,发现患者的机械通气时间、ICU住院时间以及出院后生活质量明显优于对照组^[45]。Jolley等^[46]对美国呼吸衰竭患者的研究同样发现,早期活动在机械通气患者中是安全的,同时可一定程度改善临床预后。而Dres等^[47]在比较呼吸肌萎缩及四肢骨骼肌萎缩对撤机影响的研究中发现,

给予机械通气 >24 h 患者行自主呼吸试验, 结果显示四肢骨骼肌萎缩与撤机延迟并没有明确联系, 而与呼吸肌萎缩明显相关, 呼吸肌的萎缩会影响四肢骨骼肌的恢复。虽然 ICU 中患者早期活动对机械通气时间的影响还存在争议, 但不能否认的是适宜的早期活动有利于患者的心肺功能锻炼, 对于生活质量的提升具有积极作用。

2.4 自主呼吸试验

自主呼吸试验是撤机拔管前用来评估和锻炼患者呼吸肌功能的一种撤机策略。通常是用 T 管或将呼吸机模式调整为 PSV 模式 (PS 水平 5~10 cm H₂O), 持续 30~120 min。通过观察患者呼吸频率、心率及血气水平变化决定是否拔出气管插管, 进而增加撤机的成功率。美国胸科医师学会 (ACCP) / 美国胸科协会 (AST) 临床实践指南中推荐对于机械通气 >24 h 的患者, 撤机前应用自主呼吸试验评估^[48]。该试验能较为准确地反映自主呼吸能力, 为能否拔管提供参考。Liang 等^[49]对自主呼吸试验失败患者的临床资料进行分析, 发现失败组患者存在机械通气时间长、行自主呼吸试验前心率快、PCO₂ 高、生命体征变化幅度较大等特点, 这也是在给患者行自主呼吸试验过程中需要密切观察的地方。值得注意的一点是, 并非自主呼吸试验成功就一定要拔管, 失败就不一定拔管, 还需要结合患者综合情况制定最终的撤机策略。

3 总结与展望

目前对于机械通气患者呼吸评定与治疗的方法很多, 其目的主要在于使患儿成功撤机拔管, 并在拔除人工气道后及早恢复气道廓清及呼吸功能, 缩短机械通气及 ICU 住院时间。ICU 患儿的呼吸康复是一项综合工作, 需要 ICU 医生、康复科医生、呼吸治疗师、康复治疗师、护士等多学科之间协作与配合。目前存在的问题主要在各学科之间专业知识交流较少、看待问题片面等方面。ICU 患儿呼吸康复是一种新的康复理念, 需要我们对相关知识及技术的掌握更加全面, 要针对儿童自身的特点进行准确的评估及制定最佳的康复策略, 期待 ICU 儿童的呼吸康复发展能够更进一步。

[参 考 文 献]

- [1] Newth CJL, Khemani RG, Jouvet PA, et al. Mechanical ventilation and decision support in pediatric intensive care[J]. *Pediatr Clin North Am*, 2017, 64(5): 1057-1070.
- [2] DiMarco AF. Neural prostheses in the respiratory system[J]. *J Rehabil Res Dev*, 2001, 38(6): 601-607.
- [3] Pryor JA, Prasad SA. 成人和儿童呼吸与心脏问题的物理治疗 [M]. 喻鹏铭, 车国卫, 译. 第 4 版. 北京: 北京大学医学出版社, 2011: 4.
- [4] Lee EP, Hsia SH, Hsiao HF, et al. Evaluation of diaphragmatic function in mechanically ventilated children: an ultrasound study[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0183560.
- [5] Lu Z, Xu Q, Yuan Y, et al. Diaphragmatic dysfunction is characterized by increased duration of mechanical ventilation in subjects with prolonged weaning[J]. *Respir Care*, 2016, 61(10): 1316-1322.
- [6] Glau CL, Conlon TW, Himebauch AS, et al. Progressive diaphragm atrophy in pediatric acute respiratory failure[J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2018, 19(5): 406-411.
- [7] Schreiber A, Bertoni M, Goligher EC. Avoiding respiratory and peripheral muscle injury during mechanical ventilation: diaphragm-protective ventilation and early mobilization[J]. *Crit Care Clin*, 2018, 34(3): 357-381.
- [8] Harper CJ, Shahgholi L, Cieslak K, et al. Variability in diaphragm motion during normal breathing, assessed with B-mode ultrasound[J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2013, 43(12): 927-931.
- [9] Boon AJ, Sekiguchi H, Harper CJ, et al. Sensitivity and specificity of diagnostic ultrasound in the diagnosis of phrenic neuropathy[J]. *Neurology*, 2014, 83(14): 1264-1270.
- [10] Bousuges A, Gole Y, Blanc P. Diaphragmatic motion studied by m-mode ultrasonography: methods, reproducibility, and normal values[J]. *Chest*, 2009, 135(2): 391-400.
- [11] 陈正, 杜立中. 神经调节辅助通气技术在早产儿呼吸支持中的应用 [J]. *中国实用儿科杂志*, 2018, 33(5): 324-327.
- [12] Beck J, Reilly M, Grasselli G, et al. Characterization of neural breathing pattern in spontaneously breathing preterm infants[J]. *Pediatr Res*, 2011, 70(6): 607-613.
- [13] Emeriaud G, Larouche A, Ducharme-Crevier L, et al. Evolution of inspiratory diaphragm activity in children over the course of the PICU stay[J]. *Intensive Care Med*, 2014, 40(11): 1718-1726.
- [14] 陈正, 罗芳, 马晓路, 等. 神经调节辅助通气在早产儿呼吸窘迫综合征中的应用 [J]. *中国当代儿科杂志*, 2013, 15(9): 709-712.
- [15] Vassilakopoulos T, Zakyntinos S, Roussos C. The tension-time index and the frequency/tidal volume ratio are the major pathophysiologic determinants of weaning failure and success[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 1998, 158(2): 378-385.
- [16] Currie A, Patel DS, Rafferty GF, et al. Prediction of extubation outcome in infants using the tension time index[J]. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*, 2011, 96(4): F265-F269.
- [17] Magalhães PAF, Camillo CA, Langer D, et al. Weaning failure and respiratory muscle function: what has been done and what can be improved?[J]. *Respir Med*, 2018, 134: 54-61.
- [18] Thiagarajan RR, Bratton SL, Martin LD, et al. Predictors of

- successful extubation in children[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 1999, 160(5 Pt 1): 1562-1566.
- [19] Saikia B, Kumar N, Sreenivas V. Prediction of extubation failure in newborns, infants and children: brief report of a prospective (blinded) cohort study at a tertiary care paediatric centre in India[J]. *Springerplus*, 2015, 4: 827.
- [20] El-Khatib MF, Bou-Khalil P. Clinical review: liberation from mechanical ventilation[J]. *Crit Care*, 2008, 12(4): 221.
- [21] Jiang C, Esquinas A, Mina B. Evaluation of cough peak expiratory flow as a predictor of successful mechanical ventilation discontinuation: a narrative review of the literature[J]. *J Intensive Care*, 2017, 5: 33.
- [22] Terzi N, Lofaso F, Masson R, et al. Physiological predictors of respiratory and cough assistance needs after extubation[J]. *Ann Intensive Care*, 2018, 8(1): 18.
- [23] Gobert F, Yonis H, Taponnier R, et al. Predicting extubation outcome by cough peak flow measured using a built-in ventilator flow meter[J]. *Respir Care*, 2017, 62(12): 1505-1519.
- [24] Tasoulis A, Papazachou O, Dimopoulos S, et al. Effects of interval exercise training on respiratory drive in patients with chronic heart failure [J]. *Respir Med*, 2010, 104(10): 1557-1565.
- [25] De Souza LC, da Silva CT Jr, Almeida JR, et al. Comparison of maximal inspiratory pressure, tracheal airway occlusion pressure, and its ratio in the prediction of weaning outcome: impact of the use of a digital vacuumeter and the unidirectional valve[J]. *Respir Care*, 2012, 57(8): 1285-1290.
- [26] Walsh BK, Smallwood CD. Electrical impedance tomography during mechanical ventilation[J]. *Respir Care*, 2016, 61(10): 1417-1424.
- [27] Bickenbach J, Czaplak M, Polier M, et al. Electrical impedance tomography for predicting failure of spontaneous breathing trials in patients with prolonged weaning[J]. *Crit Care*, 2017, 21(1): 177.
- [28] Zhao Z, Peng SY, Chang MY, et al. Spontaneous breathing trials after prolonged mechanical ventilation monitored by electrical impedance tomography: an observational study[J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2017, 61(9): 1166-1175.
- [29] Elbouhy MS, Abdelhalim HA, Hashem AMA. Effect of respiratory muscles training in weaning of mechanically ventilated COPD patients[J]. *Egypt J Chest Dis Tuberc*, 2014, 63(3): 679-687.
- [30] Elkins M, Dentice R. Inspiratory muscle training facilitates weaning from mechanical ventilation among patients in the intensive care unit: a systematic review[J]. *J Physiother*, 2015, 61(3): 125-134.
- [31] Vorona S, Sabatini U, Al-Maqbali S, et al. Inspiratory muscle rehabilitation in critically ill adults: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Am Thorac Soc*, 2018, 15(6): 735-744.
- [32] Martin AD, Smith BK, Davenport PD, et al. Inspiratory muscle strength training improves weaning outcome in failure to wean patients: a randomized trial[J]. *Crit Care*, 2011, 15(2): R84.
- [33] Bissett BM, Leditschke IA, Neeman T, et al. Inspiratory muscle training to enhance recovery from mechanical ventilation: a randomised trial[J]. *Thorax*, 2016, 71(9): 812-819.
- [34] Bissett B, Leditschke IA, Green M, et al. Inspiratory muscle training for intensive care patients: a multidisciplinary practical guide for clinicians[J]. *Aust Crit Care*, 2018 Jul 11. pii: S1036-7314(17)30385-5. doi: 10.1016/j.aucc.2018.06.001.
- [35] Saad IAB, Tonella R, Santos Roceto L, et al. A new device for inspiratory muscle training in patients with tracheostomy tube in ICU: a randomized trial[J]. *Eur Respir J*, 2014, 44(Suppl 58): 4297.
- [36] 周君桂, 邓水娟, 吴红瑛, 等. 徒手膨肺联合胸廓震动挤压在重症康复病房气管切开患者中的应用 [J]. *中国康复医学杂志*, 2018, 33(2): 141-145.
- [37] Goñi-Viguria R, Yoldi-Arzo E, Casajús-Sola L, et al. Respiratory physiotherapy in intensive care unit: bibliographic review[J]. *Enferm Intensiva*, 2018, 29(4): 168-181.
- [38] Hristara-Papadopoulou A, Tsanakas J. Results of active cycle of breathing techniques and conventional physiotherapy in mucociliary clearance in children with cystic fibrosis[J]. *Hippokratia*, 2007, 11(4): 202-204.
- [39] Cabillie M, Gouilly P, Reyckler G. Manual airway clearance techniques in adults and adolescents: what level of evidence?[J]. *Rev Mal Respir*, 2018, 35(5): 495-520.
- [40] 吴娇华, 梁金清, 黄华琼. 主动呼吸循环技术对机械通气拔管患者自主咳痰能力恢复的效果评价 [J]. *内科*, 2014, 9(2): 155-157.
- [41] Walsh BK, Hood K, Merritt G. Pediatric airway maintenance and clearance in the acute care setting: how to stay out of trouble[J]. *Respir Care*, 2011, 56(9): 1424-1440.
- [42] Volsko TA. Airway clearance therapy: finding the evidence[J]. *Respir Care*, 2013, 58(10): 1669-1678.
- [43] Lee AL, Burge AT, Holland AE. Positive expiratory pressure therapy versus other airway clearance techniques for bronchiectasis[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2017, 9: CD011699.
- [44] Naraparaju S, Vaishali K, Venkatesan P, et al. A comparison of the acapella and a threshold inspiratory muscle trainer for sputum clearance in bronchiectasis—a pilot study[J]. *Physiother Theory Pract*, 2010, 26(6): 353-357.
- [45] TEAM Study Investigators, Hodgson C, Bellomo R, et al. Early mobilization and recovery in mechanically ventilated patients in the ICU: a bi-national, multi-centre, prospective cohort study[J]. *Crit Care*, 2015, 19: 81.
- [46] Jolley SE, Moss M, Needham DM, et al. Point prevalence study of mobilization practices for acute respiratory failure patients in the United States[J]. *Crit Care Med*, 2017, 45(2): 205-215.
- [47] 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.
- [48] Schmidt GA, Girard TD, Kress JP, et al. Liberation from mechanical ventilation in critically ill adults: executive summary of an Official American College of Chest Physicians /American Thoracic Society Clinical Practice Guideline[J]. *Chest*, 2017, 151(1): 160-165.
- [49] Liang G, Liu T, Zeng Y, et al. Characteristics of subjects who failed a 120-minute spontaneous breathing trial[J]. *Respir Care*, 2018, 63(4): 388-394.

(本文编辑: 邓芳明)