

# 无创超声血流速度时间积分在被动抬腿实验容量反应评估中的作用

刘业成<sup>1</sup> 郭磊<sup>2</sup> 齐志伟<sup>3</sup> 朱华栋<sup>1</sup> 于学忠<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国医学科学院北京协和医学院北京协和医院急诊科 100730; <sup>2</sup> 江西省九江学院附属医院外科 332000; <sup>3</sup> 中日友好医院急诊科, 北京 100029

通信作者: 朱华栋, Email: huadongzhu@hotmail.com

**【摘要】目的** 旨在评价用无创超声心输出量监测仪 USCOM 的血流速度时间积分功能 (velocity time integral, VTI) 作为被动抬腿实验 (passive leg raising, PLR) 观察指标的可行性。**方法** 前瞻性研究从 2014 年 10 月至 2016 年 10 月北京协和医院急诊科抢救室和 EICU 收治的 36 例感染性休克或急性胰腺炎患者。记录 PLR 前后 VTI 的变化率  $\Delta VTI_{plr}$ 、脉压的变化率  $\Delta PP$ , 以及扩容 (生理盐水 500 mL) 前后 VTI 变化率  $\Delta VTI_{ve}$ 、心搏量变化率  $\Delta SV$ 。容量反应阳性定义为扩容后患者  $\Delta SV$  在 15% 以上。**结果**  $\Delta VTI_{plr}$  和  $\Delta SV$  之间存在显著的正相关关系, Spearman 相关系数  $r = 0.888 (P < 0.01)$ 。 $\Delta VTI_{ve}$ 、 $\Delta VTI_{plr}$  及  $\Delta PP$  在所有患者中对于预测容量反应的效果:  $\Delta VTI_{ve}$  在  $>15\%$  时的敏感性为 94.7%, 特异性为 94.1%, ROC 曲线下面积 0.989;  $\Delta VTI_{plr}$  在  $>12\%$  时敏感性为 84.2%, 特异性为 88.2%, ROC 曲线下面积 0.916;  $\Delta PP$  在  $>10.5\%$  时的敏感性为 78.9%, 特异性为 88.2%, ROC 曲线下面积 0.870。**结论** 用 USCOM 测得的 PLR 前后 VTI 的增加率  $\Delta VTI_{plr}$  是一个敏感性和特异性都较高的指标, 优于经典指标  $\Delta PP$ , 而且通过 USCOM 监测  $\Delta VTI_{plr}$  完全无创, 有很好的急诊应用前景。

**【关键词】** 被动抬腿实验; 无创超声心输出量监测; 容量反应

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2019.04.018

## The role of noninvasive ultrasound blood flow velocity time integral in the evaluation of fluid responsiveness during passive leg raising test

Liu Yecheng<sup>1</sup>, Guo Lei<sup>2</sup>, Qi Zhiwei<sup>3</sup>, Zhu Huadong<sup>1</sup>, Yu Xuezhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Emergency Medicine, Peking Union Medical College Hospital, Beijing, 100730, China; <sup>2</sup>Department of plastic surgery; Affiliated Hospital of Jiujiang University, Jiujiang, 332000, China; <sup>3</sup>Department of Emergency Medicine, China-Japan Friendship Hospital, Beijing, 100029, China

Corresponding author: Huadong Zhu Email: huadongzhu@hotmail.com

**【Abstract】Objective** To evaluate the feasibility of using noninvasive ultrasonic cardiac output monitor USCOM velocity time integral (VTI) as the observation index of PLR. **Methods** This prospective study recruited 36 septic shock or acute pancreatitis patients from October 2014 to October 2016 in the resuscitation room and EICU of Peking Union Medical College Hospital. The change of VTI and plus pressure before and after PLR ( $\Delta VTI_{plr}$  and  $\Delta PP$ ), and the change of VTI and stroke volume before and after 500 mL of volume expansion ( $\Delta VTI_{ve}$  and  $\Delta SV$ ) were recorded. Fluid response positive was defined as stroke volume increase more than 15% after volume expansion. **Results**  $\Delta VTI_{plr}$  was positively correlated with  $\Delta SV$  (Spearman correlation coefficient  $r=0.888, P<0.01$ ). The predicting value of  $\Delta VTI_{ve}$ ,  $\Delta VTI_{plr}$  and  $\Delta PP$  in fluid response were as follows: the sensitivity of  $\Delta VTI_{ve}$  in  $>15\%$  was 94.7%, the specificity was 94.1%, area under the ROC curve was 0.989; the sensitivity of  $\Delta VTI_{plr}$  in

>12% was 84.2%, the specificity was 88.2%, area under the ROC curve was 0.916; and the sensitivity of  $\Delta$  PP in >10.5% was 78.9%, the specificity was 88.2%, the area under the ROC curve was 0.870.

**Conclusions**  $\Delta$  VTIplr measured by USCOM before and after the PLR is a sensitive and specific index. It is better than the classic index  $\Delta$  PP.  $\Delta$  VTIplr measured by USCOM is completely noninvasive, which has very good application prospect in the emergency department.

**【Key words】** Passive leg raising test; Noninvasive ultrasound cardiac output monitoring; Fluid responsiveness

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2019.04.018

对血流动力学不稳定患者的容量状态判断是很关键、但很有难度的问题。足够的血管内容量是使用血管活性药物的前提条件,但过多的容量又会造成肺水肿等不良反应。常规的静态评估指标如中心静脉压、肺动脉楔压目前被认为不能很好地反应患者的容量状态。而动态指标如每搏输出量变异率和脉压变异率又基本仅对呼吸机控制通气的患者适用。被动抬腿实验 (passive leg raising, PLR) 通过让下肢静脉血液迅速回流,模拟了快速输液的过程,能迅速增加前负荷,如果患者有容量反应,心搏量 (stroke volume, SV) 就会明显增加。不论患者是否机械通气,PLR 都能很好地预测患者的容量反应<sup>[1]</sup>。常规的 PLR 观察指标脉压变化率 (pulse pressure change,  $\Delta$  PP) 和心搏量变化率 ( $\Delta$  SV) 等在急诊应用都有许多局限性。本实验旨在评价用无创超声心输出量监测仪的主动脉血流速度时间积分功能 (velocity time integral, VTI) 观察 PLR 后患者的主动脉血流状况变化,判断其是否能应用于急诊患者的 PLR, 预测急诊患者的容量反应。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

本实验前瞻性地研究从 2014 年 10 月至 2016 年 10 月北京协和医院急诊科抢救室和 EICU 收治的感染性休克或急性胰腺炎患者。患者的入组标准: (1) 患者存在以下至少一项组织灌注不足的征象,包括:急性循环衰竭 (收缩压小于 90 mmHg 或较前下降 40 mmHg); 尿量小于 0.5 mL/kg 至少 1 h; 心率增快 HR 大于 100 次/min; 皮肤花斑。(2) 非机械通气; (3) 有心电监测; (4) 有脉搏波形指示的连续心输出量 (pulse indicated continuous cardiac output, PiCCO) 监测。患者的排除标准: (1) 有持续的心律失常; (2) USCOM 不能获得满意图像; (3)

患者有重度主动脉瓣关闭不全; (4) 已有明确血容量过多的临床表现。

### 1.2 患者及设备准备

所有患者置入中心静脉导管 (颈内静脉或锁骨下静脉) 和外周动脉导管 (股动脉) 进行 PiCCO 监测, 采用热稀释方法测定心输出量, 自中心静脉注射 15 ml 小于 8℃ 的生理盐水, 描记热稀释曲线, 计算得到心输出量指数 (Cardiac Output Index, CI)、心搏量 (SV) 等。收缩压和舒张压的差值为脉压 (PP)。同时使用 USCOM 测得各时间点的 VTI。

### 1.3 实验步骤

第一步 (基线 1): 患者半卧位, 床头抬高 30° -45°, 测量基线水平参数。

第二步 (PLR): 患者床头放平, 下肢抬高 30° -45° 持续 1 min, 测量 PLR 水平的参数。计算得到 VTI 较前增加率  $\Delta$  VTIplr 及 PP 较前增加率  $\Delta$  PP。

第三步: 患者下肢和床头回到基线体位 5 min, 得到基线 2 水平。

测量参数后, 给予扩容: 患者在 30 min 内静脉输注生理盐水 500 mL, 然后收集容量反应的相关数据。静脉输液后患者 PiCCO 监测的 SV 较基线 2 变化率 ( $\Delta$  SV) 大于 15% 认为容量反应阳性, 反之为容量反应阴性。同时通过 USCOM 得到 VTI 较基线 2 变化率 ( $\Delta$  VTIve)。

因为血流动力学参数在呼吸时会出现变化<sup>[2]</sup>, 观察 10 次连续心搏, 包括至少一次呼吸, 记录患者每个状态的 VTI、PP、SV 在呼吸过程中的最低值。每个血流动力学测量在最初的 5 min 内完成。VTI、PP、SV 变化率 ( $\Delta$  VTIplr、 $\Delta$  VTIve、 $\Delta$  PP、 $\Delta$  SV) 用如下公式计算: 变化率  $\Delta$  (%) = 100 × (PLR 后 - 基线) / 基线, 或  $\Delta$  (%) = 100 × (扩容后 - 基线) / 基线。

1.4 统计学方法

应用 SPSS 19 统计软件分析。计量资料采用均数 ± 标准差 (Mean ± SD) 表示。两组间的计量资料比较采用配对 *t* 检验；相关性分析采用 Spearman 相关。以 *P* < 0.05 为差异有统计学意义。受试者工作曲线 ( receiver- operating characteristic curves ROC 曲线 ) 用 Hanley-McNeil 法得到, ΔPP 和 ΔVTI 的阈值用最佳 Youden 指数法得到, Youden 指数 = 敏感性 + 特异性 - 1。

2 结果

在研究期间, 总计有 36 例患者满足入组条件。男性 21 例, 女性 15 例, 年龄 ( 59 ± 32 ) 岁, 最小年龄 21 岁, 最大年龄 89 岁。每例患者只入组第一次的 PLR 和补液试验, 其中容量反应阳性患者 19 例, 容量反应阴性患者 17 例。所有患者获得了心率、血压, PiCCO 测定的 SV、CI 及 USCOM 测定的 VTI ( 表 1 )。所有患者 PLR 后 HR 较基线 1 水平差异无统计学意义, 而 SV、CI、VTI 较基线 1 都有显著升高 (*P* < 0.05)。容量反应阳性患者的 PP 在 PLR 后较基线 1 水平有显著升高 (*P* < 0.05), 而容量反应阴性患者的 PP 升高不显著。所有患者 PLR 后的 VTI 变化 ΔVTIplr 为 ( 12.8 ± 8.1 ) %, 补液后的 VTI 变化 ΔVTIve 为 ( 16.6 ± 8.0 ) %, PLR 后的 PP 变化 ΔPP 为 ( 11.1 ± 7.7 ) %。ΔVTIplr 和 ΔSV 之间的相关关系分析显示 Spearman 相关系数 *r* = 0.888 (*P* < 0.01), 两组指标之间存在显著的正相关关系 ( 图 1 )。ΔVTIve、ΔVTIplr 及 ΔPP 在

所有患者中对于预测容量反应的 ROC 曲线如图 2 : ΔVTIve 在 >15% 时的敏感性为 94.7%, 特异性为 94.1%, 曲线下面积 0.989 ; ΔVTIplr 在 >12% 时敏感性为 84.2%, 特异性为 88.2%, 曲线下面积 0.916 ; ΔPP 在 >10.5% 时的敏感性为 78.9%, 特异性为 88.2%, 曲线下面积 0.870。

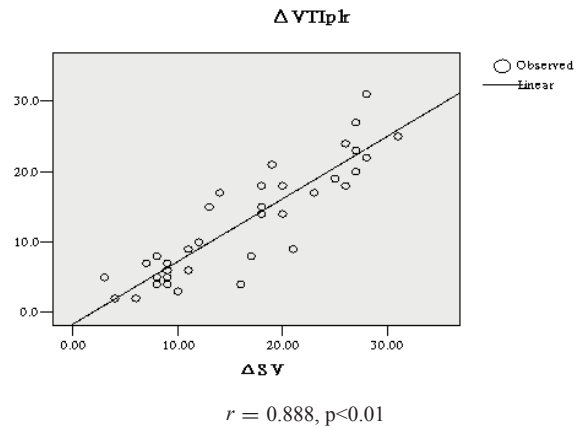


图 1 ΔVTIplr 与 ΔSV 的相关分析

Fig 1 correlation between the patients' ΔVTIplr and ΔSV

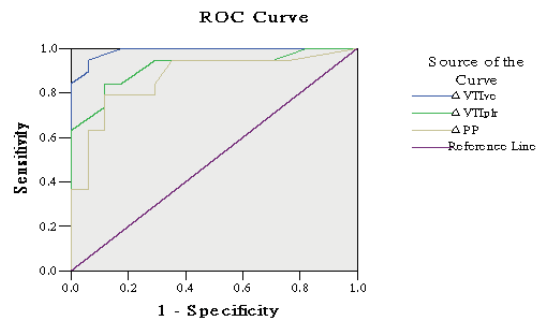


图 2 ΔVTIve、ΔVTIplr 及 ΔPP 在所有患者中对于预测容量反应的 ROC 曲线

Fig 2 ROC curves for predicting capacity response in all patients: ΔVTIve, ΔVTIplr and ΔPP

表 1 患者各状态下的血流动力学指标

Table 1 Hemodynamic parameters in all patients

指标	基线 1	PLR 后	基线 2	扩容后
HR, ( 次 /min)				
容量反应 (+)	107 ± 24	106 ± 27	107 ± 21	105 ± 19 <sup>b</sup>
容量反应 (-)	109 ± 26	108 ± 34	108 ± 28	107 ± 22 <sup>b</sup>
PP,(mmHg)				
容量反应 (+)	57 ± 11	60 ± 12 <sup>a</sup>	56 ± 12	62 ± 20 <sup>b</sup>
容量反应 (-)	54 ± 13	56 ± 14	55 ± 11	59 ± 24 <sup>b</sup>
CI, (L/min · m <sup>2</sup> )				
容量反应 (+)	3.12 ± 1.23	3.29 ± 1.42 <sup>a</sup>	3.13 ± 1.07	3.35 ± 1.62 <sup>b</sup>
容量反应 (-)	3.34 ± 1.07	3.47 ± 1.12 <sup>a</sup>	3.32 ± 1.12	3.67 ± 1.32 <sup>b</sup>
SV,( ml)				
容量反应 (+)	42 ± 12	45 ± 11 <sup>a</sup>	42 ± 11	51 ± 12 <sup>b</sup>
容量反应 (-)	46 ± 13	48 ± 10 <sup>a</sup>	45 ± 12	49 ± 11 <sup>b</sup>
VTI, (cm)				
容量反应 (+)	21 ± 10	23 ± 13 <sup>a</sup>	21 ± 12	26 ± 16 <sup>b</sup>
容量反应 (-)	22 ± 15	23 ± 16 <sup>a</sup>	21 ± 14	24 ± 17 <sup>b</sup>

注：容量反应 (+) 组 n=19；容量反应 (-) 组 n=17, PLR 后与基线 1 状态比较, <sup>a</sup>*P* < 0.05；补液后与基线 2 比较, <sup>b</sup>*P* < 0.05

3 讨论

容量判断在危重患者的治疗中是一个永恒的话题, 容量不足会导致患者暴露于氧供不足和休克的风险；而容量过多则是危重患者病死率增加的独立危险因素<sup>[3]</sup>。现有的预测患者容量反应的指标有很多, 包括经典的有创方法如肺动脉漂浮导管, 微创方法如 PICCO, 无创方法如超声心动、USCOM, 以及一些动态监测方法如补液试验、PLR。但是没有一种为公认的最佳方法。目前国内对于容量监测的方法多是因地制宜, 综合应用。

PLR 是一种通过让下肢静脉血液迅速回流而短暂时增加回心血量的方法<sup>[4]</sup>, 大约能募集 300 ml 左右的下肢血液。PLR 被认为是安全的“自体补液实验”, 一旦患者下肢放平回到正常位置, 补液作用就会逆转, 而且即使下肢抬高时间偏长一些也不会有持续的补液作用。因其使用相对方便、安全性高得到大家的关注, 持续地成为研究的热点<sup>[5-6]</sup>, 而且被越来越多地尝试用于急诊<sup>[7]</sup>。但目前限制其在急诊应用的一个很大的问题在于, 判断 PLR 效果的经典观察指标为  $\Delta PP$ <sup>[8]</sup>, 而  $\Delta PP$  需要获得有创血压, 有一定创伤, 也很难实时得到结果, 在急诊使用非常困难; 近年研究较多的观察指标是超声心动的主动脉血流速度或 SV 变化<sup>[9]</sup>。而超声心动对急诊医师来说技术难度很高, 同样难以实施。因此找到一个适合急诊的 PLR 观察指标显得尤为重要。

USCOM 是一种非常易于上手的多普勒超声无创技术测定心输出量的仪器。在 2001 年最早应用于临床, 它主要依赖连续多普勒超声技术实时描记主动脉或肺动脉血流频谱, 并根据得到的频谱图形计算患者的心输出量和其他血流动力学参数。所用探头的频率为 2.0 MHz, 探查主动脉血流频谱的窗口位于胸骨上。一旦获得满意血流频谱, 则可以通过主动脉流出道的流速波形获得 VTI, 根据  $SV = S \times VTI$  计算得到每搏量, 从而得到心输出量, 其中 S 为主动脉瓣口横截面积, VTI 代表射血的距离。USCOM 的使用范围较广<sup>[10-11]</sup>, 其效果被许多临床试验所评估, 其中和经典的热稀释法以及食道超声法比较的研究较多, 但结果差异较大, 有的认为相关性可以接受<sup>[12]</sup>, 有的则认为相关性差<sup>[13-14]</sup>。认为相关性差的多数实验发现, 其误差的主要原因是 USCOM 估测的主动脉瓣口横截面积和超声心动实际测量的横截面积的相关性差。USCOM 所使用的瓣口横截面积应用患者身高通过 Nidorf 回归方程进行计算得到<sup>[15]</sup>, 而 Nidorf 回归方程是从健康志愿者的数据分析得到, 因此 USCOM 所使用的主动脉瓣口横截面积为估测面积而非患者的实际面积。由于存在个体差异、基础心脏病等问题, 导致 USCOM 所使用的主动脉瓣口横截面积与实际值之间存在差异, 在最终得到的心指数结果与实际结果之间存在差异就不可避免了。虽然 USCOM 测得的 SV 绝对数不十分令人满意, 但在

观察 PLR 效果时以及判断容量反应时往往使用的是 SV 的变化比例  $\Delta SV\%$ , 而非绝对的 SV, 考虑到患者短时间内主动脉瓣口横截面积不会有明显变化,  $\Delta SV\%$  从理论上是和  $\Delta VTI\%$  等同的。本研究试验性使用 USCOM 所测得的  $\Delta VTI\%$  作为观察 PLR 效果和容量反应判断的指标, 既避免了 USCOM 测 SV 的缺陷, 又没有用心脏彩超获得 VTI 的技术难度, 为容量反应判断的无创监测提供了新的可选方法。

本研究发现, PLR 后患者的 HR 不论在有容量反应的患者还是在无容量反应的患者, 差异均无统计学意义, 说明用临床上最容易获得的指标 HR 来判断 PLR 的容量反应效果很差。PLR 后所有患者的 VTI 较输液前都有显著变化,  $\Delta VTI_{plr}$  和患者输液后的 SV 变化  $\Delta SV$  有很好的线性相关关系。 $\Delta VTI_{plr}$  在  $>12\%$  时较  $\Delta PP$  在  $>10.5\%$  时对患者容量反应的判断特异性相当, 敏感性更好, ROC 曲线下面积也较  $\Delta PP$  大。说明用 USCOM 测得的  $\Delta VTI$  是一个敏感性和特异性都较高的指标, 用 VTI 在 PLR 前后的变化评估 PLR 的反应效果好。在我们的研究中  $\Delta VTI$  表现优于经典指标  $\Delta PP$ , 这个结果和用食道超声测出的主动脉流速的结果有些类似<sup>[9]</sup>, 但很明显, 通过 USCOM 监测  $\Delta VTI$  完全无创, 而食道超声有一定创伤, 同时 USCOM 也明显更易于急诊医师掌握, 因此我们认为 USCOM 监测  $\Delta VTI_{plr}$  有很好的急诊应用前景。

另一方面, 在急诊使用 PiCCO 或漂浮导管得到 SV 费时、有创、价格昂贵<sup>[16]</sup>, 而 USCOM 所得到的 SV 准确性又难以保证, 但目前公认的判断容量反应的标准有都是以补液后  $\Delta SV$  大于 15% 来判断, 能否有其他的方法替代  $\Delta SV$  是我们关心的问题。能否用 USCOM 测得的  $\Delta VTI$  替代  $\Delta SV$  呢? 为了进一步检测 USCOM 测得的  $\Delta VTI$  的效果, 本研究在补液后不仅计算了 PiCCO 所得的 SV 变化率  $\Delta SV$ , 也计算了相应的 VTI 变化率  $\Delta VTI_{ve}$ , 发现  $\Delta VTI_{ve}$  和  $\Delta SV$  结果非常接近,  $\Delta VTI_{ve}$  在  $>15\%$  时的敏感性和特异性都接近 95%。从本研究可以发现, 在急诊的容量反应判断中, 使用 USCOM 测得的  $\Delta VTI_{ve}$  是否大于 15% 来判断患者的容量反应准确性是有保障的。

综上所述, 不论是在被动抬腿实验中, 还是

在补液试验中, 用 USCOM 无创多普勒超声获得的血流速度时间积分 VTI 作为观察指标, 都能准确地评估患者的容量反应。这种方法使用方便, 适用于急诊, 值得进一步进行更大规模的临床试验进行印证、推广。

#### 参 考 文 献

- [1] Cherpanath TGV, Hirsch A, Geerts BF, et al. Predicting fluid responsiveness by passive leg raising[J]. Crit Care Med, 2016, 44(5): 981-991. DOI:10.1097/ccm.0000000000001556.
- [2] Soubrier S, Saulnier F, Hubert H, et al. Can dynamic indicators help the prediction of fluid responsiveness in spontaneously breathing critically ill patients[J]. Intensive Care Med, 2007, 33(7):1117-1124. DOI: 10.1007/s00134-007-0644-9.
- [3] Marik PE. Iatrogenic salt water drowning and the hazards of a high central venous pressure[J]. Ann Intensive Care, 2014, 4: 21. DOI:10.1186/s13613-014-0021-0.
- [4] Monnet X, Cipriani F, Camous L, et al. The passive leg raising test to guide fluid removal in critically ill patients[J]. Ann Intensive Care, 2016, 6(1):46. DOI: 10.1186/s13613-016-0149-1.
- [5] Krige A, Bland M, Fanshawe T. Fluid responsiveness prediction using Vigileo FloTrac measured cardiac output changes during passive leg raise test[J]. J Intensive Care, 2016, 6(4):63. DOI: 10.1186/s40560-016-0188-6.
- [6] Vistisen ST, Enevoldsen J, Scheeren TWL. Can passive leg raising be considered the gold standard in predicting fluid responsiveness?[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2017, 195(8):1075-1076. DOI: 10.1164/rccm.201701-0060LE.
- [7] Li W, Yu XZ, Xu J. An indispensable procedure to complete passive leg raising[J]. Ann Emerg Med, 2016, 68(3):394-395. DOI: 10.1016/j.annemergmed.2016.04.009.
- [8] 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. DOI:10.1378/chest.121.4.1245.
- [9] 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. DOI: 10.1097/01.CCM.0000215453.11735.06.
- [10] Vinayagam D, Patey O, Thilaganthan B, et al. A cross comparison study of USCOM® and transthoracic echocardiography in pregnancy[J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2017, 49(1):32-38. DOI: 10.1002/uog.15915.
- [11] Critchley LAH, Huang L. USCOM: window to the circulation: utility of supra-sternal Doppler in an elderly anaesthetized patient for a robotic cystectomy[J]. J Clin Monit Comput, 2014, 28(1): 83-93. DOI:10.1007/s10877-013-9499-5.
- [12] McNamara H, Barclay P, Sharma V. Accuracy and precision of the ultrasound cardiac output monitor (USCOM 1A) in pregnancy: comparison with three-dimensional transthoracic echocardiography[J]. Br J Anaesth, 2014, 113(4):669-676. DOI: 10.1093/bja/aeu162.
- [13] Thom O, Taylor DM, Wolfe RE, et al. Comparison of a supra-sternal cardiac output monitor (USCOM) with the pulmonary artery catheter[J]. Br J Anaesth, 2009, 103(6):800-804. DOI:10.1093/bja/aep296.
- [14] van den Oever HLA, Murphy EJ, Christie-Taylor GA. USCOM (ultrasonic cardiac output monitors) lacks agreement with thermodilution cardiac output and transoesophageal echocardiography valve measurements[J]. Anaesth Intensive Care, 2007, 35(6): 903-910. DOI:10.1177/0310057x0703500608.
- [15] Nidorf SM, Picard MH, Triulzi MO, et al. New perspectives in the assessment of cardiac chamber dimensions during development and adulthood[J]. J Am Coll Cardiol, 1992, 19(5): 983-988. DOI:10.1016/0735-1097(92)90282-r.
- [16] Lamia B, Kim HK, Severyn DA, et al. Cross-comparisons of trending accuracies of continuous cardiac-output measurements: pulse contour analysis, bioactance, and pulmonary-artery catheter[J]. J Clin Monit Comput, 2018, 32(1):33-43. DOI: 10.1007/s10877-017-9983-4.

(收稿日期: 2018-12-21)

(本文编辑: 何小军)