

功能性血流动力学监测的研究进展

周小洋 李莉 严静

在血流动力学监测领域中,功能性血流动力学监测(functional hemodynamic monitoring)是一种全新的概念,它是对某一疾病状态下血流动力学指标变化的动态监测,需结合血流动力学监测的各项指标和患者的生理病理状态,评估机体现有的和储备的血流动力学情况,从而指导临床治疗。近些年,已有诸多临床研究证实了这一监测手段在预测容量反应性、评估血管张力和诊断潜在的心血管功能不全方面的可靠性,并较之传统静态血流动力学指标更具精确性和早期性,现就这三方面内容进行综述。

1 预测容量反应性

1.1 心肺交互作用:心肺交互作用是功能性血流动力学监测预测患者容量反应性的基本原理。对于机械通气患者而言,在正压通气的吸气相,胸腔内压力增高导致右房压力被动性升高,引起静脉回心血量减少,致使右室心排血量(CO)下降。大约2~3个呼吸周期后,右室CO的减少会引起左心回心血量下降,最终导致左室CO降低^[1]。基于心肺交互作用原理的功能性血流动力学指标监测具有动态评估传统静态参数变化率的特点,这些指标主要包括动脉收缩压变异度(SPV)、每搏量变异度(SVV)、脉压变异度(PPV)、上/下腔静脉直径呼吸变异度(Δ DSVC/ Δ DIVC)、主动脉峰值血流速变异度(Δ Vpeak)等,现将这些指标予以进一步介绍。

1.1.1 SPV、PPV、SVV:当前,循环休克患者在液体复苏过程中存在的一个主要问题是,患者在进行静脉内液体输注后能否反应性增加CO,即容量反应性,在液体复苏前对其进行评估显得尤为重要,因为对于非液体依赖性患者来说,进行不合理的液体输注会为其带来发生肺水肿等不良事件的风险。而目前,诸如中心静脉压(CVP)、CO、肺动脉楔压(PAWP)等传统静态指标在评估容量反应性方面并不十分理想,因此学者们开始对一些更能全面地、动态地评估循环容量的指标展开了研究。早在20世纪末就有研究证明SPV是预测容量反应性的良好指标。但由于SPV既受主动脉跨壁压变化的影响,又与主动脉壁外压的变化相关^[2],而PPV只受主动脉跨壁压的影响^[3],因此,Michard等^[1]猜想是否PPV预测容量反应性更优于SPV,随后对此展开了一项研究。该研究纳入了40例进行机械通气的急性循环衰竭的脓毒症患者,结果表明PPV是一种能准确预测患者容量反应

性的指标,且更优于SPV,以PPV=13%为截断值预测患者容量反应性的敏感度为94%,特异度为96%。Marik等^[4]的系统评价也表明,PPV在预测容量反应性方面更优于SPV和SVV。目前,诸多研究已证实,对于潮气量 ≥ 8 mL/kg的机械通气患者,SVV $\geq 10\%$ 或PPV $\geq 13\% \sim 15\%$ 可以高度预测容量反应性^[5-7];但张宏民等^[8]发现,对于潮气量为6~8 mL/kg的机械通气感染性休克患者,SVV同样可以高度预测其容量反应性。尽管PPV、SVV能高度预测机械通气患者容量反应性,但这些指标易受潮气量、心肌收缩力、胸壁顺应性的影响^[9],因此对于自主呼吸或心律失常患者,PPV和SVV并不能精确预测容量反应性。但最近的一项研究报道称,对于自主呼吸的脓毒性休克患者,以SVV=17%为截断值可以准确预测容量反应性(阳性预测值为100%,阴性预测值为82%, $P=0.03$)^[10]。

1.1.2 Δ DSVC/ Δ DIVC: Δ DSVC/ Δ DIVC是通过经食道超声心动图或经胸超声心动图来探测上/下腔静脉(SVC/IVC)直径随呼吸运动的变化程度,目前已广泛应用于临床判断循环系统对液体治疗的反应性及循环容量状态。2004年,Feissel等^[11]对39例机械通气的脓毒性休克患者进行了一项前瞻性研究,探讨 Δ DIVC是否可预测患者的容量反应性, Δ DIVC=(Dmax - Dmin) / [(Dmax + Dmin) / 2] $\times 100\%$,式中Dmax为IVC最大直径,Dmin为IVC最小直径。结果显示,具有容量反应性患者的 Δ DIVC明显高于无容量反应性患者[15%比4%(25比6), $P<0.001$],且与CO的增加高度相关($r=0.82$, $P<0.001$),以 Δ DIVC=12%为截断值预测容量反应性的阳性预测值和阴性预测值分别是93%和92%。同年的另一项研究得出了相同的结论,但不同的是,该研究的观察指标是下腔静脉膨胀指数[dIVC, dIVC=(吸气时Dmax - 呼气时Dmin) / 呼气时Dmin $\times 100\%$]。研究表明,以dIVC=18%为截断值预测容量反应性的敏感度与特异度均为90%^[12]。国内一项前瞻性研究表明,以dIVC预测感染性休克患者容量反应性的受试者工作特征曲线(ROC)下面积(AUC)为0.887,以dIVC=22.5%为截断值预测容量反应性的敏感度为83.3%,特异度为82.6%^[13]。

尽管 Δ DSVC/ Δ DIVC在预测容量反应性方面具有较大优势,但使用超声心动图评估 Δ DSVC/ Δ DIVC需要测量吸气与呼气时SVC、IVC的内径,并通过计算得出相应的结果,这无疑是一个相对耗时的过程,在急性循环休克等紧急情况下,繁琐的测量过程会延误对患者的救治。2006年,Vieillard-Baron等^[14]对30例入住内科重症加强治疗病房(ICU)的患者进行了一项前瞻性研究,该研究对比了定性

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2015.01.016

基金项目:卫生行业科研专项项目(201202011)

作者单位:610041 浙江杭州,浙江中医药大学第二临床医学院(周小洋);310013 浙江杭州,浙江医院重症医学科(李莉、严静)

通讯作者:严静, Email: zjicu@vip.163.com

与定量评估的 Δ DSVC, 结果表明定性评估 Δ DSVC 可以很容易鉴别出 SVC 的变化程度。Weekes 等^[15]的研究同样支持该观点, 该研究纳入了 24 例收入急诊室需液体复苏的低血压患者, 结果显示, 通过定性评估的 Δ DIVC 与所测量的 Δ DIVC 高度相关 ($r=0.81, P<0.0001$)。因此在紧急情况下, 可以通过定性评估 Δ DSVC/ Δ DIVC 指导液体复苏, 为抢救赢得更多时间。但最近的一项研究表明, 尽管定性与定量评估 dIVC 的结果高度相似, 且经验丰富与经验不足的评估者定性评估 dIVC 的结果并无显著差异, 但当定量所测 dIVC 在 15%~30% 时, 采用定性评估可能会出现较大误差^[16]。因此, 尽管定性方法可以明显节约时间, 且定性与定量评估 Δ DSVC/ Δ DIVC 有高度相似性, 但因其缺乏真实性且在一定范围内存在较大误差, 因此仅可在紧急情况下使用这一指标大致评估患者的容量反应性, 对于病情较稳定的患者仍需仔细测量相关指标, 以更加准确地指导临床治疗。

1.1.3 Δ Vpeak: 与 Δ DSVC/ Δ DIVC 一样, Δ Vpeak 同样能够准确预测脓毒性休克患者的容量反应性^[17]。 Δ Vpeak = $(V_{\text{peak max}} - V_{\text{peak min}}) / [(V_{\text{peak max}} + V_{\text{peak min}}) / 2] \times 100\%$ 。不仅如此, Δ Vpeak 用于评估儿童的血流动力学及循环状态同样展示出了巨大优势。Durand 等^[18]对 26 例左心功能正常的机械通气患儿开展了一项前瞻性研究, 结果显示 Δ Vpeak 预测该人群容量反应性的能力高于 PPV (AUC 为 0.85 比 0.59, $P=0.001$), 以 12% 为临界值预测容量反应性的敏感度和特异度分别为 81.2% 和 85.7%, 且与扩容所引起每搏量的变化呈正相关 ($r=0.68, P=0.001$)。对于先天性室间隔缺损修补术后的机械通气患儿, Δ Vpeak 同样能高度预测容量反应性, 且预测能力与 Δ DIVC 相仿 (AUC 为 0.83 比 0.85)^[19]。最近一项研究^[20]再次针对机械通气患儿, 对比了使用持续无创心排量监测仪测量的 SVV 与应用经胸超声心动图测量的 Δ Vpeak 在预测该人群容量反应性方面的能力, 结果表明, SVV 与 Δ Vpeak 都能高度预测其容量反应性, 且 Δ Vpeak [AUC=0.956, 95% 可信区间 (95%CI) = 0.885~1.000] 预测容量反应性的能力高于 SVV (AUC=0.888, 95%CI=0.764~1.000)。

除此之外, 近些年文献也相继报道了其他相关指标, 如上腔静脉峰流速随呼吸变异度 (ΔA 、 ΔS 、 ΔD)、机械通气脉搏波形变异率 (VPV)、主动脉瓣下时间血流积分 (VTI) 等, 这些指标同样可以精确预测患者容量反应性^[21-23]。且最近的一项研究表明: 脉搏灌注变异指数 (PVI) 能准确预测神经外科手术患儿的容量反应情况, 且 PVI > 11% 预测容量反应性的敏感度和特异度分别为 73.3% 和 86.7%^[24]。

1.2 容量负荷试验与被动抬腿试验 (PLR): 容量负荷试验主要是通过静脉内快速给予一定量的液体, 观察患者动脉血压、心率、CO、CVP 等指标的变化, 若循环状态改善, 如出现 CO、血压等增高或心率降低等变化, 则提示患者具有容量反应性。但容量负荷试验仅提示患者具有容量反应性, 并不意味着需要进行液体复苏治疗, 如健康者的容量负荷试验也可呈阳性, 但其并不需要液体复苏, 因此容量负荷试验的前提

是患者存在已知或可疑的组织低灌注, 否则这种非可逆性的试验方法可能会给患者带来肺水肿的风险。有资料表明, 仅有一半血流动力学不稳定的患者对容量负荷试验有阳性反应, 因此仅通过容量负荷试验预测患者的容量反应性具有较大局限性^[25]。

21 世纪初, Boulain 等^[26]对 39 例机械通气的循环衰竭患者进行 PLR, 并观察 PLR 前后每搏量和脉压等血流动力学参数的变化, 提出了 PLR 可以预测容量反应性的观点。随后一项研究再次对接受机械通气的循环衰竭患者进行 PLR 研究, 结果显示, 以 PLR 诱导的主动脉血流峰值 $\geq 10\%$ 为截断值, 预测容量反应性的敏感度和特异度分别是 97% 和 94%, 且在自主呼吸触发或心律失常的亚组分析中, PLR 同样能够精确预测容量反应性^[27]。此后的系列研究均表明, PLR 在未接受机械通气的自主呼吸人群中有很好的预测价值, 因此对于心律失常或自主呼吸患者, PLR 同样具有良好的应用价值^[28-30]。Marik 等^[31]的研究发现, 具有容量反应性的危重病患者在 PLR 后, 其颈动脉血流增加了 $(79 \pm 32)\%$, 而无容量反应性患者仅为 $(0.1 \pm 14)\%$ ($P<0.0001$), 且以颈动脉多普勒血流增加 20% 为截断值来预测容量反应性的敏感度和特异度分别为 94% 和 86%。该研究提示, 对于危重病患者联合 PLR 与颈动脉多普勒可以为血流动力学监测提供一种有效的监测方式。同样, 国内有研究发现, PLR 前后评估肱动脉峰流速变化可以较好地判断存在自主呼吸的重症患者的容量反应性^[32]。

由于 PLR 能精确预测容量反应性, 且具有自体容量负荷的可逆性、可重复性的特点, 是一种具有广阔前景的预测容量反应性的方式。但是, PLR 仍具有一定的局限性。一项研究发现, 对于伴有高腹压的患者, PLR 无法精确预测其容量反应性; 另外, 严重低血容量状态、弹力袜等情况因可能减少回心血量而降低 PLR 的预测能力^[33]。

2 评估动脉张力

液体复苏对于低血压的循环休克患者往往是抢救的最先选择, 其目的是期望通过增加 CO 以升高平均动脉压 (MAP)、改善组织灌注。然而, 液体负荷后 MAP 能否增加不仅取决于机体的压力-容积环 (P-V Loop) 处于何种水平, 还有一个重要的决定因素就是动脉张力。以往常用于评估动脉张力的指标是外周血管阻力 (SVR), 但 SVR 主要代表的是微小动脉水平的血管平滑肌张力, 而这些动脉可以通过复杂的神经激素系统和局部因素调节血管口径, 以保证毛细血管灌注压恒定在生理水平, 因此 SVR 仅表示对恒定血流的阻力^[34]。然而, 动脉血压与血流本身具有波动的特性, 且动脉张力包括动脉血管阻力和顺应性两个方面, 因此 SVR 无法完整地评估全部动脉阻抗 (arterial impedance), 目前认为其用于评估动脉张力是不合适的。

Pinsky^[35]提倡以一种动态方式评估动脉张力, 指应用机械通气过程中脉压和每搏量的循环变化, 即 PPV 与 SVV, 来计算单个正压呼吸间期 PPV 与 SVV 的比值, 称为动态动脉弹性 (dynamic arterial elastance, Eadyn)。对 Eadyn 的功能

性评估不仅能在床边持续、即时地评估患者的动脉张力,而且可以判别哪些患者会对液体复苏作出动脉血压变化的反应。2011年, Monge García 等^[36]对25例机械通气的低血压患者进行了一项研究, 结果发现 Eadyn 在液体复苏后 MAP 有反应者 (MAP 增加 $\geq 15\%$) 和无反应者 (MAP 增加 $< 15\%$) 之间有显著差异 ($P < 0.000 1$), 且 Eadyn 的基线值 > 0.89 预测液体复苏后 MAP 增加 $\geq 15\%$ 的敏感度为 93.75%, 特异度为 100%。该研究提示, 评估 Eadyn 是一种可以评估低血压循环休克患者动脉张力和预测动脉血压是否对液体负荷有反应的有效方法, 其价值更优于传统的 SVR。随后, 公茂磊等^[37]的研究同样发现, Eadyn 可以预测休克患者快速扩容后的血压反应性, 且基线 Eadyn > 0.85 预测的敏感度为 89.5%, 特异度为 92.3%。Hadian 等^[38]发现, 心脏外科术后患者经扩血管治疗后 Eadyn 明显下降 (从 1.44 降至 1.13), 进一步提示 Eadyn 可用于评估患者的动脉扩张状态。

3 鉴别心血管功能不全

在休克的早期阶段, 机体可通过收缩次要器官 (如肌肉、皮肤等) 的血管来维持动脉血压、重要器官的血流灌注在正常水平, 在这种代偿机制作用下, 常规使用的检测指标如心率、血压、CO 等通常维持在正常范围, 因而无法作为组织缺血及后续多器官功能衰竭等失代偿情况出现的早期预测指标。然而, 在代偿性休克阶段, 皮肤和肌肉组织就已出现微循环改变。因此, 评估这类组织器官的心血管储备功能可能是早期预警潜在的心血管功能不全的敏感指标。

3.1 组织氧饱和度 (StO₂): 用近红外线光谱分析仪 (NIRS) 检测 StO₂ 是近些年兴起的一项技术, 用其评估肌肉、皮肤等器官的心血管储备功能具有较大优势, 不仅可用于创伤患者的复苏指导, 而且可用于预测危重病患者的病死率^[39]。一项前瞻性研究表明, 在严重脓毒症 / 脓毒性休克患者复苏治疗过程中, 经 NIRS 检测的静态 StO₂ 值与患者病死率相关, 经复苏治疗后若 StO₂ < 0.75 , 则病死率增加 2 倍^[40]。Lee 等^[41]进一步研究发现, StO₂ 值可以作为血容量减少时组织灌注不足的预测指标。然而, 以往有研究表明, 使用 NIRS 检测的静态 StO₂ 值评估组织低灌注是不敏感的, 因为即使休克已有明显进展, StO₂ 仍处于正常水平, 因此单纯依靠 StO₂ 无法作为评估微循环状态的早期指标^[42]。

3.2 血管闭塞试验 (VOT) 与失氧率和复氧率斜率: Gómez 等^[42]研究报告, 联合动态缺血冲击试验如 VOT 可以明显提高 StO₂ 鉴别组织低灌注的能力。目前, VOT 多使用无创血压袖带加压 (超过收缩压 30 mmHg, 1 mmHg = 0.133 kPa) 来阻断上臂动脉血流一定时间 (通常为 3 ~ 5 min), 然后释放血压袖带恢复血流, 通过检测大鱼际处的 StO₂ 变化来评估微循环的储备功能。在血流阻断过程中, StO₂ 下降的曲线斜率称为失氧率斜率 (DeO₂), 其反映了局部组织代谢率和线粒体功能; 在血液复流过程中, StO₂ 上升的曲线斜率称为复氧率斜率 (ReO₂), 反映了局部心血管功能储备与微循环血流。

Creteur 等^[43]的研究表明, 经 NIRS 检测 VOT 试验 StO₂

值的变化与严重脓毒症 / 脓毒性休克患者的临床结局相关, 该前瞻性研究共纳入了 72 例严重脓毒症 / 脓毒性休克患者 (试验组), 18 例血流动力学稳定的急性病非感染患者 (对照组), 18 例健康志愿者, 观察指标是 ReO₂ 及最大 StO₂ 与基线 StO₂ 的差值 (ΔStO_2)。研究结果显示, 试验组中生存者的 ReO₂ 明显高于死亡者 [(3.2 \pm 1.3) %/s 比 (1.9 \pm 1.3) %/s, $P < 0.05$], 试验组的 ReO₂ 和 ΔStO_2 明显低于对照组和健康志愿者。该研究表明, ReO₂ 可以作为脓毒症患者 ICU 病死率的良好预测指标 (AUC = 0.797), 以 2.55%/s 为截断值, 敏感度为 85%, 特异度为 73%。随后的一项前瞻性研究证实, 创伤患者入院前的 DeO₂ 与 ReO₂ 可以在缺乏明显休克症状时预测其病死率及是否需要接受院内生命支持治疗^[44]。一项研究发现, 在伴有正常血压的脓毒性休克患者中, DeO₂ 下降与患者器官功能不全的恶化相关, 而且 DeO₂ 和 ReO₂ 下降还与患者的 ICU 住院时间和总住院时间相关^[45]。总之, 在休克的早期阶段, 尽管因代谢机制导致诸如心率、血压等微循环指标无法判别心血管功能不全, 但通过联合 VOT 与动态检测 StO₂ 可以敏感地评估心血管功能及微循环状态, 指导临床进行早期的合理治疗, 挽救患者生命。

4 小结

与传统静态的监测指标相比, 功能性血流动力学监测在评估患者液体反应情况、动脉张力及心血管功能不全方面展现出了巨大优势, 其精确性、早期性及低创伤性远远优于传统指标, 而这些优势主要来源于技术产品的发展及功能性血流动力学监测的“功能性”, 即动态性。功能性血流动力学监测的各项指标多数来自对传统静态指标的动态监测, 并由此衍生出更多的监测指标。因此我们相信, 随着技术产品的发展及临床工作者对疾病的生理病理机制认识的加深, 将会有更多更精确、更无创的血流动力学监测指标出现, 从而以最小的伤害为患者带来最大的益处。

参考文献

- [1] Michard F, Boussat S, Chemla D, et al. Relation between respiratory changes in arterial pulse pressure and fluid responsiveness in septic patients with acute circulatory failure [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2000, 162 (1): 134-138.
- [2] Tavernier B, Makhotine O, Lebuffe G, et al. Systolic pressure variation as a guide to fluid therapy in patients with sepsis-induced hypotension [J]. Anesthesiology, 1998, 89 (6): 1313-1321.
- [3] Robotham JL, Cherry D, Mitzner W, et al. A re-evaluation of the hemodynamic consequences of intermittent positive pressure ventilation [J]. Crit Care Med, 1983, 11 (10): 783-793.
- [4] Marik PE, Cavallazzi R, Vasu T, et al. Dynamic changes in arterial waveform derived variables and fluid responsiveness in mechanically ventilated patients: a systematic review of the literature [J]. Crit Care Med, 2009, 37 (9): 2642-2647.
- [5] Michard F, Teboul JL. Predicting fluid responsiveness in ICU patients: a critical analysis of the evidence [J]. Chest, 2002, 121 (6): 2000-2008.
- [6] Berkenstadt H, Margalit N, Hadani M, et al. Stroke volume variation as a predictor of fluid responsiveness in patients undergoing brain surgery [J]. Anesth Analg, 2001, 92 (4): 984-989.
- [7] 彭松, 张琳, 钟明媚, 等. 每搏量变异度在感染性休克患者容量预测中的价值 [J]. 中华急诊医学杂志, 2013, 22 (11): 1260-1264.

- [8] 张宏民, 刘大为, 王小亭, 等. 每搏量变异评价顽固性感染性休克患者容量反应性[J]. 中华内科杂志, 2010, 49 (7): 610-613.
- [9] Mesquida J, Kim HK, Pinsky MR. Effect of tidal volume, intrathoracic pressure, and cardiac contractility on variations in pulse pressure, stroke volume, and intrathoracic blood volume [J]. *Intensive Care Med*, 2011, 37 (10): 1672-1679.
- [10] Lanspa MJ, Grissom CK, Hirshberg EL, et al. Applying dynamic parameters to predict hemodynamic response to volume expansion in spontaneously breathing patients with septic shock: reply [J]. *Shock*, 2013, 39 (5): 462.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吴敬医, 张霞, 王箴, 等. 超声心动图评价感染性休克患者液体反应性的临床研究[J]. 中华危重病急救医学, 2014, 26 (1): 36-40.
- [14] Vieillard-Baron A, Charron C, Chergui K, et al. Bedside echocardiographic evaluation of hemodynamics in sepsis: is a qualitative evaluation sufficient? [J]. *Intensive Care Med*, 2006, 32 (10): 1547-1552.
- [15] Weekes AJ, Tassone HM, Babcock A, et al. Comparison of serial qualitative and quantitative assessments of caval index and left ventricular systolic function during early fluid resuscitation of hypotensive emergency department patients [J]. *Acad Emerg Med*, 2011, 18 (9): 912-921.
- [16] Duwat A, Zogheib E, Guinot P, et al. The gray zone of the qualitative assessment of respiratory changes in inferior vena cava diameter in ICU patients [J]. *Crit Care*, 2014, 18 (1): R14.
- [17] Feissel M, Michard F, Mangin I, et al. Respiratory changes in aortic blood velocity as an indicator of fluid responsiveness in ventilated patients with septic shock [J]. *Chest*, 2001, 119 (3): 867-873.
- [18] Durand P, Chevret L, Essouri S, et al. Respiratory variations in aortic blood flow predict fluid responsiveness in ventilated children [J]. *Intensive Care Med*, 2008, 34 (5): 888-894.
- [19] Choi DY, Kwak HJ, Park HY, et al. Respiratory variation in aortic blood flow velocity as a predictor of fluid responsiveness in children after repair of ventricular septal defect [J]. *Pediatr Cardiol*, 2010, 31 (8): 1166-1170.
- [20] Lee JY, Kim JY, Choi CH, et al. The ability of stroke volume variation measured by a noninvasive cardiac output monitor to predict fluid responsiveness in mechanically ventilated children [J]. *Pediatr Cardiol*, 2014, 35 (2): 289-294.
- [21] 郭喆, 何伟, 侯静, 等. 超声测量上腔静脉血流评估机械通气患者容量反应性[J]. 中华危重病急救医学, 2014, 26 (9): 624-628.
- [22] Wyffels PA, Durnez PJ, Helderweirt J, et al. Ventilation-induced plethysmographic variations predict fluid responsiveness in ventilated postoperative cardiac surgery patients [J]. *Anesth Analg*, 2007, 105 (2): 448-452.
- [23] Muller L, Toumi M, Bousquet PJ, et al. An increase in aortic blood flow after an infusion of 100 ml colloid over 1 minute can predict fluid responsiveness: the mini-fluid challenge study [J]. *Anesthesiology*, 2011, 115 (3): 541-547.
- [24] Byon HJ, Lim CW, Lee JH, et al. Prediction of fluid responsiveness in mechanically ventilated children undergoing neurosurgery [J]. *Br J Anaesth*, 2013, 110 (4): 586-591.
- [25] Marik PE, Baram M, Vahid B. Does central venous pressure predict fluid responsiveness? A systematic review of the literature and the tale of seven mares [J]. *Chest*, 2008, 134 (1): 174-178.
- [26] Boulain T, Achard JM, Teboul JL, et al. Changes in BP induced by passive leg raising predict response to fluid loading in critically ill patients [J]. *Chest*, 2002, 121 (4): 1245-1252.
- [27] Monnet X, Rienzo M, Osman D, et al. Passive leg raising predicts fluid responsiveness in the critically ill [J]. *Crit Care Med*, 2006, 34 (5): 1402-1407.
- [28] 王洪亮, 刘海涛, 于凯江. 被动抬腿试验联合无创心排量监测系统预测容量反应性的临床研究[J]. 中华危重病急救医学, 2011, 23 (3): 146-149.
- [29] Préau S, Saulnier F, Dewavrin F, et al. Passive leg raising is predictive of fluid responsiveness in spontaneously breathing patients with severe sepsis or acute pancreatitis [J]. *Crit Care Med*, 2010, 38 (3): 819-825.
- [30] 武宇辉, 刘晓红, 李成荣, 等. 无创心排量监测技术联合被动抬腿试验预测脓毒性休克患儿容量反应性的临床研究[J]. 中华危重病急救医学, 2014, 26 (1): 46-50.
- [31] Marik PE, Levitov A, Young A, et al. The use of bio-reactance and carotid Doppler to determine volume responsiveness and blood flow redistribution following passive leg raising in hemodynamically unstable patients [J]. *Chest*, 2013, 143 (2): 364-370.
- [32] 张宏民, 刘大为, 王小亭, 等. 肱动脉峰流速结合被动抬腿试验判断容量反应性[J]. 中华医学杂志, 2013, 93 (3): 195-199.
- [33] Mahjoub Y, Touzeau J, Airapetian N, et al. The passive leg-raising maneuver cannot accurately predict fluid responsiveness in patients with intra-abdominal hypertension [J]. *Crit Care Med*, 2010, 38 (9): 1824-1829.
- [34] Nichols WW, O'Rourke M. McDonald's Blood Flow in Arteries. Theoretical, Experimental and Clinical Principles [M]. 5th edition. London: Oxford University Press, 2005.
- [35] Pinsky MR. Protocolized cardiovascular management based on ventricular-arterial coupling [M]// Pinsky MR, Payen D. Functional Hemodynamic Monitoring. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 381-395.
- [36] Monge García MI, Gil Cano A, Gracia Romero M. Dynamic arterial elastance to predict arterial pressure response to volume loading in preload-dependent patients [J]. *Crit Care*, 2011, 15 (1): R15.
- [37] 公茂磊, 刘大为, 王小亭, 等. 动态动脉弹性对休克患者扩容后血压反应的预测价值[J]. 中华医学杂志, 2013, 93 (17): 1305-1308.
- [38] Hadian M, Severyn DA, Pinsky MR. The effects of vasoactive drugs on pulse pressure and stroke volume variation in postoperative ventilated patients [J]. *J Crit Care*, 2011, 26 (3): 328. e1-8.
- [39] McKinley BA, Marvin RG, Cocanour CS, et al. Tissue hemoglobin O₂ saturation during resuscitation of traumatic shock monitored using near infrared spectrometry [J]. *J Trauma*, 2000, 48 (4): 637-642.
- [40] Vorwerk C, Coats TJ. The prognostic value of tissue oxygen saturation in emergency department patients with severe sepsis or septic shock [J]. *Emerg Med J*, 2012, 29 (9): 699-703.
- [41] Lee J, Kim JG, Mahon S, et al. Tissue hemoglobin monitoring of progressive central hypovolemia in humans using broadband diffuse optical spectroscopy [J]. *J Biomed Opt*, 2008, 13 (6): 064027.
- [42] Gómez H, Torres A, Polanco P, et al. Use of non-invasive NIRS during a vascular occlusion test to assess dynamic tissue O₂ saturation response [J]. *Intensive Care Med*, 2008, 34 (9): 1600-1607.
- [43] Creteur J, Carollo T, Soldati G, et al. The prognostic value of muscle StO₂ in septic patients [J]. *Intensive Care Med*, 2007, 33 (9): 1549-1556.
- [44] Guyette FX, Gomez H, Suffoletto B, et al. Prehospital dynamic tissue oxygen saturation response predicts in-hospital lifesaving interventions in trauma patients [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2012, 72 (4): 930-935.
- [45] Mesquida J, Espinal C, Gruartmoner G, et al. Prognostic implications of tissue oxygen saturation in human septic shock [J]. *Intensive Care Med*, 2012, 38 (4): 592-597.

(收稿日期: 2014-10-08)

(本文编辑: 李银平)