

儿童先天性心脏病术后经肺热稀释及持续脉搏轮廓分析心输出量测定技术规范使用专家共识



扫一扫下载指南原文

国家儿童医学中心心血管专科联盟 中华医学会小儿外科分会心胸外科学组 CICU 协作组

通信作者:徐卓明, Email:zmxymb@163.com

【摘要】 术后低心输出量综合征是儿童先天性心脏病(CHD)术后较为严重的并发症,积极进行心输出量监测,有利于早期识别及合理治疗。经肺热稀释(TPTD)及持续脉搏轮廓分析(PiCCO)是目前儿童常用的监测心输出量的方法。我们特制定此专家共识,目的在于规范TPTD及PiCCO在儿童CHD术后的应用,提高临床医师对于血流动力学参数的认识和分析水平,并在此基础上合理治疗,促进CHD术后患儿恢复。

【关键词】 先天性心脏病; 心输出量; 经肺热稀释; 持续脉搏轮廓分析; 儿童

DOI:10.3760/cma.j.cn101460-20200215-00011

Expert consensus on the standardized postoperative application of cardiac output assessment by using of transpulmonary thermodilution and pulse index continuous cardiac output monitoring for children with congenital heart disease

National Association for Pediatric Cardiology and Cardiac Surgery, National Children's Medical Center, Cardiac Intensive Care Collaboration Team, Cardiothoracic Surgery Group, Branch of Pediatric Surgery, Chinese Medical Association

Corresponding authors: Xu Zhuoming, Email:zmxymb@163.com

【Abstract】 Postoperative low cardiac output syndrome is a serious complication for children with congenital heart disease (CHD) after surgery. Active monitoring of cardiac output may be helpful for early identification and rational treatment. Transpulmonary thermodilution (TPTD) and pulse index continuous cardiac output (PiCCO) are commonly used to monitor cardiac output in children. Thus, the purpose of this expert consensus is to standardize the application of TPTD and PiCCO in children after CHD operation, to improve the level of understanding and analysis of hemodynamic parameters by clinicians, and to promote the recovery of children after CHD operation on the basis of reasonable treatment.

【Key words】 Congenital heart disease; Cardiac output; Transpulmonary thermodilution; Pulse index continuous cardiac output monitoring; Children

DOI:10.3760/cma.j.cn101460-20200215-00011

先天性心脏病(congenital heart disease, CHD)患者行体外循环心内直视手术后,因自身解剖结构改变和缺血再灌注损伤,其术后早期血流动力学可能会发生剧烈改变,造成绝对或相对的氧供不足,常伴有重要脏器灌注不良和内环境紊乱,出现少尿、血乳酸水平增高、酸中毒、中心静脉氧饱和度(central venous oxygen saturation, ScvO₂)降低、肺淤血,心脏指数(cardiac index, CI)<2.0~2.2 L·min⁻¹·m⁻²[1-3]。上述表现临床一般统称为术后“低心输出

量综合征(low cardiac output syndrome, LCOS)”。低心输出量(cardiac output, CO)与儿童死亡率增加有关^[4],其诊断过程的任何延迟均可能造成死亡率增加^[5]。无论临床医生经验水平如何,仅仅通过采用临床体格检查或各种间接的血流动力学参数来评估休克或LCOS患儿往往不够准确。目前,国内外学者^[3,6]一致认为,在各种原因引起的低血压或休克出现时,首先需要进行常规心电图监测,开放有创动脉血压监测,开放中心静脉,及时进行动脉血

气分析及中心静脉血气分析,了解氧供、氧耗是否失衡。与此同时进行床旁超声心动图检查,以了解和鉴别休克病因。若治疗效果不佳或病情仍在加重,应积极进行 CO 监测^[6]。目前,监测 CO 的常用技术有以下几类:Fick 法、指示剂稀释法、超声心动图、生物电阻抗法及动脉脉搏轮廓(波形)(pulse contour)分析技术。其特点见表 1。

在这几种血流动力学监测技术中,热稀释法最为常用,其中肺动脉导管(pulmonary artery catheter, PAC, 又称 Swan-Ganz 导管)在成人中被广泛使用来测定 CO。但由于规格、型号的局限,适用于小年龄儿童的 Swan-Ganz 导管不多,导致其在 CHD 患儿中的使用受到一定限制。作为 PAC 的替代方案^[7],经肺热稀释(transpulmonary thermodilution, TPTD)和脉搏轮廓分析是目前危重患儿中较为常用的 CO 监测方法。可用的两种装置为脉搏指示剂连续心输出量测定(pulse indicator continuous cardiac output, PiCCO, Pulsion Medical Systems, Feldkirchen, 德国)和容量、动/静脉压力测量系统(VolumeView, Edwards Life Sciences, Irvine, 美国,不仅可以测量 CO,还可以测量其他一些指标评估心脏前负荷、心脏收缩功能、肺水肿程度及肺血管通透性等。由于血流动力学监测对于 CHD 术后危重患儿十分重要,我们特制定此专家共识,目的在于规范 TPTD 及持续脉搏轮廓技术在儿童 CHD 术后中的应用,提高临床医师对于血流动力学参数的认识和分析水平,并在此基础上合理治疗,促进 CHD 术后患儿恢复。

推荐意见 1: 先天性心脏病(CHD)术后患儿出现低血压,在初始治疗后仍不能缓解病情,应进行心输出量监测。

一、热稀释法测定心输出量原理

经典的热稀释法测定 CO 使用 PAC,首先由 Swan 等^[8]描述和 Ganz^[9]等在通过 PAC 的近端口将已知体积和温度的流体推注(热指示剂)注入右心房后,使用改进的 Stewart-Hamilton 方程确定右心室的 CO^[10]。随后的血液温度变化由位于 PAC 尖端下游的热敏电阻记录,这种测定心输出量的方法被称为肺动脉热稀释法(pulmonary artery thermodilution, PATD)。在动物和人类的研究中,通过对比测量 CO 金标准方法,间歇性 PATD 的 CO 测量虽然不完美^[11],但它仍然是床边评估 CO 的临床参考方法^[12]。

TPTD 是近年来出现的另一种采用热稀释原理

测定 CO 的方法。TPTD 需要一个标准的中心静脉导管,通常放置在上腔静脉区域;以及一个特定的热敏电阻式动脉导管,通常通过股动脉插入。在通过静脉导管弹丸式注射等渗冷盐水后,热敏电阻检测血液温度的降低。使用改进的 Stewart-Hamilton 算法分析热稀释曲线可以计算 CO。TPTD 测量 CO 已经被证实是 PAC 的有效替代方案^[13-14]。

推荐意见 2: 经肺热稀释法(TPTD)所测得心输出量与肺动脉热稀释法(PATD)相当,是有效的监测心输出量的方法。

二、脉搏轮廓(波形)分析

装有 TPTD 的设备,如 PiCCO 和 Volume View,还能通过分析动脉留置导管采样的动脉曲线(“脉搏轮廓”)得出实时变化的连续 CO,称为脉搏轮廓(波形)分析。该方法基于每搏输出量与主动脉压力曲线的幅度和形状之间的关系^[15]。设备分析外周动脉中记录的压力波形的几何形状,估计主动脉水平的动脉曲线,并通过专有算法从压力波形的几何特性来估计每搏输出量。通过脉冲轮廓分析测量 CO 是准确的^[16],但它可能会随着时间的推移而漂移,特别是当动脉阻力发生变化时^[17-19]。相比未校准的脉冲轮廓分析装置, PiCCO 设备通过 TPTD 获得的值校准脉冲轮廓分析,具有更好的准确性,特别是当动脉张力在很大程度上发生变化时,例如在血管加压素下^[18]。在 1 小时无校准期后,应考虑再次校准脉冲轮廓分析^[20]。这并不意味着 TPTD 设备在使用过程中必须每小时进行一次校准,而是当 CO 必须用于解释血液动力学状况时,应及时进行脉冲轮廓分析的校准,我们推荐对于血流动力学不稳定的患儿,至少每 6~8 小时校准一次。

推荐意见 3: 脉搏轮廓分析结合经肺热稀释技术,能得出连续心输出量,但对于血流动力学不稳定的患儿,推荐至少每 6~8 小时校准一次。

三、PiCCO 监测的适应证和禁忌证

如前所述,目前共识建议指出,对于初始治疗无效的休克患者,应监测 CO,并应将 PAC 或 TPTD 设备用于此目的^[6,21]。尽管 TPTD 被认为比 PAC 具有更小的侵入性,但仍然需要置入中心静脉导管和股动脉导管。因此,若患儿存在置入中心静脉导管或者股动脉导管的禁忌证,如:穿刺部位局部感染、血管管腔狭窄等,也视作 PiCCO 监测的相对禁忌证。在置管前,推荐应用超声筛选目标血管,测量目标血管的内径。对于股动脉置管的型号,目前没有统一的共识,但一般不超过血管内径的 2/3,通常

表1 几种常见心输出量测定方法的介绍

方法	原理	优点	缺点
Fick法 氧气Fick 二氧化碳 Fick	Fick原理 Fick原理	金标准,存在分流时也可靠 实用常规动脉和中心静脉 导管即可	需要采集混合静脉血 仅适用于插管患儿,潮气量过低 不可行,受肺内分流影响
指示剂 稀释 肺动脉 热稀释 (PATD)	在右心房注射冷流体后,通过用 热敏电阻尖端肺动脉导管 (PAC)测量下游血液温度的 变化,可以获得指示剂 稀释曲线	成人广泛使用,准确可靠,可以 提供额外的血流动力学参数	儿童PAC型号有限,最小型号为5F, 适用于10 kg及以上患儿, 受分流影响
经肺热稀释 (TPTD)	3~5 ml的等渗盐水(冷或室温) 作为指示剂并通过中心静脉 导管注射,通过位于股动脉 中的热敏电阻导管检测。 通过血液温度,注射温度, 注射体积,热稀释曲线下 面积和校正因子,使用改进 的Stewart-Hamilton方程 测量实际心输出量,随后 通过软件分析动脉脉搏 轮廓(波形),得出连续 心输出量	数据准确性与PATD相似,创伤 较PATD小,部分学者认为是 儿科心输出量监测的金标准 配合脉搏轮廓(波形)分析可 得出连续心输出量,可提供 额外的血流动力学参数	新生儿不建议使用,受分流影响,重复 测量会影响液体平衡;非均匀灌注 肺中可能的指示剂丢失造成 数据不准确 脉搏轮廓分析可能受到动脉顺应性、 血管收缩、舒张影响造成数据有 误差,需再次用TPTD校准
锂稀释	附着在外周动脉导管上的锂 离子传感器用于检测已知 静脉内注射的锂离子量。 通过锂浓度-时间曲线 得出心输出量	使用常规导管,分析动脉脉搏轮 廓 可以进行连续得到连续心 输出量,提供额外血流 动力学参数	锂毒性,需要抽血,重复测量次数有 限; 不能与非去极化肌肉松弛剂共用; 在低钠血症期间不可靠;受分流 影响的结果;需要重复校准
超声心 动图	多普勒效应的频谱分析将产生 速度-时间波形。速度-时间 曲线下面积给出了行程距离, 它是一列血液在规定的时 间段内行进的距离,也称为 速度-时间积分(VTI)。如果 血管速度-时间积分和血管的 横截面积(CSA)是已知的, 则可以计算通过血管(例如 主、肺动脉)的每搏量。将每 搏量乘以心率将导致心输 出量值	经胸超声心动图(TTE):无创, 经食道超声心动图(TEE): 微创;可评估多项心脏参数, 评估心内、心外分流	VTI测定高度依赖操作员,需要规范培 训, 不同的人员由于评估VTI和CSA以 及 声波角度可有不同,可导致数据不 准确 <3 kg新生儿不能耐受TEE
胸部电 阻抗	胸部血容量的脉冲变化将引起 胸部电阻抗的变化。心脏 收缩期间阻抗的变化与心输 出量成正比。心脏收缩期间 阻抗的降低是由血容量增加, 血流速度增加和红细胞排列 引起的。	无创	电极位置或接触的改变,心率不规则 和 组织含水量的急剧变化可导致 数据不准确

适用于儿童的PiCCO热稀释导管外径为3F(3F=1 mm)或4F,对于近青春期的青少年可选择5F。即便如此,对于新生儿而言,3F的导管仍会影响远端

肢体的血供^[22],临床应用经验有限。即便该中心有非常丰富的PiCCO导管放置经验以及能够及时发现远端肢体缺血,置管前也应谨慎评估风险/收益

比^[23]。除新生儿外, PiCCO 监测可适用于几乎所有年龄段患儿, 且被一些学者认为是危重病患儿 CO 监测的金标准^[24]。与 PATD 一样, 不推荐 PiCCO 监测应用于存在心内及大血管水平分流的患儿, 因此对各类姑息手术后的患儿若要监测 CO, 可能需要借助于其他方法。

推荐意见 4: PiCCO 监测能适用于各类双心室生理的非新生儿患儿, 放置导管前, 应充分评估置管风险。

推荐意见 5: 不推荐 PiCCO 监测应用于存在心内及大血管水平分流以及姑息术后、单心室生理的患儿(非开窗 Fontan 术除外)。

四、PiCCO 热稀释导管的放置及留置时间

进行 PiCCO 监测的必要前提是: 放置中心静脉导管以及放置 PiCCO 热稀释导管。首先, 对于动脉置管, 目前适合放置儿童 PiCCO 热稀释导管的动脉仅为股动脉, 对于腋动脉、肱动脉置管没有经验。其次, 对于中心静脉导管, 我们推荐优先选择颈内静脉和锁骨下静脉并使导管尖端尽可能处于上腔静脉近右心房开口, 因这两个部位的导管尖端离右心房最近, 热损失造成的误差较小。有学者认为, 在 PiCCO 热稀释导管所在股动脉的对侧股静脉放置中心静脉导管, 其监测所得 CO 数据与颈内静脉和锁骨下静脉相似, 但所测得的胸腔容积则不然^[25]。不推荐将 PiCCO 热稀释导管和中心静脉导管放置在同一侧股动、静脉, 因为在进行经肺热稀释测定 CO 时, 股静脉内的冷盐水会通过热传导原理传导至股动脉, 影响股动脉内导管温度传感器, 造成数据不准确。

放置 PiCCO 热稀释导管的方法同 Seldinger 法, 推荐无论行中心静脉置管还是动脉置管均采用超声引导下穿刺、置管, 这样可有效提高穿刺置管成功率, 增加患儿安全性^[26]。主要风险在于动脉损伤, 特别是当使用股动脉时, 因为动脉导管的直径大于标准导管, 并且 4F 及以上型号的导管在插入前需要扩张动脉。在包含 514 例患者的多中心前瞻性系列研究中, 最常见的并发症是置入导管后(4.5%)和移除导管后(1.2%)局部小血肿。其他并发症, 如缺血(0.4%)、脉搏消失(0.4%)或股动脉血栓形成(0.2%)均不常见或持续时间短, 可通过移除导管或取栓术解决^[27], 因此, 应谨慎对待这些情况。尽管如此, 我们认为, 与重症患者的其他风险相比, TPTD 技术具有可接受的并发症发生率。

PiCCO 导管最长的使用时间为 10 天, 若导管留

置时间超过 10 天, 需考虑更换置管部位重新置管。在拔除导管时, 同时进行导管血、导管尖端培养及 2 个不同部位外周血培养。拔管后注意局部消毒处理, 穿刺点需压迫 >15 min 防止出血或血肿形成。

推荐意见 6: 推荐股动脉作为 PiCCO 热稀释导管的留置血管, 推荐开放颈内静脉或锁骨下静脉作为冷指示剂注射通道。

推荐意见 7: 若颈内静脉或锁骨下静脉无法建立静脉通道, 可开放 PiCCO 热稀释导管所在股动脉对侧的股静脉作为冷指示剂注射通道。

推荐意见 8: 不推荐在 PiCCO 热稀释导管所在股动脉的同侧股静脉放置中心静脉导管作为冷指示剂注射通道。

推荐意见 9: 推荐在中心静脉置管和动脉置管时采用超声引导穿刺、置管。

五、参数解读

1. 心输出量(心脏指数和脉搏轮廓连续心脏指数)

当首次通过中心静脉导管弹丸式注射多次(一般为 3 次)^[21]一定量的冰生理盐水后(注射过程中会有注射量提示, 推荐注射剂温度为 0~4 ℃), PiCCO 机器会显示每次注水后的 CI 及其平均值, 通过测量动脉血压曲线的脉搏轮廓分析出实时 CI, 即脉搏轮廓(连续)心脏指数(pulse contour cardiac index, PCCI), 正常值为 3.0~5.0 L·min⁻¹·m⁻²。虽然 PCCI 与真实 CI 相关性很好, 但是随着时间推移, 准确性会下降, 所以需要定时进行 TPTD 校准, 以确保 PCCI 的准确性, 我们推荐危重病人每 8 小时校准一次, 血流动力学明显波动时随时校准。在患儿有效血容量负荷充足的情况下, 若 CI < 2.0~2.2 L·min⁻¹·m⁻², 应考虑 LCOS, 并应着手下一步治疗。同时, 评估 CO 应结合患儿的氧耗情况, 行亚低温治疗时, CO 降低并不能代表存在组织缺氧; 而高热时, 即便 CO 正常, 组织缺氧也可能存在, 因此, 可以考虑结合中心静脉血氧饱和度(ScvO₂)或者混合静脉血氧饱和度(mixed venous oxygen saturation, SvO₂)进一步评估 CO 是否能满足机体所需。

推荐意见 10: 推荐每次 TPTD 测定心输出量时, 注射冷指示剂时尽可能快速注射, 每次校准至少进行 3 次, 并取其平均值。

2. 容量指标和容量反应性指标

通过 TPTD 后可以得出全心舒张末期容积指数(global end diastolic volume index, GEDI), 反映舒张末期心脏四个腔的容积及注射部分的上腔静

脉和从主动脉根部至PiCCO导管之间的容积。这也就是为什么GEDI通常大于真实的心脏四个腔容积数值。由于血管容量是相对固定的,因此GEDI在一定程度上反映心脏容积的变化。在脓毒性休克患者中,GEDI随着液体给药而增加,但在多巴酚丁胺给药期间保持不变,尽管CO增加相似^[28],所以有人怀疑GEDI和CO之间存在相关性,因为两个变量都来自相同的热稀释曲线,但临床研究尚未证实这一点^[28-30]。GEDI的成人参考值为680~800 mL/m²,儿童随年龄而有所不同,de la Oliva等^[31]认为,GEDI=488*BSA^{0.388},相关性($r^2=0.93$)。Nusmeier等^[32]认为,0~1岁患儿GEDI中位数为420 mL/m²,1~5岁患儿为510 mL/m²,5~17岁为515 mL/m²。由于结构性心脏病的特殊性,不同疾病的患儿心腔大小差异很大,因此建议在临床使用中注意动态观察GEDI的变化趋势,从而判断患儿心腔容积的变化。

有人认为,心脏预负荷的容量指标(如:GEDI)优于压力指标,如:中心静脉压(central venous pressure, CVP)和肺毛细血管楔压(pulmonary capillary wedge pressure, PCWP),因为有研究指出,与PCWP相比,GEDI与心脏每搏量相关性更好^[33-35]。但如果心室顺应性低,则容量的微小变化引起压力的较大变化,并且容量变化可能低估心脏前负荷的变化。其次,静水压增高的肺水肿(即心源性肺水肿)的风险,其形成直接取决于肺毛细血管和间质之间的静水压力梯度^[36],PCWP对此评估的准确度优于任何容量指标。

应用GEDI的一个限制是它不区分左心还是右心的负荷。在实践中,在右心室扩张的情况下,GEDI增加而左心室前负荷可能是正常的^[37-38]。

如前所述,若注射冷盐水的部位是股静脉,那么GEDI会高估,因为此时的GEDI包括下腔静脉的容量^[39-40]。虽然有相应的换算公式,但是我们不建议将股静脉常规作为注射冷盐水的部位。

机械通气时,在吸气相,由于跨肺压增加,肺静脉内血液被挤入左心房,造成左心前负荷增加,同时由于胸内压增加,左心后负荷降低,左心室CO增加,血压增高,而在呼气相时正好相反。这种每搏输出量的变化和脉压随呼吸周期而发生变化在低血容量的时候较为明显。因此,临床上可用每搏输出量变异(stroke volume variation, SVV)或脉压变异(pulse pressure variation, PPV)判断患儿是否存在容量反应性^[41]。一般认为PPV或SVV>12%患儿具有容量反应性。但是需要注意PPV或SVV的应

用条件,要求患儿潮气量应 ≥ 8 mL/kg,并且不存在自主呼吸以及心律失常。有学者提出,潮气量从6 mL/kg调至8 mL/kg,若PPV增加至少3.5%时,患者存在容量反应性的可能性大^[41-42]。当PPV在9%~13%时,对于容量反应性的预测存在不确定性,被认为是“灰色地带”,此时将潮气量从8 mL/kg调至12 mL/kg后PPV增加也能提示患者存在容量反应性^[43]。由于PPV应用受到潮气量限制,用于急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)患儿时,由于潮气量较小且肺顺应性差,PPV可能出现假阴性^[44-45]。

推荐意见 11: GEDI并不比其他指标更能反应患儿的容量状态以及容量反应性,应结合其他指标(如:PPV、SVV、CVP、PCWP等)及床旁重症超声心动图相应的容量指标来综合判断患儿的容量状态。

推荐意见 12: PPV、SVV可用于容量反应性的判断,但要求患儿无自主呼吸、无心律失常且潮气量 ≥ 8 mL/kg。另外,当患儿存在ARDS时,PPV和SVV可能不适用。

3. 心脏收缩力

通过TPTD可得出两个关于心脏收缩力的指数,即心功能指数(cardiac function index, CFI=CI/GEDI,正常范围4.5~6.5 L/min)以及全心射血分数(global eject fraction, GEF,参考范围:25%~35%)。假设左心室舒张末期容积指数是GEDI的1/4,则GEF=每搏输出量指数/GEDI $\times 4$ 。当然,这是一个粗略的假设,因为所有心腔的体积都不相似。一些研究显示,无论是在动物实验^[46]还是临床试验中^[37-38,47],超声心动图测量的CFI绝对值与左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)之间存在良好的相关性。CFI和GEF的一些特定临界值能准确地检测到低LVEF值^[37-38,46,48]。此外,CFI和GEF的变化与超声心动图LVEF的变化能保持一致^[37-38,48],尤其是在给予正性肌力药物后的变化^[38,48]。

在右心室扩张时,GEF和CFI应用受限。在这种情况下,GEDI增加,CFI和GEF减少,而实际上左心室收缩力不变^[37-38,48]。此外,尽管可以识别阈值以检测低LVEF,但是LVEF和CFI之间的相关性显然不能完美,因为CFI是“全心”收缩功能的标志^[37-38,48]。超声心动图仍然是测量左心室收缩功能最准确的床边技术,具有对心脏结构和功能全面评估的优势。

推荐意见 13: GEF、CFI可反应患儿心脏收缩

力,但不能鉴别左、右心室收缩力下降,超声心动图仍然是测量左心室收缩功能最准确的床边技术,具有对心脏结构和功能进行全面评估的优势。

4. 左心室后负荷

通过脉搏轮廓分析得出的 PCCI 及连续有创血压监测,可计算体循环阻力指数(systemic vascular resistance index, SVRI), $SVRI = \text{平均动脉压}(\text{mean arterial pressure, MAP})/CI$,可反映左心室后负荷。在脓毒症休克及体外循环术后,全身炎症反应可以导致体循环阻力降低甚至血管麻痹,造成分布性休克。根据 SVRI 合理调整血管活性药物,对于目标血压的管理十分重要。由于 PCCI 的准确性会随时间推移,准确性下降,进一步影响 SVRI 的准确性。

相对于 SVRI,动态动脉弹性评估(dynamic arterial elastance, Eadyn)更能反应体循环血管对于血管活性药物及容量的反应。 $Eadyn = PPV/SVV$, de Courson 等^[49]认为, $Eadyn > 0.65$ 的患者在进行扩容后预测 MAP 增加 10% 的敏感度为 76%,特异度为 60%。Guinot 等^[50]认为, $Eadyn < 0.94$ 预测脓毒症休克患者在降低去甲肾上腺素剂量后 MAP 降低 15% 以上的敏感度为 100%,特意为 68%。

5. 血管外肺水指数(extravascular lung water index, ELWI)和肺血管通透性指数(pulmonary vascular permeability index, PVPI)

血管外肺水(extravascular lung water, EVLW)是积聚在间质和肺泡腔中的液体。EVLW 产生的主要机制是肺通透性增加或肺毛细血管压力增加或两者均增加^[42]。由于 EVLW 是静水压增高型肺水肿(即心源性肺水肿)和 ARDS 的主要病理生理模式,因此对于诊断、评估疾病的严重程度和指导治疗策略可能具有非常重要的意义。在 PiCCO 监测中,EVLW 可以通过胸腔内总容积(intrathoracic total volume, ITTV)减去胸内血管容积(intrathoracic blood volume, ITBV)得到。成人参考值为 3~7 mL/kg,儿童根据年龄不同,参考值分别为:0~1 岁患儿 EVLW 中位数为 22 mL/kg、1~5 岁为 11 mL/kg、5~17 岁患儿为 8 mL/kg。使用常温盐水校准时,可能会高估 EVLW^[51]。

与重力测量相比,采用 TPTD 法估测 EVLW 是准确的^[52-54]。在 30 例患者的尸检研究中,TPTD 测量的 EVLW 与重力测定之间的相关系数为 0.90^[55]。TPTD 能够检测支气管肺泡灌洗引起的 EVLW 短期内变化^[54]。使用 TPTD,还可以监测撤机后的

EVLW,有时撤机相关性肺水肿的患者仅在几分钟内可明显增加。在自主呼吸试验过程中,EVLW 升高仅发生于肺水肿的患者。Dres 等^[56]认为以 $ELWI \geq 14\%$ 作为诊断撤机相关性肺水肿的标准,敏感度为 67%,特异性达到 100%。因此,观察自主呼吸试验前后 ELWI 的变化对诊断撤机相关肺水肿很有帮助。

ELWI 也有其局限性,当患者存在胸腔积液时,由于冰盐水的热传递可能扩散至胸腔积液中,造成 ELWI 被高估^[57]。肺栓塞时冰盐水在胸廓内分布量减少,导致 ELWI 被低估^[58]。肺叶切除术后或单肺通气时也会造成 ELWI 不准确^[59-61]。

PVPI 是 ELWI 与肺血管内容积的比值,该比值对于鉴别心源性肺水肿和 ARDS 有一定的意义。一些文献报道,区分两种不同类型的肺水肿 PVPI 的临界值是 3^[62-63]。但由于体外循环以后炎症介质增加,左心室充盈压增加也不能排除肺通透性增加同时存在,我们不能确定体外循环术后早期鉴别 ARDS 和心源性肺水肿时 PVPI 的临界值。随着病情的变化,PVPI 的变化亦会有相应改变,PVPI 趋势增加可能提示肺血管通透性增高。

推荐意见 14: TPTD 测量的 ELWI 与重力测定有良好相关性,能精确识别肺水变化,推荐自主呼吸试验前后进行 TPTD 校准,其 ELWI 的变化对诊断撤机相关肺水肿有一定价值。

推荐意见 15: 胸腔积液、肺栓塞、肺叶切除术后或单肺通气等肺容积减少的情况下,会造成 ELWI 不准确,应注意识别。

推荐意见 16: 虽然 PVPI 可鉴别渗透性肺水肿和心源性肺水肿。但 CHD 体外循环术后的患儿可能并不适用。

虽然 TPTD 及脉搏轮廓分析可监测的血流动力学参数较多,但是其也有一些局限性(表 2),且不能取代其他任何血流动力学监测,比如:超声心动图。即使 TPTD 可提供心肌收缩力参数,但不能区分左心还是右心,而超声心动图能提供丰富的心脏结构和功能的评估。我们推荐在临床医师考虑患儿存在低心排状态、休克时,先进行超声心动图检查,给予初始的治疗后再进行 TPTD 及脉搏轮廓监测。而 TPTD 相对于超声心动图的优点是可以让护士进行热稀释校准,并且可以同时评估多个患者,提供一些超声心动图无法提供的信息,如 EVLW。此外,如果 TPTD 一些参数发生较大变化,也会促使临床医生对患者进行超声心动图检查。

表 2 PiCCO 监测的主要优点和局限性

项目	主要优点	局限性
通过 TPTD 测量 CI	与 PATD 一样可靠	不提供连续测量
通过脉搏轮廓分析测量 CI	连续测量, 短期内且血流动力学波动较小时比较精确	需要定期进行 TPTD 校准
GEDI	提供心脏容量指标, 非压力指标	不区分右心室和左心室 对于心源性肺水肿, 不如 PCWP 更直观
SVV	持续自动评估液体反应性	不能用于自主呼吸、心律失常、小潮气量通气
CFI、GEF	可作为心脏收缩功能降低的预警	在右心室扩张的情况下可能造成左心室收缩功能评估不准确不能精确评估心脏结构和功能
EVLW	直接评估肺水量, 指导肺水肿治疗	肺栓塞、肺水肿、肺切除术后不可靠
PVPI	直接评估肺血管通透性, 区分静水压增高性肺水肿(心源性肺水肿)和渗透性肺水肿 (ARDS)	体外循环术后早期可能造成肺血管通透性增加, 同时合并静水压增加, 临床意义有限

注: TPTD 为经肺热稀释, CI 为心指数, PAPD 为肺动脉热稀释, GEDI 为全心舒张末期容积指数, PCWP 为肺毛细血管楔压, SVV 为每搏输出量变异, CFI 为心功能指数, GEF 为全心射血分数, EVLW 为血管外肺水, PVPI 为肺血管通透性指数, ARDS 为急性呼吸窘迫综合征

推荐意见 17: PiCCO 测量的参数虽然都有标准值, 但更应该关注其变化趋势, 且临床医师对每一个参数都应根据患儿的不同年龄、不同疾病状态, 设定自己的目标值。治疗病人不应以标准值为导向, 而应以自己的目标值为导向。

尽管目前可用于儿童 CO 监测的方法并不多, 但 TPTD 及脉搏轮廓分析可能是最容易实施且较为准确可靠评估患儿 CO 的一种方法。除 CO 外, TPTD 提供了几个指标, 有助于回答临床医生在血流动力学管理过程中常常自我提出的问题。特别是, 它可以估算肺水和肺血管通透性。TPTD 及脉搏轮廓分析能帮助临床医师对最危重和/或复杂病人进行可靠、精确以及全面管理。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

执笔专家: 龚霄雷(上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心)

专家组成员: (按姓氏拼音顺序) 崔彦芹(广州市妇女儿童医疗中心), 龚霄雷(上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心), 韩霞(武汉亚洲心脏病医院), 贺彦(首都医科大学附属北京安贞医院), 洪小杨(中国人民解放军总医院第七医学中心), 梁穗新(深圳市儿童医院), 罗丹东(广东省人民医院), 吕蓓(青岛大学附属青岛妇女儿童医院), 莫绪明(南京医科大学附属儿童医院), 史嘉玮(华中科技大学同济医学院附属协和医院), 王旭(中国医学科学院阜外医院), 徐卓明(上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心), 张浩(上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心), 朱丽敏(上海交通大学医学院附属上海儿童医学中心)

参 考 文 献

[1] Chandler HK, Kirsch R. Management of low cardiac output syndrome following surgery for congenital heart disease [J]. *Curr Cardiol Rev*, 2016, 12 (2): 107-111. DOI: 10.2174/

1573403x12666151119164647.

- [2] Burkhardt BE, Rücker G, Stiller B. Prophylactic milrinone for the prevention of low cardiac output syndrome and mortality in children undergoing surgery for congenital heart disease [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2015, (3): CD009515. DOI: 10.1002/14651858.CD009515.pub2.
- [3] 中国医师协会心脏重症专家委员会. 低心排量综合征中国专家共识 [J]. *解放军医学杂志*, 2017, 42 (11): 933-944. DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.2017.11.01.
- [4] Ceneviva G, Paschall JA, Maffei F, et al. Hemodynamic support in fluid-refractory pediatric septic shock [J]. *Pediatrics*, 1998, 102 (2):e19. DOI: 10.1542/peds.102.2.e19.
- [5] Han YY, Carcillo JA, Dragotta MA, et al. Early reversal of pediatric-neonatal septic shock by community physicians is associated with improved outcome [J]. *Pediatrics*, 2003, 112 (4): 793-799. DOI: 10.1542/peds.112.4.793.
- [6] Cecconi M, De Backer D, Antonelli M, et al. Consensus on circulatory shock and hemodynamic monitoring. Task force of the European Society of Intensive Care Medicine [J]. *Intensive Care Med*, 2014, 40(12): 1795-1815. DOI: 10.1007/s00134-014-3525-z.
- [7] De Backer D, Bakker J, Cecconi M, et al. Alternatives to the Swan-Ganz catheter [J]. *Intensive Care Med*, 2018, 44 (6): 730-741. DOI: 10.1007/s00134-018-5187-8.
- [8] Swan HJ, Ganz W, Forrester J, et al. Catheterization of the heart in man with use of a flow-directed balloon-tipped catheter [J]. *N Engl J Med*, 1970, 283 (9): 447-451. DOI: 10.1056/NEJM197008272830902.
- [9] Ganz W, Donoso R, Marcus HS, et al. A new technique for measurement of cardiac output by thermodilution in man [J]. *Am J Cardiol*, 1971, 27 (4):392-396. DOI: 10.1016/0002-9149(71)90436-x.
- [10] Reuter DA, Huang C, Edrich T, et al. Cardiac output monitoring using indicator-dilution techniques: basics, limits, and perspectives [J]. *Anesth Analg*, 2010, 110 (3): 799-811. DOI: 10.1213/ANE.0b013e3181cc885a.
- [11] Thiele RH, Bartels K, Gan TJ. Cardiac output monitoring: a contemporary assessment and review [J]. *Crit Care Med*, 2015, 43 (1): 177-185. DOI: 10.1097/CCM.0000000000000608.
- [12] Rajaram SS, Desai NK, Kalra A, et al. Pulmonary artery

- catheters for adult patients in intensive care [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2013, (2): CD003408. DOI: 10.1002/14651858.CD003408.pub3.
- [13] Vetrugno L, Bignami E, Barbariol F, et al. Cardiac output measurement in liver transplantation patients using pulmonary and transpulmonary thermodilution: a comparative study [J]. *J Clin Monit Comput*, 2019, 33 (2): 223-231. DOI: 10.1007/s10877-018-0149-9.
- [14] Hilty MP, Franzen DP, Wyss C, et al. Validation of transpulmonary thermodilution variables in hemodynamically stable patients with heart diseases [J]. *Ann Intensive Care*, 2017, 7 (1):86. DOI: 10.1186/s13613-017-0307-0.
- [15] Monnet X, Teboul JL. Minimally invasive monitoring [J]. *Crit Care Clin*, 2015, 31(1): 25-42. DOI: 10.1016/j.ccc.2014.08.002.
- [16] Stetz CW, Miller RG, Kelly GE, et al. Reliability of the thermodilution method in the determination of cardiac output in clinical practice [J]. *Am Rev Respir Dis*, 1982, 126(6): 1001-1004. DOI: 10.1164/arrd.1982.126.6.1001.
- [17] Biais M, Nouette-Gaulain K, Cottenceau V, et al. Cardiac output measurement in patients undergoing liver transplantation: pulmonary artery catheter versus uncalibrated arterial pressure waveform analysis [J]. *Anesth Analg*, 2008, 106(5):1480-1486. DOI: 10.1213/ane.0b013e318168b309.
- [18] Monnet X, Anguel N, Naudin B, et al. Arterial pressure-based cardiac output in septic patients: different accuracy of pulse contour and uncalibrated pressure waveform devices [J]. *Crit Care*, 2010, 14(3):R109. DOI: 10.1186/cc9058.
- [19] Monnet X, Lahner D. Can the "FloTrac" really track flow in septic patients [J]? *Intensive Care Med*, 2011, 37(2):183-185. DOI: 10.1007/s00134-010-2109-9.
- [20] Hamzaoui O, Monnet X, Richard C, et al. Effects of changes in vascular tone on the agreement between pulse contour and transpulmonary thermodilution cardiac output measurements within an up to 6-hour calibration-free period [J]. *Crit Care Med*, 2008, 36(2): 434-440. DOI: 10.1097 / 01. CCM. 0B013E318161FEC4.
- [21] Teboul JL, Saugel B, Cecconi M, et al. Less invasive hemodynamic monitoring in critically ill patients [J]. *Intensive Care Med*, 2016, 42 (9): 1350-1359. DOI: 10.1007 / s00134-016-4375-7.
- [22] de Boode WP. Cardiac output monitoring in newborns [J]. *Early Hum Dev*, 2010, 86(3): 143-148. DOI: 10.1016 / j. earlhumdev.2010.01.032.
- [23] Beurton A, Teboul JL, Monnet X. Transpulmonary thermodilution techniques in the haemodynamically unstable patient [J]. *Curr Opin Crit Care*, 2019, 25(3): 273-279. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000608.
- [24] Tibby S. Transpulmonary thermodilution: finally, a gold standard for pediatric cardiac output measurement [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2008, 9 (3): 341-342. DOI: 10.1097 / PCC.0b013e318172ea56.
- [25] Huber W, Gruber A, Eckmann M, et al. Comparison of pulmonary vascular & permeability index PVPI and global ejection fraction GEF derived from jugular and femoral indicator injection using the PiCCO-2 device: a prospective observational study [J]. *PLoS One*, 2017, 12 (10): e0178372. DOI: 10.1371/journal.pone.0178372.
- [26] Saugel B, Scheeren TWL, Teboul JL. Ultrasound-guided central venous catheter placement: a structured review and recommendations for clinical practice [J]. *Crit Care*, 2017, 21 (1):225. DOI: 10.1186/s13054-017-1814-y.
- [27] Belda FJ, Aguilar G, Teboul JL, et al. Complications related to less-invasive haemodynamic monitoring [J]. *Br J Anaesth*, 2011, 106(4):482-486. DOI: 10.1093/bja/aeq377.
- [28] Michard F, Alaya S, Zarka V, et al. Global end-diastolic volume as an indicator of cardiac preload in patients with septic shock [J]. *Chest*, 2003, 24(5):1900-1908. DOI: 10.1378/chest.124.5.1900.
- [29] McLuckie A, Bihari D. Investigating the relationship between intrathoracic blood volume index and cardiac index [J]. *Intensive Care Med*, 2000, 26(9): 1376-1378. DOI: 10.1007/s001340000600.
- [30] Reuter DA, Kirchner A, Fellinger TW, et al. Usefulness of left ventricular stroke volume variation to assess fluid responsiveness in patients with reduced cardiac function [J]. *Crit Care Med*, 2003, 31(5): 1399-1404. DOI: 10.1097 / 01. CCM.0000059442.37548.E1.
- [31] de la Oliva P, Menéndez-Suso JJ, Iglesias-Bouzas M et al. Cardiac preload responsiveness in children with cardiovascular dysfunction or dilated cardiomyopathy: a multicenter observational study [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2015, 16(1):45-53. DOI: 10.1097/PCC.0000000000000286.
- [32] Nusmeier A, Cecchetti C, Blohm M, et al. Near-normal values of extravascular lung water in children [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2015, 16(2): e28-33. DOI: 10.1097 / PCC. 0000000000000312.
- [33] Goedje O, Seebauer T, Peyerl M, et al. Hemodynamic monitoring by double-indicator dilution technique in patients after orthotopic heart transplantation [J]. *Chest*, 2000, 118(3): 775-781. DOI: 10.1378/chest.118.3.775.
- [34] Kumar A, Anel R, Bunnell E, et al. Pulmonary artery occlusion pressure and central venous pressure fail to predict ventricular filling volume, cardiac performance, or the response to volume infusion in normal subjects [J]. *Crit Care Med*, 2004, 32(3): 691-699. DOI: 10.1097 / 01. ccm.0000114996.68110.c9.
- [35] Huber W, Umgelter A, Reindl W, et al. Volume assessment in patients with necrotizing pancreatitis: a comparison of intrathoracic blood volume index, central venous pressure, and hematocrit, and their correlation to cardiac index and extravascular lung water index [J]. *Crit Care Med*, 2008, 36(8): 2348-2354. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3181809928.
- [36] Staub NC. Pulmonary edema: physiologic approaches to management [J]. *Chest*, 1978, 74(5):559-564. DOI: 10.1378/chest.74.5.559.
- [37] Combes A, Berneau JB, Luyt CE, et al. Estimation of left ventricular systolic function by single transpulmonary thermodilution [J]. *Intensive Care Med*, 2004, 30(7): 1377-1383. DOI: 10.1007/s00134-004-2289-2.
- [38] Jabot J, Monnet X, Boucharl L, et al. Cardiac function index provided by transpulmonary thermodilution behaves as an indicator of left ventricular systolic function [J]. *Crit Care Med*, 2009, 37 (11): 2913-2918. DOI: 10.1097 / ccm.0b013e3181b01fd9.
- [39] Schmidt S, Westhoff TH, Hofmann C, et al. Effect of the venous catheter site on transpulmonary thermodilution measurement variables [J]. *Crit Care Med*, 2007, 35(3): 783-786. DOI: 10.1097/01.CCM.0000256720.11360.FB.
- [40] Saugel B, Umgelter A, Schuster T, et al. Transpulmonary thermodilution using femoral indicator injection: a prospective trial in patients with a femoral and a jugular central venous

- catheter [J]. Crit Care, 2010, 14(3):R95. DOI: 10.1186/cc9030.
- [41] Myatra SN, Prabu SR, Divatia JV, et al. The changes in pulse pressure variation & or stroke volume variation after a "tidal volume challenge" reliably predict fluid responsiveness during low tidal volume ventilation [J]. Crit Care Med, 2017, 45 (3): 415-421. DOI: 10.1097/CCM.0000000000002183.
- [42] Myatra SN, Monnet X, Teboul JL. Use of "tidal volume challenge" to improve the reliability of pulse pressure variation [J]. Crit Care, 2017, 21 (1): 60. DOI: 10.1186 / s13054-017-1637-x.
- [43] Min JJ, Gil NS, Lee JH, et al. Predictor of fluid responsiveness in the 'grey zone': augmented pulse pressure variation through a temporary increase in tidal volume [J]. Br J Anaesth, 2017, 119 (1):50-56. DOI: 10.1093/bja/aex074.
- [44] Monnet X, Bleibtreu A, Ferré A, et al. Passive leg raising and end-expiratory occlusion tests perform better than pulse pressure variation in patients with low respiratory system compliance [J]. Crit Care Med, 2012, 40 (1): 152-157. DOI: 10.1097/CCM.0b013e31822f08d7.
- [45] Liu Y, Wei LQ, Li GQ, et al. Pulse pressure variation adjusted by respiratory changes in pleural pressure, rather than by tidal volume, reliably predicts fluid responsiveness in patients with acute respiratory distress syndrome [J]. Crit Care Med, 2016, 44 (2):342-351. DOI: 10.1097/CCM.0000000000001371.
- [46] Meybohm P, Gruenewald M, Renner J, et al. Assessment of left ventricular systolic function during acute myocardial ischemia: a comparison of transpulmonary thermodilution and transthoracic echocardiography [J]. Minerva Anestesiol, 2011, 77(2):132-141.
- [47] Trepte CJ, Eichhorn V, Haas SA, et al. Thermodilution-derived indices for assessment of left and right ventricular cardiac function in normal and impaired cardiac function [J]. Crit Care Med, 2011, 39(9):2106-2012. DOI: 10.1097/CCM.0b013e31821cb9ba.
- [48] Perny J, Kimmoun A, Perez P, et al. Evaluation of cardiac function index as measured by transpulmonary thermodilution as an indicator of left ventricular ejection fraction in cardiogenic shock [J]. Biomed Res Int, 2014, 2014: 598029. DOI: 10.1155/2014/598029.
- [49] de Courson H, Boyer P, Grobost R, et al. Changes in dynamic arterial elastance induced by volume expansion and vasopressor in the operating room: a prospective bicentre study [J]. Ann Intensive Care, 2019, 9(1):117. DOI: 10.1186 / s13613-019-0588-6.
- [50] Guinot PG, Bernard E, Levrard M, et al. Dynamic arterial elastance predicts mean arterial pressure decrease associated with decreasing norepinephrine dosage in septic shock [J]. Crit Care, 2015, 19:14. DOI: 10.1186/s13054-014-0732-5.
- [51] Huber W, Kraski T, Haller B, et al. Room-temperature vs iced saline indicator injection for transpulmonary thermodilution [J]. J Crit Care, 2014, 29(6):1133.e7-1133.e14. DOI: 10.1016 / j.jcrc.2014.08.005.
- [52] Fernández-Mondéjar E, Rivera-Fernández R, García-Delgado M, et al. Small increases in extravascular lung water are accurately detected by transpulmonary thermodilution [J]. J Trauma, 2005, 59(6): 1420-1423. DOI: 10.1097 / 01.ta.0000198360.01080.42.
- [53] García-Delgado M1, Touma-Fernández A, Chamorro-Marín V, et al. Alveolar fluid clearance in healthy pigs and influence of positive end-expiratory pressure [J]. Crit Care, 2010, 14(2): R36. DOI: 10.1186/cc8914.
- [54] Dres M, Teboul JL, Guerin L, et al. Transpulmonary thermodilution enables to detect small short-term changes in extravascular lung water induced by a bronchoalveolar lavage [J]. Crit Care Med, 2014, 2(8): 1869-1873. DOI: 10.1097 / CCM.0000000000000341.
- [55] Tagami T, Kushimoto S, Yamamoto Y, et al. Validation of extravascular lung water measurement by single transpulmonary thermodilution: human autopsy study [J]. Crit Care, 2010, 14(5):R162. DOI: 10.1186/cc9250.
- [56] Dres M, Teboul JL, Anguel N, et al. Extravascular lung water, B-type natriuretic peptide, and blood volume contraction enable diagnosis of weaning-induced pulmonary edema [J]. Crit Care Med, 2014, 42(8): 1882-1889. DOI: 10.1097 / CCM.0000000000000295.
- [57] Bigatello LM, Kistler EB, Noto A. Limitations of volumetric indices obtained by trans-thoracic thermodilution [J]. Minerva Anestesiol, 2010, 76(11):945-949.
- [58] Schreiber T, Hüter L, Schwarzkopf K, et al. Lung perfusion affects preload assessment and lung water calculation with the transpulmonary double indicator method [J]. Intensive Care Med, 2001, 27(11): 1814-1818. DOI: 10.1007 / s00134-001-1122-4.
- [59] Roch A, Michelet P, D'Journo B, et al. Accuracy and limits of transpulmonary dilution methods in estimating extravascular lung water after pneumonectomy [J]. Chest, 2005, 128(2): 927-933. DOI: 10.1378/chest.128.2.927.
- [60] Kuzkov VV, Suborov EV, Kirov MY, et al. Extravascular lung water after pneumonectomy and one-lung ventilation in sheep [J]. Crit Care Med, 2007, 35(6):1550-1559. DOI: 10.1097/01.CCM.0000265739.51887.2B.
- [61] Haas SA, Trepte CJ, Nitzschke R, et al. An assessment of global end-diastolic volume and extravascular lung water index during one-lung ventilation: is transpulmonary thermodilution usable [J]? Anesth Analg, 2013, 117(1):83-90. DOI: 10.1213/ANE.0b013e31828f2c39.
- [62] Kushimoto S, Taira Y, Kitazawa Y, et al. The clinical usefulness of extravascular lung water and pulmonary vascular permeability index to diagnose and characterize pulmonary edema: a prospective multicenter study on the quantitative differential diagnostic definition for acute lung injury / acute respiratory distress syndrome [J]. Crit Care, 2012, 16(6):R232. DOI: 10.1186/cc11898.
- [63] Monnet X, Anguel N, Osman D, et al. Assessing pulmonary permeability by transpulmonary thermodilution allows differentiation of hydrostatic pulmonary edema from ALI / ARDS [J]. Intensive Care Med, 2007, 33(3): 44-53. DOI: 10.1007/s00134-006-0498-6.
- [64] Monnet X, Marik P, Teboul JL. Prediction of fluid responsiveness: an update [J]. Ann Intensive Care, 2016, 6 (1): 111. DOI: 10.1186/s13613-016-0216-7

(收稿日期:2020-2-15)

(本文编辑:邹长虹 王茜)