

床旁超声监测下腔静脉在重症患者容量管理中的应用进展

高学慧¹ 舒化青¹ 余愿¹ 杨小博¹ 尚游^{1,2}

¹ 华中科技大学同济医学院附属协和医院重症医学科, 湖北武汉 430022; ² 华中科技大学同济医学院附属协和医院麻醉与危重症研究所, 湖北武汉 430022

通信作者: 尚游, Email: you_shanghust@163.com

【摘要】 确定哪些患者有容量反应性是重症监护病房中常被问到的问题之一, 特别是在休克患者中。评估容量状态及容量反应性可帮助临床医护人员准确把握患者心脏前负荷功能, 指导合理的容量管理, 有助于改善患者的预后。为此, 学者们提出了许多无创和有创的方法来评估容量反应性。下腔静脉超声因其简单、无创及可重复性好, 目前已被广泛应用于指导重症患者的容量管理。本文就下腔静脉超声在重症患者容量管理中的临床应用进行综述, 以期对重症患者的循环管理提供参考。

【关键词】 床旁超声; 下腔静脉; 容量反应性; 液体复苏

基金项目: 国家自然科学基金 (81772047, 81971818)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20210401-00493

Application progress of point-of-care ultrasound monitoring inferior vena cava in volume management of critically ill patients

Gao Xuehui¹, Shu Huaqing¹, Yu Yuan¹, Yang Xiaobo¹, Shang You^{1,2}

¹Department of Critical Care Medicine, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430022, Hubei, China; ²Institute of Anesthesiology and Critical Care, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430022, Hubei, China

Corresponding author: Shang You, Email: you_shanghust@163.com

【Abstract】 Determining whether patients have volume-responsiveness is one of the frequently asked questions in the intensive care unit, especially in shock patients. Evaluating the volume status and volume responsiveness can help clinical medical staff accurately grasp the patient's cardiac preload, guide reasonable volume management, and help improve patient prognosis. Therefore, many non-invasive and invasive methods have been proposed to evaluate volume responsiveness. Inferior vena cava ultrasound has been widely used to guide the fluid management of critically ill patients due to its simplicity, non-invasiveness, and good repeatability. This article reviews the clinical applications of inferior vena cava ultrasound in fluid management of critically ill patients, so as to provide a reference for circulatory management of critically ill patients.

【Key words】 Ultrasound measurement; Inferior vena cava; Volume responsiveness; Fluid resuscitation

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81772047, 81971818)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20210401-00493

容量管理在危重患者的治疗中至关重要, 特别是对于那些急性循环衰竭的患者来说, 及时有效的液体复苏可增加心排量、改善组织灌注及器官功能障碍, 是血流动力学复苏的关键环节之一^[1]。不幸的是, 重症监护病房 (intensive care unit, ICU) 内只有约 50% 的患者在接受液体复苏后心排量增加^[2-4]。而过量的液体输注可能会造成液体外渗到组织间隙, 引起器官水肿和功能障碍^[5-6]。确定患者的容量状态及容量反应性是临床医学的一个重要领域, 也是一个具有挑战的领域。鉴于此, 有学者先后提出了许多静态和动态的“血流动力学参数”作为容量反应性的监测指标。

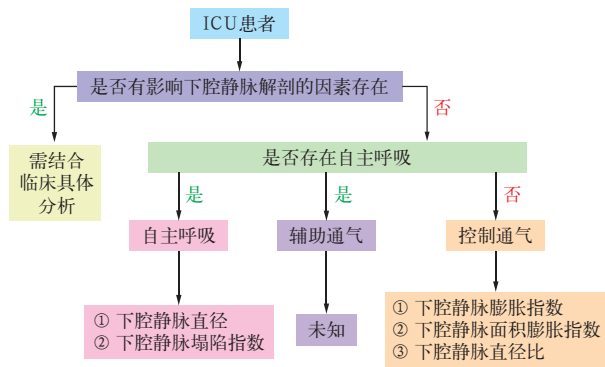
超声是一种被广泛使用的心脏及血流动力学评估工具, 因其无创性、低成本而备受关注^[7]。近年来随着便携式超声设备在临床中的普及, 各种超声测量参数被用作评估容量反应性的指标^[8-9]。现就下腔静脉超声在重症患者容量管理中的临床应用进行综述, 旨在为重症患者的循环管理提供参考。

1 下腔静脉超声作为血流动力学评估工具的优势

传统的血流动力学评估方法包括: 测量动脉压、中心静脉压 (central venous pressure, CVP), 置入 Swan-Ganz 导管 (可直接测量毛细血管楔形压力), 以及基于热稀释或动脉波形分析的脉搏指示连续心排量监测技术 (pulse indicator continuous cardiac output, PiCCO)、FloTrac/Vigileo 心排量监测系统, 但这些方法都是侵入性的, 且操作耗时、价格昂贵, 还可能会导致气胸、感染、血栓等风险的发生^[10]。而床旁即时超声可以作为临床医生在急危重患者的容量评估和管理中一种快速、实时的无创监测手段。而且大量调查已经证实, 经过适当的培训, 临床医生可以快速掌握床旁超声检查^[11-12]。

下腔静脉因在超声下容易探查且可以同时可以兼顾二维模式和 M 模式超声进行定量、定性测量, 避免了更为复杂、耗时的多普勒评估, 符合床边超声评估的多项候选标准。在

急危重患者的诊疗中,只要临床医生能够知晓其局限性,从有限但快速可用的检查中获取的信息可能会比更全面、更耗时的检查更有意义^[13]。下腔静脉超声的床边评估仅需要 3~10 min,训练有素的超声医师通常可以在 5 min 内完成^[14]。一项针对 21 项研究的系统评价结果表明,下腔静脉超声是一种评估血流动力学的有效方法,且简单、安全^[15]。下腔静脉超声用于血流动力学评估的流程见图 1。



注:ICU 为重症监护病房;下腔静脉塌陷指数=(呼气时下腔静脉直径-吸气时下腔静脉直径)/呼气时下腔静脉直径;下腔静脉膨胀指数=(吸气时下腔静脉直径-呼气时下腔静脉直径)/呼气时下腔静脉直径;下腔静脉面积膨胀指数=(吸气时下腔静脉面积-呼气时下腔静脉面积)/呼气时下腔静脉面积;下腔静脉直径比=长轴直径/短轴直径

图 1 下腔静脉超声评估血流动力学的流程

2 下腔静脉解剖及影响下腔静脉解剖的因素

下腔静脉是人体内最大的一条静脉干,在腹主动脉的右侧上升,经肝脏的腔静脉隐窝上行穿横膈的腔静脉孔进入胸腔,最后注入右心房。下腔静脉属于容量血管,管壁薄,顺应性大,容易受到血管内外多种因素的影响^[16]。影响下腔静脉解剖的因素见表 1。

表 1 影响下腔静脉解剖的因素

生理因素	临床情况	下腔静脉对应变化
呼吸机设置	高 PEEP	扩张
患者有自主吸气	辅助通气	扩张或塌陷
肺过度通气	哮喘、COPD 恶化	扩张
腹内压升高	腹膜炎、胰腺炎、肠梗阻等	扩张或塌陷
右房压及右心顺应性	右心功能不全、三尖瓣反流	扩张
	心包填塞	扩张
	肺动脉高压	扩张
局部因素	静脉回流受阻(狭窄、血栓)	扩张
	下腔静脉受压(肿物)	塌陷
	限制下腔静脉变化(ECMO 管路、下腔静脉滤器)	扩张或贴壁

注:PEEP 为呼气末正压,COPD 为慢性阻塞性肺疾病,ECMO 为体外膜肺氧合

首先,胸膜腔内压的改变会影响下腔静脉解剖的相应变化。胸膜腔内压升高主要会限制静脉回流,引起下腔静脉扩张;胸膜腔内压下降则加速静脉回流,使下腔静脉塌陷。原则上,任何引起胸膜腔内压改变的因素均会导致下腔静脉解

剖上的改变。机械通气患者吸气流量由呼吸机提供,正压通气会造成胸膜腔内压升高,阻碍静脉回流,导致下腔静脉扩张^[17]。自主呼吸或辅助通气时,患者的呼吸力度难以把握,用力呼吸使胸膜腔内压下降,而浅快呼吸则相反,下腔静脉变化难以预测。对于哮喘或慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)急性加重的患者,自发性呼气末正压(positive end-expiratory pressure, PEEP)的产生会引起肺过度膨胀,导致胸膜腔内压升高,下腔静脉扩张。另外,腹腔高压经膈肌传导同样可以引起胸膜腔内压升高,使下腔静脉扩张,但是升高的腹腔压力同时也会压迫下腔静脉。试验证据表明,无论患者容量状态如何,腹内压的增加一般都会使下腔静脉塌陷^[18]。

其次,下腔静脉作为血液汇入右心的最后一站,对于右心的容量及压力变化敏感。右心房压力升高,顺应性降低,静脉回流受限,下腔静脉扩张。一切可导致右心房压力及顺应性改变的因素均可引起下腔静脉解剖的改变。当患者发生右心功能不全、右心心肌梗死、重度三尖瓣反流或心包填塞时,会严重影响右心顺应性^[19-20]。另外,凡是影响右心后负荷,造成肺动脉高压的因素同样会连累右心,引起下腔静脉扩张。

最后,一些导致下腔静脉受限的局部机械因素也不容忽视,如下腔静脉血栓、肿瘤压迫、下腔静脉滤器、体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)置入的管路等。

3 下腔静脉超声图像获取

下腔静脉的超声图像获取途径包括经剑突下心脏声窗的长轴和短轴切面以及右侧经肝脏声窗的冠状位切面,而且均可在超声 B 模式和 M 模式下进行测量。下腔静脉的超声测量通常可以在不同平面进行,但是不同平面的结果可能会有很大差异^[21]。2015 年美国超声心动图学会和欧洲心血管影像协会的超声心动图定量测量指南建议,优先选择剑突下切面测量下腔静脉,在肝静脉与下腔静脉交界的远端直接测量或者在距下腔静脉与右心房窦口交界处约 1~2 cm 处测量^[22]。不过研究者指出,在肝静脉汇合处远端平面进行测量可能会低估下腔静脉塌陷程度^[23]。图像采集时,当从剑突下声窗探及下腔静脉长轴切面,务必要调节探头以避免“滚轴效应”,获得最真实的直径。此外,也可以经剑突下短轴切面同时获取切面长轴和短轴直径,进而得出直径比值;或者直接描记下腔静脉横截面面积^[24-25]。当剑突下切面受到干扰时,可以利用肝脏作为声窗经右侧腋中线获取下腔静脉的冠状位切面,不过在该切面测量时可能会低估下腔静脉塌陷程度^[23]。

下腔静脉超声图像的获取存在较强的主观性,并且还会受到伪影的影响,例如呼吸过程中血管相对于换能器的运动引起的伪影^[26]。Mesin 等^[27-28]提出了一种半自动的方法来跟踪超声扫描下腔静脉的运动,以补偿呼吸伪影。研究表明,与经典的测量方法相比,该方法提供了更精确的下腔静脉评估^[29]。下腔静脉直径及其呼吸变异性通常选择在患者仰卧

位测量,但是考虑到呼吸力学恶化、颅内压升高以及误吸等风险,重症患者多选择床头抬高的仰卧位。床头高度理论上会影响下腔静脉的测量,新近研究显示,床头抬高 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时基本不会对下腔静脉测量产生影响;床头抬高 45° 时会有 $6\% \sim 8\%$ 的直径测量偏差,但呼吸变异性不受影响^[30]。因此,在进行下腔静脉超声图像采集时,允许选取最合适的体位,这不仅仅是对于患者,同样包括操作者。

4 下腔静脉超声的临床应用

自主呼吸时,吸气时胸腔容积的增加降低了胸膜腔内压,加速静脉回流,导致回心血量相对增加,使下腔静脉有塌陷的趋势。机械通气时,吸气会导致胸膜腔内压升高,阻碍静脉回流,导致下腔静脉直径扩张。下腔静脉的塌陷或扩张与右心房压力密切相关,有很多潜在的临床应用价值。

4.1 自主呼吸患者下腔静脉超声的应用:平静自主呼吸状态下的下腔静脉直径呼吸变异性与CVP有很好的相关性,且CVP越高,相关性越好^[31]。其中下腔静脉直径呼吸变异指数越高表示CVP越低,呼吸变异指数越低表示CVP越高^[32-35]。2015年美国超声心动图学会和欧洲心血管影像协会指南对下腔静脉直径及塌陷指数与CVP的关系进行了详细的描述^[22],见表2。

表2 下腔静脉直径及塌陷指数与中心静脉压的关系^[22]

下腔静脉直径和塌陷指数	中心静脉压 (mmHg)
下腔静脉直径 ≤ 21 mm 且下腔静脉塌陷指数 $> 50\%$	3 (0 ~ 5)
下腔静脉直径 < 21 mm 且下腔静脉塌陷指数 $< 50\%$	8 (5 ~ 10)
下腔静脉直径 > 21 mm 且下腔静脉塌陷指数 $> 50\%$	8 (5 ~ 10)
下腔静脉直径 > 21 mm 且下腔静脉塌陷指数 $> 50\%$	15 (10 ~ 20)

注:下腔静脉塌陷指数=呼气时下腔静脉直径-吸气时下腔静脉直径/呼气时下腔静脉直径;1 mmHg=0.133 kPa

ICU内血流动力学不稳定的患者通常存在容量不足的问题,需要及时液体复苏。但每位患者对液体复苏的反应性几乎是不可预测的,难以把握。利用床旁超声监测下腔静脉随呼吸的变化可以较好地预估容量反应性,是指导休克患者液体疗法的可靠指标^[36]。其中最常使用和广泛接受的超声测量下腔静脉指标包括下腔静脉塌陷指数、下腔静脉扩张指数及下腔静脉呼吸变异率^[12, 14, 37]。下腔静脉塌陷指数适用于自主呼吸患者的容量评估,而后两者适用于机械通气患者的容量评估。不过对于自主呼吸的患者来说,吸气力度难以把握,胸膜腔内压波动和潮气量幅度变化不可预测,血管直径变化的不可预测性致使超声测量结果不再可靠。在自主呼吸的患者中,只有下腔静脉直径的呼吸变化幅度非常大才能表明有容量反应性^[38-40],而且敏感度和准确性不高^[39-40],不推荐使用。

4.2 机械通气患者下腔静脉超声的应用:下腔静脉塌陷指数对于自主呼吸患者容量反应性的预测能力有限,但是膨胀指数是机械通气患者容量反应性的良好预测指标^[41-42]。早在2004年,Barbier等^[32]就证实了下腔静脉膨胀指数 $> 18\%$ 对于深度镇静的机械通气患者的容量反应性有较好的预测,

敏感度和特异度均为90%,曲线下面积(area under the curve, AUC)达到0.91。2010年Moretti和Pizzi^[43]证明了下腔静脉膨胀指数 $> 16\%$ 可准确预测蛛网膜下腔出血患者的容量反应性,特异度更是高达100%。不过最近也有研究者得出不同的结论,认为下腔静脉膨胀指数在休克患者评估中未能显示出较高的预测价值^[44-45]。Charbonneau等^[46]发现,下腔静脉直径呼吸变异性预测容量反应性的敏感度(38%)和特异度(61%)均较低,且AUC仅为0.43,这可能与该试验实施过程中PEEP水平相比前面的研究稍高有关。目前以下腔静脉变化评估容量反应性的临界值尚不明确,当前的研究样本量均不大,需要进一步研究明确。不过在评估大小极限(膨胀或塌陷)的情况下,可使用不依赖呼吸变化的下腔静脉直径绝对值实现容量反应性的直观评估。此外,下腔静脉椭圆形的横截面可能对测量结果也有影响,超声探头角度的微小变化可能就会导致测量结果的较大差异,而且经矢状面测量的下腔静脉直径较短,受呼吸周期影响更大^[47]。鉴于此,直接描记下腔静脉横截面积,监测其呼吸变异指数似乎是一个较好的选择。有研究者指出,相比纵轴切面的直径呼吸变异指数,剑突下横切面的下腔静脉面积膨胀指数及长、短轴直径比值(横切面长轴/短轴)有着更高的敏感度和特异度,对于休克患者容量反应性的预估具有更高的参考价值^[24]。

下腔静脉超声预估容量反应性对控制通气状态下的患者最为可靠,但是临床实际情况并不适用。尽管ICU内很多患者都会进行机械通气,但是只有少量需要深度镇静的患者才会维持控制通气状态,多数患者是保留自主呼吸的,而接受机械通气的患者在自主呼吸的同时经历着正压通气的生理变化。2007年Lambert等^[48]通过对健康猪进行机械通气得出结论,仅增加PEEP水平就可以形成一个心肺动态环境,从而影响容量变化以及下腔静脉的动态指标。目前,尚无研究证实下腔静脉超声用于辅助通气患者容量反应性评估的标准及准确性。下腔静脉超声关于容量反应性研究的特征见表3。

5 治疗

ICU内血流动力学不稳定的患者通常容量不足,液体复苏的目标是保持足够的组织灌注,同时需要避免明显的间质性水肿的发生。文献报道,约50%的急性循环衰竭患者经过液体复苏反而会会引起负面结果^[51]。Kelm等^[52]指出,在感染性休克患者中,早期目标导向治疗方案液体复苏所导致的液体过负荷发生比例可高达50%。因此,结合下腔静脉超声动态评估的滴定式液体复苏方式更可取。当探及细小的下腔静脉或呼吸变异明显时,应考虑进行液体复苏。需要注意的是,当监测的下腔静脉超声参数处于正常参考值上、下限附近时,我们需要谨慎判断,也可以结合其他检查进一步做出临床治疗决策,如心脏超声及肺部超声检查^[53-54]。当超声监测探及宽大固定的下腔静脉时,则提示达到补液的终点,需及时终止补液,甚至可以进行脱水治疗。

6 结论

目前临床上监测容量的手段有很多,每种形式的监测方

表 3 下腔静脉超声关于容量反应性研究的特征

文献	患者类型	参考指标	参考值	敏感度 (%)	特异度 (%)
Feissel 等 ^[12]	控制通气	呼吸变异率	>12%		
Shah 等 ^[23]	自主呼吸	下腔静脉塌陷指数 (右腋中线冠状切面)	>42%	61.5	67.1
Yao 等 ^[24]	控制通气	下腔静脉面积膨胀指数	>10.2%	97.3	40.0
Barbier 等 ^[32]	控制通气	下腔静脉膨胀指数	>18%	90.0	91.0
Airapetian 等 ^[38]	自主呼吸	下腔静脉塌陷指数	>42%	31.0	97.0
Muller 等 ^[39]	自主呼吸	下腔静脉塌陷指数	>40%	70.0	80.0
Bortolotti 等 ^[40]	自主呼吸	下腔静脉塌陷指数	>39%	93.0	88.0
		下腔静脉直径	<11 mm	83.0	88.0
Moretti 等 ^[43]	控制通气	下腔静脉膨胀指数	>16%	70.6	100.0
Charbonneau 等 ^[46]	控制通气	下腔静脉膨胀指数	>21%	38.0	61.0
张灵羿等 ^[49]	自主呼吸	呼吸变异率	>9.85%	100.0	25.0
王震等 ^[50]	控制通气	呼吸变异率			

注:下腔静脉塌陷指数=(呼气时下腔静脉直径-吸气时下腔静脉直径)/呼气时下腔静脉直径;下腔静脉膨胀指数=(吸气时下腔静脉直径-呼气时下腔静脉直径)/呼气时下腔静脉直径;下腔静脉面积膨胀指数=(吸气时下腔静脉面积-呼气时下腔静脉面积)/呼气时下腔静脉面积;下腔静脉直径比=长轴直径/短轴直径;空白代表无此项

法都有其各自的风险和获益。下腔静脉超声测量为临床医生在危重症患者的容量评估和管理中提供了一种快速、可重复的无创辅助手段。低血容量患者下腔静脉塌陷且呼吸变异性明显,而宽大、固定的下腔静脉通常提示患者容量过负荷。但是,对于下腔静脉图像的解读必须结合重症思维,放在临床的背景下综合患者的具体情况进行整体分析,不应该绝对化。现阶段,我们仍需进行大量的研究以完善下腔静脉超声在临床应用中的不足,发掘更多潜在的指标帮助指导临床治疗。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Murphy CV, Schramm GE, Doherty JA, et al. The importance of fluid management in acute lung injury secondary to septic shock [J]. Chest, 2009, 136 (1): 102-109. DOI: 10.1378/chest.08-2706.

[2] Monnet X, Bataille A, Magalhaes E, et al. End-tidal carbon dioxide is better than arterial pressure for predicting volume responsiveness by the passive leg raising test [J]. Intensive Care Med, 2013, 39 (1): 93-100. DOI: 10.1007/s00134-012-2693-y.

[3] Boyd JH, Forbes J, Nakada TA, et al. Fluid resuscitation in septic shock: a positive fluid balance and elevated central venous pressure are associated with increased mortality [J]. Crit Care Med, 2011, 39 (2): 259-265. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3181feeb15.

[4] Marik PE, Monnet X, Teboul JL. Hemodynamic parameters to guide fluid therapy [J]. Ann Intensive Care, 2011, 1 (1): 1. DOI: 10.1186/2110-5820-1-1.

[5] Cordemans C, De Laet I, Van Regenmortel N, et al. Fluid management in critically ill patients: the role of extravascular lung water, abdominal hypertension, capillary leak, and fluid balance [J]. Ann Intensive Care, 2012, 2 (Suppl 1): S1. DOI: 10.1186/2110-5820-2-S1-S1.

[6] 杨晓玲, 原娇娇, 袁琪茜, 等. 脓毒症液体过负荷与急性肾损伤 [J]. 中国中西医结合急救杂志, 2021, 28 (1): 119-121. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2020.01.030.

Yang XL, Yuan JJ, Yuan QQ, et al. Fluid overload in sepsis and acute kidney injury [J]. Chin J TCM WM Crit Care, 2021, 28 (1): 119-121. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9691.2020.01.030.

[7] Expert Round Table on Echocardiography in ICU. International consensus statement on training standards for advanced critical care echocardiography [J]. Intensive Care Med, 2014, 40 (5): 654-666. DOI: 10.1007/s00134-014-3228-5.

[8] 朱炜华, 万林骏, 万晓红, 等. 肱动脉流速变异度和下腔静脉呼吸变异度对容量反应性的评估作用 [J]. 中华危重病急救医学, 2016, 28 (8): 713-717. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2016.08.009.

Zhu WH, Wan LJ, Wan XH, et al. Measurement of brachial artery velocity variation and inferior vena cava variability to estimate fluid

responsiveness [J]. Chin Crit Care Med, 2016, 28 (8): 713-717. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2016.08.009.

[9] 胡翔宇, 李力, 郝晓晔, 等. 被动抬腿试验联合超声心动图评价感染性休克患者的容量反应性 [J]. 中华危重病急救医学, 2019, 31 (5): 619-622. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2019.05.019.

Hu XY, Li L, Hao XY, et al. Passive leg raising combined with echocardiography could evaluate volume responsiveness in patients with septic shock [J]. Chin Crit Care Med, 2019, 31 (5): 619-622. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2019.05.019.

[10] Mansfield PF, Hohn DC, Fornage BD, et al. Complications and failures of subclavian-vein catheterization [J]. N Engl J Med, 1994, 331 (26): 1735-1738. DOI: 10.1056/NEJM199412293312602.

[11] Fedson S, Neithardt G, Thomas P, et al. Unsuspected clinically important findings detected with a small portable ultrasound device in patients admitted to a general medicine service [J]. J Am Soc Echocardiogr, 2003, 16 (9): 901-905. DOI: 10.1016/S0894-7317(03)00426-7.

[12] Feissel M, Michard F, Faller JP, et al. The respiratory variation in inferior vena cava diameter as a guide to fluid therapy [J]. Intensive Care Med, 2004, 30 (9): 1834-1837. DOI: 10.1007/s00134-004-2233-5.

[13] Goodkin GM, Spevack DM, Tunick PA, et al. How useful is hand-carried bedside echocardiography in critically ill patients? [J]. J Am Coll Cardiol, 2001, 37 (8): 2019-2022. DOI: 10.1016/s0735-1097(01)01293-1.

[14] Stawicki SP, Braslow BM, Panebianco NL, et al. Intensivist use of hand-carried ultrasonography to measure IVC collapsibility in estimating intravascular volume status: correlations with CVP [J]. J Am Coll Surg, 2009, 209 (1): 55-61. DOI: 10.1016/j.jamcollsurg.2009.02.062.

[15] Ciozda W, Kedan I, Kehl DW, et al. The efficacy of sonographic measurement of inferior vena cava diameter as an estimate of central venous pressure [J]. Cardiovasc Ultrasound, 2016, 14 (1): 33. DOI: 10.1186/s12947-016-0076-1.

[16] Via G, Tavazzi G, Price S. Ten situations where inferior vena cava ultrasound may fail to accurately predict fluid responsiveness: a physiologically based point of view [J]. Intensive Care Med, 2016, 42 (7): 1164-1167. DOI: 10.1007/s00134-016-4357-9.

[17] Si X, Xu HL, Liu ZM, et al. Does respiratory variation in inferior vena cava diameter predict fluid responsiveness in mechanically ventilated patients? A systematic review and Meta-analysis [J]. Anesth Analg, 2018, 127 (5): 1157-1164. DOI: 10.1213/ANE.0000000000003459.

[18] Cavaliere F, Cina A, Biasucci D, et al. Sonographic assessment of abdominal vein dimensional and hemodynamic changes induced in human volunteers by a model of abdominal hypertension [J]. Crit Care Med, 2011, 39 (2): 344-348. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3181ffe0d2.

[19] Mandelbaum A, Ritz E. Vena cava diameter measurement for estimation of dry weight in haemodialysis patients [J]. Nephrol Dial Transplant, 1996, 11 Suppl 2: 24-27. DOI: 10.1093/ndt/11.supp2.24.

[20] Goldstein JA. Pathophysiology and management of right heart

- ischemia [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2002, 40 (5): 841-853. DOI: 10.1016/s0735-1097(02)02048-x.
- [21] Wallace DJ, Allison M, Stone MB. Inferior vena cava percentage collapse during respiration is affected by the sampling location: an ultrasound study in healthy volunteers [J]. *Acad Emerg Med*, 2010, 17 (1): 96-99. DOI: 10.1111/j.1553-2712.2009.00627.x.
- [22] Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2015, 28 (1): 1-39. e14. DOI: 10.1016/j.echo.2014.10.003.
- [23] Shah R, Spiegel R, Lu C, et al. Relationship between the subcostal and right lateral ultrasound views of inferior vena cava collapse: implications for clinical use of ultrasonography [J]. *Chest*, 2018, 153 (4): 939-945. DOI: 10.1016/j.chest.2017.10.002.
- [24] Yao B, Liu JY, Sun YB, et al. The value of the inferior vena cava area distensibility index and its diameter ratio for predicting fluid responsiveness in mechanically ventilated patients [J]. *Shock*, 2019, 52 (1): 37-42. DOI: 10.1097/SHK.0000000000001238.
- [25] 黄昌云, 韩晓雨, 方攀攀, 等. 超声测量下腔静脉内径快速评估老年患者术前血容量的价值 [J]. *临床麻醉学杂志*, 2018, 34 (12): 1157-1160. DOI: 10.12089/jca.2018.12.003.
- Huang CY, Han XY, Fang PP, et al. Usefulness of ultrasonographic measurement of the diameter of the inferior vena cava to predict preoperative blood volume in elderly patients [J]. *J Clin Anesthesiol*, 2018, 34 (12): 1157-1160. DOI: 10.12089/jca.2018.12.003.
- [26] Blehar DJ, Resop D, Chin B, et al. Inferior vena cava displacement during respirophasic ultrasound imaging [J]. *Crit Ultrasound J*, 2012, 4 (1): 18. DOI: 10.1186/2036-7902-4-18.
- [27] Mesin L, Pasquero P, Albani S, et al. Semi-automated tracking and continuous monitoring of inferior vena cava diameter in simulated and experimental ultrasound imaging [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2015, 41 (3): 845-857. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2014.09.031.
- [28] Mesin L, Pasquero P, Roatta S. Tracking and monitoring pulsatility of a portion of inferior vena cava from ultrasound imaging in long axis [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2019, 45 (5): 1338-1343. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2018.10.024.
- [29] Albani S, Pinamonti B, Giovannazzo T, et al. Accuracy of right atrial pressure estimation using a multi-parameter approach derived from inferior vena cava semi-automated edge-tracking echocardiography: a pilot study in patients with cardiovascular disorders [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36 (7): 1213-1225. DOI: 10.1007/s10554-020-01814-8.
- [30] Bondarsky E, Rothman A, Ramesh N, et al. Influence of head-of-bed elevation on the measurement of inferior vena cava diameter and collapsibility [J]. *J Clin Ultrasound*, 2020, 48 (5): 249-253. DOI: 10.1002/jcu.22817.
- [31] Lee SL, Daimon M, Kawata T, et al. Estimation of right atrial pressure on inferior vena cava ultrasound in Asian patients [J]. *Circ J*, 2014, 78 (4): 962-966. DOI: 10.1253/circj.cj-13-1234.
- [32] Barbier C, Loubières Y, Schmit C, et al. Respiratory changes in inferior vena cava diameter are helpful in predicting fluid responsiveness in ventilated septic patients [J]. *Intensive Care Med*, 2004, 30 (9): 1740-1746. DOI: 10.1007/s00134-004-2259-8.
- [33] Beigel R, Cercek B, Luo H, et al. Noninvasive evaluation of right atrial pressure [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2013, 26 (9): 1033-1042. DOI: 10.1016/j.echo.2013.06.004.
- [34] Tsutsui RS, Borowski A, Tang WH, et al. Precision of echocardiographic estimates of right atrial pressure in patients with acute decompensated heart failure [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014, 27 (10): 1072-1078. e2. DOI: 10.1016/j.echo.2014.06.002.
- [35] Eskesen TG, Wetterslev M, Perner A. Systematic review including re-analyses of 1 148 individual data sets of central venous pressure as a predictor of fluid responsiveness [J]. *Intensive Care Med*, 2016, 42 (3): 324-332. DOI: 10.1007/s00134-015-4168-4.
- [36] Toupin F, Denault A, Lamarche Y, et al. Hemodynamic instability and fluid responsiveness [J]. *Can J Anaesth*, 2013, 60 (12): 1240-1247. DOI: 10.1007/s12630-013-0036-2.
- [37] Zhang ZH, Xu X, Ye S, et al. Ultrasonographic measurement of the respiratory variation in the inferior vena cava diameter is predictive of fluid responsiveness in critically ill patients: systematic review and meta-analysis [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2014, 40 (5): 845-853. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2013.12.010.
- [38] Airapetian N, Maizel J, Alyamani O, et al. Does inferior vena cava respiratory variability predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients? [J]. *Crit Care*, 2015, 19: 400. DOI: 10.1186/s13054-015-1100-9.
- [39] Muller L, Bobbia X, Toumi M, et al. Respiratory variations of inferior vena cava diameter to predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients with acute circulatory failure: need for a cautious use [J]. *Crit Care*, 2012, 16 (5): R188. DOI: 10.1186/cc11672.
- [40] Bortolotti P, Colling D, Colas V, et al. Respiratory changes of the inferior vena cava diameter predict fluid responsiveness in spontaneously breathing patients with cardiac arrhythmias [J]. *Ann Intensive Care*, 2018, 8 (1): 79. DOI: 10.1186/s13613-018-0427-1.
- [41] Long E, Oakley E, Duke T, et al. Does respiratory variation in inferior vena cava diameter predict fluid responsiveness: a systematic review and meta-analysis [J]. *Shock*, 2017, 47 (5): 550-559. DOI: 10.1097/SHK.0000000000000801.
- [42] 姚喜庆, 李吉光, 任盼盼, 等. 床旁超声测量下腔静脉呼吸变异指数对脓毒症休克患者容量反应性的评估 [J]. *影像科学与光化学*, 2020, 38 (5): 811-814. DOI: 10.7517/issn.1674-0475.200208.
- Yao XQ, Li JG, Ren PP, et al. POCUS measured of respiratory variability index in evaluation of the volume responsiveness in mechanical ventilation patients with septic shock [J]. *Imaging Sci Photochem*, 2020, 38 (5): 811-814. DOI: 10.7517/issn.1674-0475.200208.
- [43] Moretti R, Pizzi B. Inferior vena cava distensibility as a predictor of fluid responsiveness in patients with subarachnoid hemorrhage [J]. *Neurocrit Care*, 2010, 13 (1): 3-9. DOI: 10.1007/s12028-010-9356-z.
- [44] Lu NF, Xi XM, Jiang L, et al. Exploring the best predictors of fluid responsiveness in patients with septic shock [J]. *Am J Emerg Med*, 2017, 35 (9): 1258-1261. DOI: 10.1016/j.ajem.2017.03.052.
- [45] Huan C, Lu C, Song B, et al. The shape change index (SCI) of inferior vena cava (IVC) measuring by transabdominal ultrasound to predict the presence of septic shock in intensive care unit (ICU) patients [J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2019, 23 (6): 2505-2512. DOI: 10.26355/eurrev_201903_17398.
- [46] Charbonneau H, Riu B, Faron M, et al. Predicting preload responsiveness using simultaneous recordings of inferior and superior vena cavae diameters [J]. *Crit Care*, 2014, 18 (5): 473. DOI: 10.1186/s13054-014-0473-5.
- [47] Biasucci DG, Cina A, Calabrese M, et al. Size and shape of the inferior vena cava before and after a fluid challenge: a pilot study [J]. *Minerva Anesthesiol*, 2019, 85 (5): 514-521. DOI: 10.23736/S0375-9393.18.13041-0.
- [48] Lambert P, Sloth E, Smith B, et al. Does a positive end-expiratory pressure-induced reduction in stroke volume indicate preload responsiveness? An experimental study [J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2007, 51 (4): 415-425. DOI: 10.1111/j.1399-6576.2007.01248.x.
- [49] 张灵羿, 张涛, 黄文起. 下腔静脉变异率、脉搏灌注指数不能预测剖宫产腰麻后低血压 [J]. *麻醉安全与质控*, 2018, 2 (4): 189-192. DOI: 10.3969/j.issn.2096-2681.2018.04.002.
- Zhang LY, Zhang T, Huang WQ. Neither variation in inferior vena cava nor pulse perfusion index can predict hypotension after spinal anesthesia before cesarean sections [J]. *Perioper Safety Qual Assur*, 2018, 2 (4): 189-192. DOI: 10.3969/j.issn.2096-2681.2018.04.002.
- [50] 王震, 史金英, 宋宁, 等. 下腔静脉呼吸变异率在脓毒症休克中的应用价值 [J]. *临床肺科杂志*, 2019, 24 (8): 1507-1509, 1517. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6663.2019.08.036.
- Wang Z, Shi JY, Song N, et al. Application value of inferior vena cava respiratory variation rate in septic shock [J]. *J Clin Pulmonol Med*, 2019, 24 (8): 1507-1509, 1517. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6663.2019.08.036.
- [51] Michard F, Teboul JL. Predicting fluid responsiveness in ICU patients: a critical analysis of the evidence [J]. *Chest*, 2002, 121 (6): 2000-2008. DOI: 10.1378/chest.121.6.2000.
- [52] Kelm DJ, Perrin JT, Cartin-Ceba R, et al. Fluid overload in patients with severe sepsis and septic shock treated with early goal-directed therapy is associated with increased acute need for fluid-related medical interventions and hospital death [J]. *Shock*, 2015, 43 (1): 68-73. DOI: 10.1097/SHK.0000000000000268.
- [53] Bughrara N, Diaz-Gomez JL, Pustavoitau A. Perioperative management of patients with sepsis and septic shock, Part II: ultrasound support for resuscitation [J]. *Anesthesiol Clin*, 2020, 38 (1): 123-134. DOI: 10.1016/j.anclin.2019.11.001.
- [54] 庄燕, 戴林峰, 程璐, 等. 床旁超声下腔静脉直径联合肺部超声 B 线积分指导脓毒症休克患者液体复苏的临床研究 [J]. *中华危重病急救医学*, 2020, 32 (11): 1356-1360. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20200611-00463.
- Zhuang Y, Dai LF, Cheng L, et al. Inferior vena cava diameter combined with lung ultrasound B-line score to guide fluid resuscitation in patients with septic shock [J]. *Chin Crit Care Med*, 2020, 32 (11): 1356-1360. DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20200611-00463.