

· 综述 ·

近红外光谱监测在儿童体外膜肺氧合中的应用及研究进展



全文二维码

王丽 彭卫

南京医科大学附属儿童医院心胸外科, 南京 210019

通信作者: 彭卫, Email: pwking@sina.com

【摘要】 体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)作为针对循环、呼吸功能衰竭的有效支持技术,近年来在儿童中应用越来越广泛。但使用 ECMO 支持的患儿脑、肾、胃肠、肢体等组织损伤的发生率仍然较高。ECMO 治疗期间,各种传统血流动力学监测方法受到一定限制。近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)技术作为一种无创、实时、连续的监测方法,可以监测局部组织氧饱和度(regional oxygen saturation, rSO_2)的变化,进而评估组织灌注、代谢及氧供需平衡,成为潜在组织损伤的早期监测指标。本文就 NIRS 技术在儿童 ECMO 治疗中的应用现状进行综述,以期临床通过 NIRS 技术监测 ECMO 治疗患儿早期病情变化提供参考。

【关键词】 谱学; 近红外线; 体外膜氧合作用; 血液动力学监测; 病人病情; 儿童

基金项目:江苏省妇幼保健协会科研项目(FYX202201)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202306030-016

Applications and advances of near-infrared spectroscopy for monitoring perfusion during extracorporeal membrane oxygenation

Wang Li, Peng Wei

Department of Cardiothoracic Surgery, Children's Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210019, China

Corresponding author: Peng Wei, Email: pwking@sina.com

【Abstract】 As an effective support technique for circulatory/respiratory failure, extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) has been gaining popularity for children in recent years. However, the incidence of brain, kidney, gastrointestinal tract and extremity damage remains high in ECMO-supported patients. Various traditional hemodynamic monitoring modalities are limited during ECMO support. Near-infrared spectroscopy (NIRS), a non-invasive, real-time and continuous monitoring mode, can monitor the changes of regional oxygen saturation (rSO_2), timely assess tissue perfusion, metabolism and oxygen supply and demand balance. It may be employed as a potential early indicator of tissue injury. This review summarized current application status of NIRS during ECMO. Early disease changes of patients may be monitored through NIRS, thereby guiding treatments and improving the outcomes of patients.

【Key words】 Spectroscopy; Near-Infrared; Extracorporeal Membrane Oxygenation; Hemodynamic Monitoring; Patient Acuity; Child

Fund program: Scientific Research Project of Jiangsu Provincial Association of Maternal and Children's Health (FYX202201)

DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202306030-016

体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)技术是指将体内循环血液引流至体外膜肺装置中,氧合后再回输入体内;根据使用目的和插管位置的不同,可分为静脉-静脉型(venovenous ECMO, V-V ECMO)及静脉-动脉型(venoarterial ECMO, V-A ECMO);临床上多应用于心源性休克、低氧血症、呼吸衰竭、心肺复苏等,为患者提供呼吸、循

环支持^[1]。随着机械循环支持技术的发展,ECMO 的应用已拓展到一些更为复杂的疾病,如儿童先天性心脏病(congenital heart disease, CHD)。据报道,在所有接受心脏手术的儿童中,有高达 2%~5% 的患儿术后需要 ECMO 提供心脏支持^[2]。与成人不同的是,儿童体重和血容量变化大,ECMO 支持的临床管理存在一定的挑战。在 ECMO 支持期间,各种

传统血流动力学监测方法的应用受到限制,如血压不能充分反映 ECMO 非搏动血流情况下局部微循环的氧合状态,而用来监测体循环氧平衡异常的静脉氧饱和度 (vascular oxygen saturation, SvO_2)、乳酸 (lactic acid, Lac) 等血气分析指标,需要频繁采集血液,可能导致贫血且无法实时监测^[3]。近红外光谱 (near-infrared spectroscopy, NIRS) 技术作为一种非侵入性血流动力学监测手段,具有无创、实时、准确等生理学评估潜力^[4-5]。目前 NIRS 已广泛应用于监测多种组织,如脑、肾、胃肠、肢体等的血流灌注,已被体外生命支持组织 (extracorporeal life support organization, ELSO) 推荐为 ECMO 支持期间的常规监测工具之一^[6]。目前, NIRS 在 ECMO 支持儿童中应用的相关参考指标尚未达成共识。本文就 NIRS 在儿童 ECMO 治疗期间的应用及研究现状进行综述。

一、NIRS 概述

(一) 应用原理

NIRS 基于氧合血红蛋白 (HbO_2) 和还原血红蛋白 (HHb) 光吸收系数的差别,以改良朗伯-比尔定律 (Beer-Lambert law) 及光散射理论为基础,通过测得 HbO_2 和 HHb 的相对比例,从而计算出局部组织氧饱和度 (regional oxygen saturation, rSO_2), rSO_2 的计算公式为: $rSO_2 = [HbO_2 / (HbO_2 + HHb)] \times 100\%$ ^[7]。

NIRS 监测的 rSO_2 并非动脉或静脉的 HbO_2 浓度,而是混合 rSO_2 , 主要代表静脉 HbO_2 浓度 (静脉 75%、动脉 25%)。其在动脉搏动较弱、血压较低、体外循环 (cardiopulmonary bypass, CPB)、深低温、停循环等情况下的使用不受限制,可灵敏反映局部组织供血情况,同时侧面反映全身灌注情况。

(二) 发展史

1977 年, Jöbsis^[8] 实现了近红外光 (700 ~ 1 000 纳米) 检测活体组织氧合状态的独特能力, 利用光透过组织来确定完整的猫脑和大鼠心脏细胞色素 c 氧化酶的氧化状态。1986 年, Brazy 和 Lewis^[9] 首次将其应用于早产患儿的床边脑氧合监测。1991 年, Greeley 等^[10] 最先报道利用该技术监测 CHD 手术中脑氧合和血流动力学情况。1993 年, 脑血氧饱和度监测仪器在美国上市。我国于 2005 年成功研制近红外组织血氧参数无损检测仪, 并将其应用于临床。目前, NIRS 技术被广泛用于心脏手术、新生儿重症监护室、各种高风险手术以及其他重症监护室, 通过监测脑、肾、胃肠道等部位的 rSO_2 来评估重要脏器的功能。

(三) 参考值

到目前为止, NIRS 监测的参数指标尚无明确、统一的标准。有研究显示, 出生后 2 ~ 3 d 的新生儿脑氧饱和度 (cerebral regional oxygen saturation, $CrSO_2$) 为 77.9%^[11]。健康婴儿 $CrSO_2$ 为 $(64 \pm 5)\%$ ^[12]。健康儿童和非紫绀型 CHD 儿童 $CrSO_2$ 基础值为 $(68 \pm 10)\%$, 与正常动脉血氧饱和度 (arterial oxygen saturation, SaO_2) 相差约 30%^[13]。紫绀型 CHD 特别是左心发育不良综合征患儿, $CrSO_2$ 的基线值较低 ($46\% \sim 57\%$), SaO_2 和 $CrSO_2$ 之间的差异较大。体-脑氧饱和度差值在健康状态下通常为 $10\% \sim 20\%$, 但随着有限的系统血流

的重新分配, 体-脑氧饱和度差值接近 0 或负值^[14]。

McNeill 等^[15] 研究发现, 在健康早产儿中, 出生后第 1 周 $CrSO_2$ ($66\% \sim 83\%$) 和肾氧饱和度 (renal regional oxygen saturation, $RrSO_2$, $64\% \sim 87\%$) 稳定且同步下降, 而腹氧饱和度 (mesenteric regional oxygen saturation, $MrSO_2$, $32\% \sim 66\%$) 的变化在此期间不太一致。一项针对健康新生儿和早产儿的小型研究指出, $RrSO_2$ 的基础值为 $86.8\% \pm 8.1\%$, 在出生后 120 h 内, 平均 $CrSO_2$ 下降, 而 $RrSO_2$ 保持相对不变; 在喂养期间, $CrSO_2$ 略有下降, $RrSO_2$ 无变化, 而体-脑氧饱和度差值略有增加^[11]。

二、NIRS 在 ECMO 治疗期间的应用

截至目前, NIRS 多用于成人 ECMO 患者以监测局部组织 rSO_2 , 从而评估中枢神经系统和远端肢体缺血的预后, 但在其他器官中的监测以及儿童 ECMO 治疗中的应用研究相对较少。

ECMO 支持期间, 当患儿因心力衰竭导致低心排出量时, 由于脑血管具有自动调节机制, 可通过舒张血管以耐受一定范围内的低灌注压、低氧, 从而维持相对稳定的脑血流灌注。因此 $CrSO_2$ 急剧下降可提示低灌注压、低氧已超过脑血管的自动调节能力, 此时机体可能处于如心包压塞、血胸或气胸等危急状态。Hoffman 等^[16] 研究了 194 例左心室发育不全综合征患儿于病情初步缓解后的血液动力学指标, 结果表明, 术后 6 h 的 NIRS 测量结果可以预测早期死亡率和 ECMO 的应用时机, 认为术后早期 $CrSO_2$ 可指导定向干预以改善预后。

外周 VA-ECMO 的并发症包括股动脉插管时下肢血流受阻、动脉损伤和栓塞等, 可导致低灌注和缺血性损伤^[17]。诊断肢体缺血的传统方法是定期进行临床检查和多普勒超声检查, 但这无法实时、连续地反映病情进展。临床上可以通过在肢体放置 NIRS 监测探头, 来测量外周血氧饱和度 (peripheral regional oxygen saturation, $PrSO_2$), 从而实时监测肢体血液灌注, 以确保足够的血流量^[18]。

临床上通常通过在脐周放置近红外传感器来监测 $MrSO_2$, 无论是单独使用还是与 $CrSO_2$ 联用, 都有可能提供更多有用的临床信息, 因此越来越受到临床医师的关注^[19]。例如, 由于肾脏在维持血压和控制全身组织灌注方面发挥着重要作用, 因此监测 $RrSO_2$ 有助于识别低心输出量状态, 而传统的监测手段或单独使用 $CrSO_2$ 监测可能会遗漏这种状态^[20]。也有一些研究专注于胃肠道 rSO_2 的测量, 发现 NIRS 在诊断胃肠道特定疾病过程 (如坏死性小肠结肠炎) 方面有一定的作用^[21]。多位点 NIRS 监测可以更早发现组织灌注的变化, 因此更具优势。

(一) $CrSO_2$ 监测

截至目前, 关于 CHD 围手术期 $CrSO_2$ 的危险阈值仍没有达成共识。“去饱和”概念被定义为 $CrSO_2$ 绝对值 $< 50\%$ 或相对基线下降超过 20% , 是脑损伤及不良预后的临界值。其与认知能力下降、额叶损伤、脑卒中的发生率增加、脑电图沉默、机械通气和住院时间延长相关^[22-23]。Kurth 等^[24] 发

现,新生仔猪出现 CrSO_2 危险阈值(CrSO_2 为 35%)的时间窗为 2 h,随着时间的延长,异常神经行为结果和神经损伤呈线性增加。另一组研究人员在维持仔猪 CrSO_2 值为 30%~40%时,观察到脑电图活动完整而线粒体功能障碍的证据,并注意到当 $\text{CrSO}_2 < 30\%$ 持续 30 min 时,脑电图功率显著下降、海马组织受损^[25]。由于没有进行过类似的临床研究,目前尚不清楚人类可耐受大脑去饱和的严重程度和持续时间。在一项针对 CHD 术后婴儿的前瞻性观察评估中,Dent 等^[26]发现,约 73% 的研究对象于术后出现新的或恶化的磁共振成像改变,其中最典型的是白质异常;并且发现这些新的或恶化的病变与 CrSO_2 下降时间延长相关($\text{CrSO}_2 < 45\%$ 超过 180 min)。另有研究表明,当新生儿 $\text{CrSO}_2 < 40\%$ 的时间超过 30 min 时,会发生显著的神经损伤^[27]。

在接受 ECMO 治疗的所有年龄段儿童中, CrSO_2 相对基线下降超过 20% 与不良结局有关,而 CrSO_2 超过 80% 提示患儿预后良好^[23]。NIRS 监测可纳入多模式神经监测中,以评估与小儿 ECMO 相关的脑损伤风险。有研究纳入了 8 例接受 V-A ECMO 的患者,在 ECMO 开始后 12 h 内进行连续 CrSO_2 监测,直至撤离 ECMO,结果显示,死亡患儿 $\text{CrSO}_2 < 60\%$ 的时间更长, CrSO_2 波动范围更大^[28]。上海儿童医学中心开展的一项回顾性研究,针对 55 例 V-A ECMO 支持患儿的血流动力学和实验室参数,进行多变量 Logistic 回归分析,结果显示,ECMO 启动后 36 h ($OR = 0.945, P = 0.049$) 和 48 h ($OR = 0.919, P = 0.032$) 的 CrSO_2 与死亡率有关^[29]。

但由于个体间稳态变异较大,测量结果存在动态误差,NIRS 可能无法提供精确的 CrSO_2 测量值,因此临床应把重点放在趋势监测上^[30]。

(二) PrSO_2 监测

目前,脉搏血氧仪已被作为常规监测手段,并成为测量 SaO_2 的标准^[31]。使用脉搏血氧仪进行测量时需要足够的搏动血流或良好的灌注,故而在 ECMO 产生非搏动血流的情况下应用受限。任何生理状态下,NIRS 监测均能捕捉到组织中所有血液,包括动脉、毛细血管和静脉微循环中的血液。

通过股动脉外周插管进行 V-A ECMO 的患儿容易影响下肢的血液灌注,导致急性肢体缺血,发生率高达 52%^[32]。使用连续 NIRS 监测来指导远端灌注导管(distal perfusion catheter, DPC)的选择性插入,可能是一种有效的干预措施,可以重建缺血肢体的血流,从而使需要手术干预的缺血事件的发生率降低^[33]。

有学者在一项纳入了 427 例 V-A ECMO 患者的研究中发现,静脉并发症的发生率为 27%,动脉并发症的发生率为 37%,主要是缺血,其次是出血、动脉夹层和筋膜室综合征,部分患者可能面临外周血管手术甚至截肢的风险。通过分析未插管下肢和插管下肢之间 rSO_2 的差异发现,NIRS 监测对于识别下肢严重缺血风险至关重要^[34]。有研究人员使用 NIRS 对 25 例接受股 V-A ECMO 支持的患者进行了监测,发现其中 6 例存在明显的下肢缺血,且下肢 rSO_2 均 $< 50\%$ 的持续时间超过 4 min,但 ECMO 流量大小可能影响结果的准

确性^[35]。当怀疑有缺血时,连续 NIRS 监测可以快速诊断血管痉挛或血栓形成。在 V-A ECMO 植入时进行 NIRS 监测,还可以确认再灌注插管在股动脉中的位置是否正确^[36]。另有研究表明,NIRS 或可指导调整 ECMO 流量,帮助患者早日脱离 ECMO 支持^[37]。

但目前关于 PrSO_2 监测的应用研究多见于成人,有学者在儿童中进行探索,发现 PrSO_2 的长期 NIRS 监测是可行的,但其效果尚需进一步研究来验证^[18]。

(三) RrSO_2 监测

由于目前急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)的标志物在不可逆转的损伤发生后 12~48 h 才会发生变化,而远在此之前发生的氧合变化可能代表了一个治疗窗口,此时特定的临床监测手段可以指导治疗,从而逆转或预防损伤。临床上可以通过将 NIRS 探头放置于第 10 胸椎至第 2 腰椎椎体中线侧后方(肾区体表投影位置)来对 RrSO_2 进行连续监测,从而达到早期发现肾脏血流变化的目的。

在一项纳入了 59 例 CHD 术后患儿的病例对照研究中,Ruf 等^[38]将 RrSO_2 阈值定义为 $\text{RrSO}_2 < 65\%$ 或 RrSO_2 与术前基线值相比下降超过 25%,发现在术中以及术后 12、24 和 48 h 的 RrSO_2 测量中,与肾功能正常的患儿相比,发生 AKI 的患儿 RrSO_2 测量值明显较低。有研究人员对 57 例行体外循环手术、体重 $> 2.5 \text{ kg}$ 且年龄 ≤ 1 岁的 CHD 患儿,采用 NIRS 监测术后 48 h 内脑、肠、肾 rSO_2 ,结果显示,发生 2 级及以上 AKI 的患儿肠 rSO_2 和肾 rSO_2 均低于未发生 2 级及以上 AKI 的患儿,表明肠、肾 rSO_2 不仅对术后 AKI 的发生有较好的预测作用,而且对 AKI 的严重程度也有较好的预测效能^[39]。 RrSO_2 的 NIRS 监测对于评估各种治疗干预措施在保护肾脏功能和减少 AKI 对患儿的影响方面至关重要。

因心肺功能衰竭而接受 ECMO 治疗的患儿通常有局部组织血流发生重大变化的风险,包括流向肾脏的血流。NIRS 已被证明对 ECMO 支持患者的肾脏灌注敏感, $\text{RrSO}_2 > 76\%$ 预示尿量充足,且 RrSO_2 随着患儿尿量的减少和平均动脉压(mean arterial blood pressure, MAP)的降低而降低^[20]。在 RrSO_2 水平下降后进行干预,可以改善尿量,从而避免更严重的肾脏损伤。目前仍需要对 ECMO 支持患儿进行更多的前瞻性研究,以确定肾脏 NIRS 监测对于预防肾脏损伤的潜在作用。

(四) MrSO_2 监测

对于体型适当的患儿,将 NIRS 探头放置于脐部水平或以下的前腹壁上,可用于监测肠系膜上动脉血管床的区域氧合,以评估胃肠道功能^[40]。

Patel 等^[41]研究发现, $\text{MrSO}_2 \leq 56\%$ 与新生儿坏死性小肠结肠炎发生风险显著增加独立相关。Stienstra 等^[42]研究发现,临床确诊为肠缺血与健康患者的 MrSO_2 分别为 15%~29% 和 45%~93%,差异具有统计学意义($P < 0.05$)。Kaufman 等^[40]在单心室或双心室婴儿腹部测量的 MrSO_2 ,与胃黏膜内的 pH 值(pHi)以及乳酸(Lactate, Lac)和全身混合静脉氧饱和度有很强的相关性。该研究也表明,在氧合和灌注的系统指数方面,前腹壁的 rSO_2 测量值较侧腹壁的 rSO_2 相关

性更强。一项前瞻性对照研究发现, MrSO_2 的降低可能与胃肠功能障碍的发生有关^[43]。

以上研究表明, NIRS 可以简单、即时、无创测量 MrSO_2 , 帮助临床医师更早期发现胃肠功能障碍, 或可指导危重患儿肠内营养的时机, 但未来仍需大样本量的前瞻性研究来证实其临床应用价值, 并明确其危险阈值。

(五) 多位点近红外光谱监测的应用

多位点 NIRS 监测是指除大脑以外, 还在其他部位(肾脏、骨骼肌、胃肠、肝脏等)放置近红外传感器^[44]。目前出血性休克期间的区域循环调节已被近红外系统证明, 并构成多部位或双部位 NIRS 评估系统灌注的基础^[45]。心输出量减少最初会导致体表灌注量减少, 从而使躯体组织氧饱和度(somatic regional oxygen saturation, SrSO_2)下降, 因此可以进行更早的诊断和干预。如前所述, 随着有限的全身血流的重新分配和脑循环的调节, 体-脑氧饱和度差值($\text{SrSO}_2 - \text{CrSO}_2$)会由 10%~20% 下降至接近 0 或变成负值^[14]。由于近红外的穿透深度有限, NIRS 在测量 10~20 kg 以上患儿的肾脏、肠道和肝脏 rSO_2 方面的价值有待商榷^[46]。目前大多数已发表的研究是在新生儿和婴儿群体中进行的, 他们的脏器血管床位置相对较浅, 可以用 NIRS 来测量 SrSO_2 ^[47]。

Amigoni 等^[48]的研究中, 纳入了 25 例需在体外循环(cardiopulmonary bypass, CPB)下进行 CHD 矫治术的患儿(<5 岁), 术中连续监测 4 个部位的 rSO_2 (大脑、肾脏、肝脏和肌肉), 在 CPB 开始之前, CrSO_2 已经低于基础值水平。此外, 在对 4 个记录区域的氧合趋势进行比较发现, 在除 CPB 的其余手术阶段, CrSO_2 与 SrSO_2 存在不同趋势: CrSO_2 上升非常缓慢, 没有达到基础值; 而 SrSO_2 在开始 CPB 后逐渐上升。肌肉 rSO_2 比肾脏和肝脏 rSO_2 上升晚(CPB 的中间阶段), 提示在肌肉组织中测量的 rSO_2 值可能是评估患者整体灌注是否充分的敏感指标。评估多位点 NIRS 作用的有力证据是一项针对接受一期姑息治疗的 HLHS 新生儿的研究, 在术后 6 h 内, CrSO_2 和 SrSO_2 的变化可以预测早期死亡率和 ECMO 的时机^[16]。在术后 48 h 内, $\text{SrSO}_2 - \text{CrSO}_2 < 10\%$ 与发生休克的概率增加有关, 而该值为 0 或负值时死亡风险增加^[14]。

上述研究在某种程度上证明了多位点 NIRS 监测可以更早发现患者病情变化, 从而早期预防不良结局的发生; 但均是基于对 CPB 下 CHD 矫治术患儿的研究, 且多集中于新生儿, 此类患者与接受 ECMO 支持的患者有着不同的血流动力学及病理生理学基础, 能否将该研究结论应用于接受 ECMO 的其他年龄段患者仍需进一步证实。

另一项回顾性研究分析了接受 V-A ECMO 支持患者的 $\text{CrSO}_2/\text{PrSO}_2$ 和血流动力学变量之间的关系, 结果显示, PrSO_2 与总循环指数(total circulatory index, TCI)、全身血管阻力指数(systemic vascular resistance index, SVRI)和 MAP 之间存在明显的关联; CrSO_2 与 TCI 和 SVRI 之间也存在明显的相关性, 但与 MAP 无相关性^[5]。该研究结果表明, CrSO_2 尤其是 PrSO_2 可用于无创估计和监测接受 ECMO 患者的整体循环状态。Vranken 等^[49]回顾性分析外周 V-A ECMO 支持患

者的 $\text{CrSO}_2/\text{PrSO}_2$ 发现, 存在房颤、室颤时 CrSO_2 下降, 在股动脉插管后, PrSO_2 上升。表明 NIRS 可以充分反映影响脑和肢体灌注的事件, 帮助监测 ECMO 辅助患者的组织灌注。

rSO_2 作为远端肢体和脑缺血的潜在早期标志物, 可实时反映血流动力学变化。然而, 关于 NIRS 在 ECMO 支持患儿中应用的文献仍然很少, 需进一步研究证实 rSO_2 在 ECMO 期间的作用, 进而探索其能否指导 ECMO 流量的调整。

三、 rSO_2 测量的影响因素

目前 rSO_2 值既不统一也无标准可循, 许多因素影响 rSO_2 测量的准确性, 包括环境因素、患儿因素和仪器因素。①环境因素: 近红外光谱仪对环境中的光污染很敏感。红外光污染的来源包括加热灯、脉搏血氧仪的光线等。此外, 由于汗液、液体、毛发和其它介质支持光从环境中透射到近红外光谱仪的目标监测部位, 因此监测时有必要擦干皮肤, 用不透近红外光的屏障物品覆盖血氧仪探头。可能改变血氧仪准确性的环境因素还有注射血管染料, 如亚甲基蓝和靛蓝卡明, 它们会吸收光子并降低信号强度, 而靛蓝绿则会增加 rSO_2 值^[50]。②患儿因素: 任何与严重贫血、心输出量低、平均动脉压(mean arterial pressure, MAP)低、肺气体交换受损或脑血管狭窄相关的疾病都可能导致供氧不足。内源性色素, 特别是在严重溶血和(或)肝功能障碍情况下积累的胆红素和胆绿素, 都可以干扰 rSO_2 的测量。此外, 降低或改变脑自动调节的疾病(如慢性高血压和糖尿病)、全身麻醉下的某些手术体位(如沙滩椅体位)可诱发脑缺血, 从而影响脑 rSO_2 值^[51]。监测部位水肿、颅骨缺陷或金属板的存在、颅骨缺失或潜在的皮质梗塞, 都会导致与 NIRS 准确测量所需的条件发生重大偏差。最后, 将血氧仪探头放在矢状窦或额窦上可能会改变 NIRS 测量结果。NIRS 在婴幼儿除大脑以外的脏器组织的监测中受限于患儿身高和体重, 且容易受到局部组织和肌肉的影响。当皮肤到器官的距离小于 1.4 cm 时, 监测敏感, 超出时则不够准确^[27]。在 <10 kg 儿童中, 放置在肾脏侧翼上的传感器测量的 rSO_2 与肾静脉和下腔静脉氧饱和度显著相关, 但在 >10 kg 的儿童中则不相关^[52], 这一发现与腹壁厚度的测量结果一致^[46]。理想情况下, 可以用超声波来评估需要监测器官的深度和位置, 以确保最佳的传感器选择和放置。③仪器因素: 近红外光谱仪型号之间的差异对于所获得研究数据的普遍性有明显影响^[53]。大多数近红外光谱设备同时读数时存在明显的偏差, 并且缺乏一致性。在这些研究中, 组织氧合测量并不完全相同, 并且因所选 NIRS 设备而存在差异^[53]。

四、总结与展望

目前针对 rSO_2 监测在 ECMO 支持儿童中应用的报道仅有少量单中心小样本量研究, 缺少随机对照试验研究, 未来尚需大样本量的前瞻性研究来证实其有效性。大多数研究集中于 CrSO_2 监测, 躯体(肾脏、腹部、肢体等) rSO_2 及多位点联合监测可以作为下一阶段的研究重点。此外, rSO_2 监测的参数指标尚无统一标准, 不同的研究往往使用不同的参数来进行比较, 且部分研究应用的参数借鉴于其他疾病的研究,

由于每种疾病有各自的特性,对不同疾病使用相同的标准是否合理尚存在争议。综上,NIRS 监测对 ECMO 支持儿童的治疗及预后具有指导意义,未来还需要大量研究来探究更准确的参数指标以及标准化的干预方案。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Nasr DM, Rabinstein AA. Neurologic complications of extracorporeal membrane oxygenation[J]. J Clin Neurol, 2015, 11(4): 383-389. DOI: 10.3988/jcn. 2015. 11. 4. 383.
- [2] Jenks CL, Raman L, Dalton HJ. Pediatric extracorporeal membrane oxygenation[J]. Crit Care Clin, 2017, 33(4): 825-841. DOI: 10.1016/j.ccc. 2017. 06. 005.
- [3] Zulueta JL, Vida VL, Perisinotto E, et al. Role of intraoperative regional oxygen saturation using near infrared spectroscopy in the prediction of low output syndrome after pediatric heart surgery[J]. J Card Surg, 2013, 28(4): 446-452. DOI: 10.1111/jocs. 12122.
- [4] Krishnan S, Schmidt GA. Hemodynamic monitoring in the extracorporeal membrane oxygenation patient[J]. Curr Opin Crit Care, 2019, 25(3): 285-291. DOI: 10.1097/MCC. 0000000000000602.
- [5] Ostadal P, Kruger A, Vondrakova D, et al. Noninvasive assessment of hemodynamic variables using near-infrared spectroscopy in patients experiencing cardiogenic shock and individuals undergoing venoarterial extracorporeal membrane oxygenation[J]. J Crit Care, 2014, 29(4): 690. e11-690. e15. DOI: 10.1016/j.jcrc. 2014. 02. 003.
- [6] Maratta C, Potera RM, van Leeuwen G, et al. Extracorporeal life support organization (ELSO): 2020 pediatric respiratory ELSO guideline[J]. ASAIO J, 2020, 66(9): 975-979. DOI: 10.1097/MAT. 0000000000001223.
- [7] Fallon P, Roberts I, Kirkham FJ, et al. Cerebral hemodynamics during cardiopulmonary bypass in children using near-infrared spectroscopy[J]. Ann Thorac Surg, 1993, 56(6): 1473-1477. DOI: 10.1016/0003-4975(93)90733-X.
- [8] Jöbsis FF. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters[J]. Science, 1977, 198(4323): 1264-1267. DOI: 10.1126/science. 929199.
- [9] Brazy JE, Lewis DV. Changes in cerebral blood volume and cytochrome aa3 during hypertensive peaks in preterm infants[J]. J Pediatr, 1986, 108(6): 983-987. DOI: 10.1016/s0022-3476(86)80944-1.
- [10] Greeley WJ, Bracey VA, Ungerleider RM, et al. Recovery of cerebral metabolism and mitochondrial oxidation state is delayed after hypothermic circulatory arrest[J]. Circulation, 1991, 84(5 Suppl): III400-III406.
- [11] Bernal NP, Hoffman GM, Ghanayem NS, et al. Cerebral and somatic near-infrared spectroscopy in normal newborns[J]. J Pediatr Surg, 2010, 45(6): 1306-1310. DOI: 10.1016/j.jpedsurg. 2010. 02. 110.
- [12] Franceschini MA, Thaker S, Themelis G, et al. Assessment of infant brain development with frequency-domain near-infrared spectroscopy[J]. Pediatr Res, 2007, 61(5 Pt 1): 546-551. DOI: 10.1203/pdr. 0b013e318045be99.
- [13] Spaeder MC. Near-Infrared spectroscopy monitoring after pediatric cardiac surgery: time for an intervention? [J]. Pediatr Crit Care Med, 2018, 19(5): 496-497. DOI: 10.1097/PCC. 0000000000001504.
- [14] Ghanayem NS, Hoffman GM. Near infrared spectroscopy as a hemodynamic monitor in critical illness[J]. Pediatr Crit Care Med, 2016, 17(8 Suppl 1): S201-S206. DOI: 10.1097/PCC. 0000000000000780.
- [15] McNeill S, Gatenby JC, McElroy S, et al. Normal cerebral, renal and abdominal regional oxygen saturations using near-infrared spectroscopy in preterm infants[J]. J Perinatol, 2011, 31(1): 51-57. DOI: 10.1038/jp. 2010. 71.
- [16] Hoffman GM, Ghanayem NS, Scott JP, et al. Postoperative cerebral and somatic near-infrared spectroscopy saturations and outcome in hypoplastic left heart syndrome[J]. Ann Thorac Surg, 2017, 103(5): 1527-1535. DOI: 10.1016/j.athoracsurg. 2016. 09. 100.
- [17] Bonicolini E, Martucci G, Simons J, et al. Limb ischemia in peripheral veno-arterial extracorporeal membrane oxygenation: a narrative review of incidence, prevention, monitoring, and treatment[J]. Crit Care, 2019, 23(1): 266. DOI: 10.1186/s13054-019-2541-3.
- [18] Schmitz J, Pichler G, Schwaberg B, et al. Feasibility of long-term cerebral and peripheral regional tissue oxygen saturation measurements[J]. Physiol Meas, 2014, 35(7): 1349-1355. DOI: 10.1088/0967-3334/35/7/1349.
- [19] Sood BG, McLaughlin K, Cortez J. Near-infrared spectroscopy: applications in neonates[J]. Semin Fetal Neonatal Med, 2015, 20(3): 164-172. DOI: 10.1016/j.siny. 2015. 03. 008.
- [20] Lau PE, Cruz S, Garcia-Prats J, et al. Use of renal near-infrared spectroscopy measurements in congenital diaphragmatic hernia patients on ECMO[J]. J Pediatr Surg, 2017, 52(5): 689-692. DOI: 10.1016/j.jpedsurg. 2017. 01. 015.
- [21] Reber KM, Nankervis CA, Nowicki PT. Newborn intestinal circulation. Physiology and pathophysiology[J]. Clin Perinatol, 2002, 29(1): 23-39. DOI: 10.1016/s0095-5108(03)00063-0.
- [22] Murkin JM, Arango M. Near-infrared spectroscopy as an index of brain and tissue oxygenation[J]. Br J Anaesth, 2009, 103(Suppl 1): i3-13. DOI: 10.1093/bja/aep299.
- [23] Vedrenne-Cloquet M, Lévy R, Chareyre J, et al. Association of cerebral oxymetry with short-term outcome in critically ill children undergoing extracorporeal membrane oxygenation[J]. Neurocrit Care, 2021, 35(2): 409-417. DOI: 10.1007/s12028-020-01179-9.
- [24] Kurth CD, McCann JC, Wu J, et al. Cerebral oxygen saturation-time threshold for hypoxic-ischemic injury in piglets[J]. Anesth Analg, 2009, 108(4): 1268-1277. DOI: 10.1213/ane. 0b013e318196ac8e.
- [25] Hou XL, Ding HY, Teng YC, et al. Research on the relationship between brain anoxia at different regional oxygen saturations and brain damage using near-infrared spectroscopy[J]. Physiol Meas, 2007, 28(10): 1251-1265. DOI: 10.1088/0967-3334/28/10/010.
- [26] Dent CL, Spaeth JP, Jones BV, et al. Brain magnetic resonance imaging abnormalities after the Norwood procedure using regional cerebral perfusion[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2006, 131(1): 190-197. DOI: 10.1016/j.jtcvs. 2005. 10. 003.
- [27] Booth EA, Dukatz C, Ausman J, et al. Cerebral and somatic venous oximetry in adults and infants[J]. Surg Neurol Int, 2010, 1: 75. DOI: 10.4103/2152-7806. 73316.
- [28] Chen S, Fang F, Liu WJ, et al. Cerebral tissue regional oxygen saturation as a valuable monitoring parameter in pediatric patients undergoing extracorporeal membrane oxygenation[J]. Front Pediatr, 2021, 9: 669683. DOI: 10.3389/fped. 2021. 669683.

- [29] Zhang MJ, Yang YY, Chen X, et al. Application of near-infrared spectroscopy to monitor perfusion during extracorporeal membrane oxygenation after pediatric heart surgery [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2021, 8:762731. DOI:10.3389/fmed.2021.762731.
- [30] Hogue CW, Levine A, Hudson A, et al. Clinical applications of near-infrared spectroscopy monitoring in cardiovascular surgery [J]. *Anesthesiology*, 2021, 134 (5): 784–791. DOI: 10.1097/ALN.0000000000003700.
- [31] Shah A, Shelley KH. Is pulse oximetry an essential tool or just another distraction? The role of the pulse oximeter in modern anesthesia care [J]. *J Clin Monit Comput*, 2013, 27 (3): 235–242. DOI:10.1007/s10877-013-9428-7.
- [32] Schad CA, Fallon BP, Monteagudo J, et al. Routine use of distal arterial perfusion in pediatric femoral venoarterial extracorporeal membrane oxygenation [J]. *Artif Organs*, 2017, 41 (1): 11–16. DOI:10.1111/aor.12861.
- [33] Parrado RH, Cardona M, Garred C, et al. Use of a reperfusion cannula for acute limb ischemia in a patient with carotid artery extracorporeal membrane oxygenation cannulation [J]. *ASAIO J*, 2022, 68 (1): e8–e11. DOI:10.1097/MAT.0000000000001405.
- [34] Fisser C, Armbrüster C, Wiest C, et al. Arterial and venous vascular complications in patients requiring peripheral venoarterial extracorporeal membrane oxygenation [J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 9:960716. DOI:10.3389/fmed.2022.960716.
- [35] Patton-Rivera K, Beck J, Fung K, et al. Using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to assess distal-limb perfusion on venoarterial (V-A) extracorporeal membrane oxygenation (ECMO) patients with femoral cannulation [J]. *Perfusion*, 2018, 33 (8): 618–623. DOI:10.1177/0267659118777670.
- [36] Koszutski M, Mattei M, Maureira JP, et al. Assessment of bedside lower limb angiography combined with continuous NIRS monitoring for the detection of lower limb complications of VA-ECMO: an observational monocentric study [J]. *Crit Care*, 2021, 25 (1): 270. DOI:10.1186/s13054-021-03703-5.
- [37] Chang HH, Chen YC, Huang CJ, et al. Optimization of extracorporeal membrane oxygenation therapy using near-infrared spectroscopy to assess changes in peripheral circulation: a pilot study [J]. *J Biophotonics*, 2020, 13 (10): e202000116. DOI: 10.1002/jbio.202000116.
- [38] Ruf B, Bonelli V, Balling G, et al. Intraoperative renal near-infrared spectroscopy indicates developing acute kidney injury in infants undergoing cardiac surgery with cardiopulmonary bypass: a case-control study [J]. *Crit Care*, 2015, 19 (1): 27. DOI: 10.1186/s13054-015-0760-9.
- [39] 柳立平, 张明杰, 陈曦, 等. 肠和肾血氧饱和度能较好预测小儿先天性心脏病术后急性肾损伤 [J]. *浙江大学学报(医学版)*, 2022, 51 (3): 334–340. DOI:10.3724/zdxbyxb-2022-0069.
- Liu LP, Zhang MJ, Chen X, et al. Prediction value of regional oxygen saturation in intestine and kidney for acute kidney injury in children with congenital heart disease after surgery [J]. *J Zhejiang Univ (Med Sci)*, 2022, 51 (3): 334–340. DOI:10.3724/zdxbyxb-2022-0069.
- [40] Kaufman J, Almodovar MC, Zuk J, et al. Correlation of abdominal site near-infrared spectroscopy with gastric tonometry in infants following surgery for congenital heart disease [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2008, 9 (1): 62–68. DOI: 10.1097/01.PCC.0000298640.47574.DA.
- [41] Patel AK, Lazar DA, Burrin DG, et al. Abdominal near-infrared spectroscopy measurements are lower in preterm infants at risk for necrotizing enterocolitis [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2014, 15 (8): 735–741. DOI:10.1097/PCC.0000000000000211.
- [42] Stienstra RM, McHoney M. Near-infrared spectroscopy (NIRS) measured tissue oxygenation in neonates with gastroschisis: a pilot study [J]. *J Matern Fetal Neonatal Med*, 2022, 35 (25): 5099–5107. DOI:10.1080/14767058.2021.1875429.
- [43] Yao DZ, Wang LJ. Monitoring of gastrointestinal dysfunction by near-infrared spectroscopy in children with sepsis: a prospective study [J]. *Chin J Contemp Pediatr*, 2022, 24 (6): 620–625. DOI: 10.7499/j.issn.1008-8830.2202099.
- [44] Chakravarti SB, Mittnacht AJC, Katz JC, et al. Multisite near-infrared spectroscopy predicts elevated blood lactate level in children after cardiac surgery [J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2009, 23 (5): 663–667. DOI:10.1053/j.jvca.2009.03.014.
- [45] Chaisson NF, Kirschner RA, Deyo DJ, et al. Near-infrared spectroscopy-guided closed-loop resuscitation of hemorrhage [J]. *J Trauma*, 2003, 54 (5 Suppl): S183–S192. DOI:10.1097/01.TA.0000064508.11512.28.
- [46] Balaguru D, Bhalala U, Haghighi M, et al. Computed tomography scan measurement of abdominal wall thickness for application of near-infrared spectroscopy probes to monitor regional oxygen saturation index of gastrointestinal and renal circulations in children [J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2011, 12 (3): e145–e148. DOI: 10.1097/PCC.0b013e3181e8b430.
- [47] Bailey SM, Prakash SS, Verma S, et al. Near-infrared spectroscopy in the medical management of infants [J]. *Curr Probl Pediatr Adolesc Health Care*, 2022, 52 (11): 101291. DOI: 10.1016/j.epeds.2022.101291.
- [48] Amigoni A, Mozzo E, Brugnaro L, et al. Four-side near-infrared spectroscopy measured in a paediatric population during surgery for congenital heart disease [J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2011, 12 (5): 707–712. DOI:10.1510/icvts.2010.253328.
- [49] Vranken NPA, Lindelauf AAMA, Simons AP, et al. Cerebral and limb tissue oxygenation during peripheral venoarterial extracorporeal life support [J]. *J Intensive Care Med*, 2020, 35 (2): 179–186. DOI:10.1177/0885066617735270.
- [50] Ishiyama T, Kotoda M, Asano N, et al. The effects of Patent Blue dye on peripheral and cerebral oxyhaemoglobin saturations [J]. *Anaesthesia*, 2015, 70 (4): 429–433. DOI:10.1111/anae.12932.
- [51] Shaaban-Ali M, Momeni M, Denault A. Clinical and technical limitations of cerebral and somatic near-infrared spectroscopy as an oxygenation monitor [J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2021, 35 (3): 763–779. DOI:10.1053/j.jvca.2020.04.054.
- [52] Ortmann LA, Fontenot EE, Seib PM, et al. Use of near-infrared spectroscopy for estimation of renal oxygenation in children with heart disease [J]. *Pediatr Cardiol*, 2011, 32 (6): 748–753. DOI: 10.1007/s00246-011-9960-5.
- [53] Hessel TW, Hyttel-Sorensen S, Greisen G. Cerebral oxygenation after birth—a comparison of INVOS® and FORE-SIGHT™ near-infrared spectroscopy oximeters [J]. *Acta Paediatr*, 2014, 103 (5): 488–493. DOI:10.1111/apa.12567.

(收稿日期:2023-06-17)

本文引用格式:王丽, 彭卫. 近红外光谱监测在儿童体外膜肺氧合中的应用及研究进展 [J]. *临床小儿外科杂志*, 2024, 23 (6): 595–600. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202306030-016.

Citing this article as: Wang L, Peng W. Applications and advances of near-infrared spectroscopy for monitoring perfusion during extracorporeal membrane oxygenation [J]. *J Clin Ped Sur*, 2024, 23 (6): 595–600. DOI:10.3760/cma.j.cn101785-202306030-016.