

· 综 述 ·

DOI: 10.13498/j.cnki.chin.j.ecc.2021.01.14

近红外光谱在婴幼儿心脏手术围术期的应用及研究进展

章 燕(综述),周荣华(审校)

[摘要]: 近红外光谱(NIRS)技术,作为一个连续、实时、无创的监测手段,已越来越多地应用于婴幼儿心脏手术的围术期,以监测脑、肾等重要脏器的局部组织氧饱和度,反应组织灌注及氧供需平衡,在指导围术期管理、降低婴幼儿心脏术后并发症和死亡率中具有一定的价值。本文回顾近年相关临床研究,介绍 NIRS 的基本原理、影响因素、基础值和临界值,并对 NIRS 在婴幼儿心脏手术围术期的应用进行综述,旨在探讨 NIRS 在婴幼儿心脏手术围术期的临床价值及应用前景,为其进一步的临床研究及应用提供指导依据。

[关键词]: 近红外光谱技术;婴幼儿;心脏手术;脑氧饱和度;心肺转流

Perioperative near-infrared spectrophotometry monitoring in pediatric cardiac surgery

Zhang Yan, Zhou Ronghua

Department of Anesthesiology, West China Hospital of Sichuan University, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Corresponding author: Zhou Ronghua, Email: wr.zhou@hotmail.com

[Abstract]: Near-infrared spectroscopy (NIRS), as a continuous, real-time, and noninvasive monitoring method, has been increasingly applied in the perioperative period of pediatric cardiac surgery. It is a valuable approach to guide perioperative management and reduce postoperative complications and mortality in pediatric patients by detecting regional oxygen saturation in multiple organs (brain, kidney, e.g.) and further reflecting tissue perfusion and oxygen balance. By reviewing related clinical research in recent years, this narrative review is to provide a brief overview of NIRS technology and its influencing factors, and to discuss the normative and critical values of cerebral and somatic tissue oxygen saturation. By presenting the clinical studies of NIRS as a perioperative monitoring method in the pediatric cardiac surgery, we want to introduce the clinical value and prospects of this technology, and then provide guidance for its further clinical research and application.

[Key words]: Near-infrared spectroscopy; Infant; Cardiac surgery; Cerebral oxygen saturation; Cardiopulmonary bypass

先天性心脏病(先心病)是先天性畸形中最常见的一类,发病率高,约占出生活婴的 0.4%~1%。我国是世界上先心病发病率较高的国家之一,发病率可高达 0.9%^[1]。先心病患儿心脏手术后神经系统并发症发生率为 2%~25%^[2],近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)可以监测心脏手术过程中重要脏器局部组织氧饱和度的变化,如局部脑氧饱和度(regional cerebral oxygen saturation, rScO₂),以反映重要脏器的灌注、代谢及氧供需平衡。首先,婴幼儿机体代谢旺盛,对氧的需求比成人高,同时,心肺转流(cardiopulmonary bypass, CPB)中多种因

素,如血液稀释、非生理灌注、紫绀患儿大量侧枝循环、低温及复温、脑血流自主调节功能改变等,直接影响术中脑灌注及脑氧供需平衡,而导致术后神经认知功能障碍;而不合理的高灌注则会导致栓塞、血液破坏,也会增加术后谵妄等神经系统并发症。并且,对于复杂先心病手术,尤其是紫绀型心脏病患儿,术后大多需要较长时间呼吸机辅助,而麻醉过程中镇静、肌肉松弛等情况又能掩盖早期神经系统并发症的表现,因此围术期中的脑组织氧代谢、脑功能监测十分重要。再者, NIRS 监测 rScO₂具有较强的抗干扰能力,脑血流及脑氧供需平衡状态变化能够及时被反映,这对于满足围术期脑灌注,优化麻醉、CPB 及围术期管理方案等具有重要指导意义。本文就 NIRS 在婴幼儿先心病心脏手术围术期的应用

作者单位:610041 成都,四川大学华西医院麻醉科[章 燕(研究生)]

通信作者:周荣华,Email:wr.zhou@hotmail.com

进行综述,旨在探讨 NIRS 在婴幼儿心脏手术围术期的临床价值及应用前景,为其进一步的临床研究及应用提供指导依据。

1 NIRS 监测基本原理

应用 NIRS 监测大脑和心脏局部氧饱和度在 1977 年由 Jobsis^[3] 首次提出。NIRS 技术作为一种新型测量局部血氧饱和度的工具,采用两段波长,分别为 724 nm 和 810 nm 来测量局部血红蛋白(hemoglobin, Hb) 氧含量的变化,以改良朗伯-比尔定律及光散射理论为基础,利用氧合血红蛋白(HbO₂) 和还原血红蛋白含(HHb) 光吸收系数差别,直接测得 HbO₂ 和总 Hb 的比值,从而计算出 HbO₂ 饱和度。NIRS 不同于传统动脉氧饱和度监测;NIRS 有 1 个发射电极及 2 个可以接收不同组织信号的电极。第 1 个接收电极(距离发射电极 3 cm 的位置)可以提供浅表组织的信号,如皮肤、骨骼等脑外组织;第 2 个接收电极(距离发射电极 4 cm 的位置),能够分析深部脑组织的信号。

NIRS 广泛应用于围术期 rScO₂ 的监测,一方面,从 NIRS 所监测的数据来看,可以获得以下信息:①可直接反映脑组织氧合状况;②可反映总 Hb 变化,间接反映脑血流动力学变化;③可反映脑组织细胞对氧的利用过程,由此反映脑组织氧代谢信息。另一方面,由于脑组织微循环由动脉、静脉、毛细血管组成(静脉约占 70%~80%),所以,应用 NIRS 技术监测的 rScO₂ 并非是动脉或者静脉的 HbO₂ 浓度,而是混合的 rScO₂,主要代表静脉部分。因此,在动脉搏动较弱、血压较低、CPB 平流灌注、深低温、停循环等情况下的使用不受限制。

2 rScO₂ 基础值及临界值

rScO₂ 的基础值根据患者人群和 NIRS 仪器的不同而有所不同,具有显著的个体间和个体内差异。健康儿童 rScO₂ 基础值大约为 69%,婴儿约为 64%^[4]。虽然大部分研究发现儿童和婴幼儿 rScO₂ 基础值在 60%~70% 范围内,但有研究报告刚出生 2~3 d 的新生儿其 rScO₂ 高达 77.9%^[5]。然而许多患有先心病的儿童中,rScO₂ 显著低于健康儿童,这可以用解剖和生理因素(紫绀与非紫绀比,存在心室或动脉水平的左向右分流)来解释。紫绀型心脏病患儿 rScO₂ 为 40%~60%,大动脉转位新生儿的 rScO₂ 的基线值可能低于 50%^[6]。在临床应用中,如果患者的 rScO₂ 低于上述正常范围,则应将其视为具有与脑损伤相关的异常基线值。

临界 rScO₂ 值,又称脑缺氧缺血性(H-I) 阈值,低于这一阈值,持续的缺氧和/或缺血将导致神经生理损伤、脑代谢功能障碍和不可逆转的脑组织形态学损伤。对于成人来说,许多研究证明,术中 rScO₂ 下降超过基线值 15%~20% 或 rScO₂ 绝对值低于 50%,提示大脑氧供不足^[7]。与成人不同,尚没有充分临床研究说明儿童脑 H-I 阈值具体是多少。在相关动物研究中,Kurth^[8] 等人发现在新生仔猪中,H-I 阈值为 33%~44%;在一项后续研究中,H-I 阈值(rScO₂ 为 35%)的时间窗为 2 h,超过 2 h,异常神经行为结果和神经损伤呈线性增加^[9]。Hou^[10] 等人发现,高乳酸血症和代谢性酸中毒与 30%~40% 范围的 rScO₂ 相关,虽然脑电图未见明显改变,但存在组织缺血性改变,包括海马线粒体损伤。

3 NIRS 监测 rScO₂ 结果的影响因素

rScO₂ 是反映脑部氧合状况的敏感指标,它的大小取决于脑组织的氧供和氧耗之间的平衡,凡是影响脑灌注、脑代谢及脑氧供/氧耗的因素,都能够影响 rScO₂。NIRS 在临床使用过程中的影响因素较多,特别是在婴幼儿心脏手术围术期,因此,结合患儿的病理生理及 CPB 过程进行综合分析是必要的。作者将从以下三方面探讨影响 rScO₂ 结果的因素。

3.1 脑血流自动调节(cerebral autoregulation, CA) 功能 脑血管可随血压的变化自动调节颅内灌注压,在心脏手术中,当平均动脉压(mean arterial pressure, MAP) 波动于 43~90 mmHg,机体可通过脑血管的自主调节功能,维持正常的脑血流量,即 CA。而当 MAP 变化较大时,脑灌注就会受到影响^[11]。CPB 中的血压应该维持在 CA 的压力范围内,而最佳血压是指具有最佳 CA 功能的血压。然而,Joshi^[12] 等研究显示,CPB 中 CA 下限压力范围很广,且存在广泛的个体变异,很难基于术前人口统计学和血压数据预测。Ono^[13] 等报道,CPB 中 20% 的患者 CA 功能受损;且在复温过程中,受损比例是低温时的两倍。并且,Hoshino^[14] 等回顾分析了 CPB 下行房间隔缺损或室间隔缺损手术患儿,发现 CA 机制在婴幼儿是不成熟的。因此,CPB 中婴幼儿脑灌注更容易受到 MAP 波动的影响。另外,一项观察性前瞻性研究发现低龄儿童在心脏手术中更容易发生由低血压引起的脑缺血^[15]。

3.2 脑的氧供与氧耗 CPB 期间的全身氧供(oxygen delivery, DO₂) 通过泵流量乘以动脉血氧含量来计算,所以泵流量、动脉氧分压(PaO₂)、动脉氧饱和度(SaO₂)、Hb 浓度等变化都直接影响脑的氧供。

CPB 中,膜肺氧合性能下降、灌注流量不足、血液稀释程度过大、大量侧枝循环等因素都会影响脑的氧供,导致 $rScO_2$ 下降。针对婴幼儿 CPB,在膜肺、体外管路及插管的选择、输血指征等方面,既要最大限度地降低预充量,做到节约用血、甚至无血预充,同时也要提供足够的灌注流量、维持合适的血液稀释,以保证患儿安全。对于严重紫绀的婴幼儿,术中大量侧枝循环会影响重要脏器的灌注,应该加强 NIRS 及其它氧代谢指标,如静脉氧饱和度、乳酸(lactic acid, Lac)、 DO_2 及氧耗的监测,从而指导流量及温度管理。而灌注含血心脏停搏液及使用超滤等情况下产生的不可避免的部分分流,也会一定程度地影响机体灌注流量,导致 $rScO_2$ 下降,临床操作上应该通过增加泵流量进行补偿。同时,一项前瞻性研究发现 CPB 前和 CPB 结束早期血流动力学不稳定、且无低温保护,是脑 DO_2 不足的易感期^[16]。因此,在监测 $rScO_2$ 时,要充分考虑不同 CPB 时期泵流量、 PaO_2 、 SO_2 、Hb 浓度对脑氧的影响。有关先天性心脏病后低氧血症原因的研究结果显示,先天性心脏病风险分级评估(RACHS-1)高的患者,术后 $rScO_2$ 降低幅度更明显。而术前存在紫绀、左向右分流的患儿,术中也同样更容易出现低氧合状态^[17]。

另一方面,麻醉深度、体温变化、机体酸碱代谢(pH)和 Lac 以及二氧化碳分压($PaCO_2$)的改变都会影响脑代谢,从而影响脑的氧耗。最显著的是,CPB 复温过程中,尤其是复温过快时, $rScO_2$ 会明显下降,原因为升温导致的脑代谢和脑氧耗增加超过脑血流量增加。针对先天性心脏病患儿的相关研究发现,术中 $rScO_2$ 与体温及 pH 存在负性关系,原因在于体温升高及 pH 降低时,机体脑代谢增强,脑氧供需失衡所致^[18]。在婴幼儿全麻过程中,脑血流量受血 $PaCO_2$ 和 PaO_2 水平的影响,如果存在过度通气,会导致心排量减少,进而导致脑血流减少;有研究表明在患有呼吸窘迫综合症的婴儿中,低 $rScO_2$ 值可能与术前人工通气有关^[19]。而 CPB 中 $PaCO_2$ 水平也会直接影响脑血流,低温下 CO_2 溶解度增加而导致 $PaCO_2$ 下降,而术野冲洗 CO_2 时会导致 $PaCO_2$ 增高,应该适当调整膜肺通气量以增加 CO_2 排出,维持合适的 $PaCO_2$ 。

3.3 其他因素 CPB 中,上腔静脉引流不畅、气栓、血栓也会影响 $rScO_2$ 监测结果。婴幼儿 CPB 心脏手术常应用多位点 NIRS 监测,监测部位及监测时间点会共同影响局部组织氧饱和度,有关研究表明术中及术后 $rScO_2$ 持续低于身体其他部位局部组织氧饱和度^[20]。研究还发现,除了脑组织本身对 $rScO_2$ 的影响,颅外、血管活性药物等因素也能干扰 $rScO_2$ ^[15]。

4 NIRS 在婴幼儿心脏手术围术期应用的临床研究

4.1 与术后中枢神经系统并发症的相关研究 尽管婴幼儿心脏外科及 CPB 技术日趋完善,然而脑卒中、脑损伤、神经认知功能障碍等术后中枢神经系统并发症仍然是其面临的重要挑战。NIRS 在心脏手术围术期的应用最早可追溯到 1995 年, Kurth^[21] 等人发现短暂的深低温停循环与不良的神经功能预后相关,并且脑氧饱和度的降低程度和年龄相关。同时 Austin^[22] 等人首次将 NIRS 应用于儿童 CPB 下心脏手术的多模式神经功能监测,结果显示能显著改善患儿短期及长期的神经功能预后。随后多项研究证实心脏手术围术期 NIRS 监测 $rScO_2$ 确实能够降低患者的中枢神经系统并发症^[23-24]。然而,一项关于先天性心脏病患儿心脏手术治疗的系统评价得出结论^[25],没有证据表明 $rScO_2$ 监测和管理可以改善此类患者人群短期临床神经认知功能方面的结局。关于 NIRS 应用于婴幼儿心脏手术是否能改善神经认知功能预后,目前还需要大样本随机对照临床研究进一步证实。但围术期应用 NIRS 监测 $rScO_2$,可及早发现脑灌注不足并进行及时的干预,进而减少婴幼儿心脏术后神经系统并发症的发生。

4.2 与术后低心排量综合征(low cardiac output syndrome, LCOS)及近期预后的相关研究 LCOS 是婴幼儿复杂型先天性心脏病术后常见的严重并发症,发病率约 25%,也是术后患儿死亡的主要原因^[26-27]。随着 NIRS 监测技术的成熟,临床上越来越多用于预测心脏术后早期 LCOS 状态以及近期预后情况。Zulueta^[26] 等回顾 22 例先天性心脏病,手术发现 9 例发生术后 LCOS 的患儿,其中 $rScO_2$ 持续 $<50\%$,并且这些患儿术后需要更多正性肌力药物、低温治疗以及体外生命支持。随后一项纳入 27 例先天性心脏病患儿的研究显示,11 例术后发生 LCOS 患儿术中的肝脏 NIRS 平均监测数值要低于另外 16 例术后没有发生 LCOS 患儿的监测数值(49% vs. 66%)^[28]。近期的一项关于 NIRS 在危重症婴幼儿中应用的系统评价也报道,NIRS 监测有助于发现 LCOS 并及时进行干预^[27]。但是如果明确 NIRS 监测与 LCOS 的关系,还需要大样本随机对照临床研究来进一步证实。

另一方面,NIRS 监测是否与围手术期转归和近期预后存在相关性,已经在一些研究中得到了证实。Suemori^[29] 等对 399 例先天性心脏病患儿在手术前和手术后采用 NIRS 监测,研究发现术中 $rScO_2$ 低的患儿术后气管拔管时间延迟、ICU 停留时间延长。随后也有研究显示,气管拔管前的 $rScO_2$ 值可作为能否成功

气管拔管的预测因子^[30]。另外,术中持续低 rScO₂可能增加术后死亡率以及复合并发症发生率。由此可见,NIRS 监测能够提供血流动力学或氧代谢损害的早期预警信号,进行早期和快速干预能够预防或减少可能危及生命的并发症。

4.3 与 CPB 目标导向灌注(goal-directed perfusion, GDP)的相关研究 GDP 是近年提出的一种整合各种监测手段的精细化、个体化 CPB 灌注策略^[31],具体是通过监测 CPB 期间氧供指数(indexed oxygen delivery, DO₂i)等氧代谢指标、指导灌注流量及血压管理,而 NIRS 则可以通过直接监测 rScO₂来指导灌注方案。Haydin^[32]等首次将 NIRS 应用于指导灌注流量调节,与血压相比,根据 NIRS 值调节灌注流量可能更准确,更能反映机体氧供状态。随后,关于应用 NIRS 监测脑血流自动调节能力的研究表明,CPB 期间 CA 的 MAP 低限有较大的变化范围(43~97 mmHg),单靠 CA 曲线不能准确预测维持脑血流的最低 MAP,用 rScO₂作为 CPB 时血压控制的靶向指标,可使血压管理更加准确^[11, 33]。最新研究显示,与单纯监测 rScO₂相比,NIRS 衍生的脑血流自动调节指数可能是一种更可靠的脑生理和神经认知预后的指标,脑血流自动调节功能监测引导的灌注压力管理,即所谓的最佳血压是可行的,这种个体化 CPB 血压管理策略可能会改善患者临床预后^[11]。并且,近年来,随着 NIRS 技术在直接测量组织氧合方面的技术进步,能有效减少各种干扰因素的影响,NIRS 监测通过准确反映术中不同阶段的 rScO₂,可敏感地检测到组织缺血缺氧及低灌注阶段。Amigoni 等通过评估 16 位婴幼儿 CPB 缺血缺氧最可能发生的阶段,发现 CPB 前及胸骨切开后 rScO₂波动最大^[34]。将 NIRS 应用于最可能发生缺血缺氧的阶段,来指导灌注流量,可以早期发现 CPB 中组织器官的低灌注状态,并及时进行干预,提高 CPB 质量,改善患者愈后。

4.4 NIRS 监测其它组织氧合 虽然 NIRS 技术多用于监测 rScO₂,但越来越多研究证明 NIRS 可应用于其他组织(如下肢、肾脏、小肠)。近期几项对婴幼儿心脏手术围术期采用 NIRS 监测肾脏氧饱和度(renal oxygen saturation, RSO₂)的小规模临床研究发现,长时间的低 RSO₂与心脏术后急性肾损伤(cardiac surgery associated acute kidney injury, CS-AKI)的发生相关。Ruf^[35]等发现 RSO₂降低与术后 24 h 乳酸升高相关,提示 NIRS 监测 RSO₂可以早期发现患儿血流动力学变化并预测 CS-AKI 的发生。Owens^[36]等对 40 例接受双心室矫治术的婴儿进行

连续 NIRS 监测局部 RSO₂,RSO₂值<50%持续超过 2 h 可预测术后 48 h 内 CS-AKI 的发生。另外,也有研究发现,心脏手术术后发生坏死性肠炎的婴儿,其肠道氧饱和度更低^[37]。尽管许多研究证实 NIRS 在肾、肠等脏器应用的优越性,但脑组织的应用目前还是最为广泛的,与 CPB 中组织低灌注最为相关,而其他组织的应用,例如肾、小肠,由于局部肌肉及组织的干扰,可能并不能显示真正器官的氧合状态^[20]。然而,一项关于 NIRS 在先天性心脏病中应用的综述指出^[27],多位点 NIRS 监测(如 rScO₂联合 RSO₂)可以提高 NIRS 监测全身低灌注的灵敏度、准确度和阳性预测值。由此可见,NIRS 监测不仅可应用于脑,还可以监测其他部位(比如肾、肠)的氧饱和度,并且能够预测术后的某些并发症。

5 局限

NIRS 监测的临床应用仍有一些局限^[38]:① rScO₂受到许多影响因素的干扰,例如颅外组织的信号干扰及颅外血液循环,在分析 NIRS 设备的数据时,考虑干扰因素这一点尤为重要;②由于 NIRS 缺乏普遍接受的正常/异常值、阈值事件的定义和标准化的算法,NIRS 监测结果的解释仍存在很大争议,这意味着 NIRS 目前最好被用作趋势参数监测脑氧饱和度;③NIRS 只能反映局部组织的氧饱和度,而对于该器官全部的氧饱和度情况,需要结合其他血流动力学相关指标;④NIRS 在婴幼儿大脑以外的脏器组织监测中的应用受限于患儿的身高和体重,以及容易受到局部组织和肌肉的影响。

6 展望及结论

NIRS 应用技术作为一种新型的监测手段,能够准确反映脑部血流动力学的变化。与成人相比,婴幼儿有更高的机体代谢率及氧需求量,更不易耐受缺血缺氧,尤其是大脑。因此,在婴幼儿心脏手术围术期管理中利用 NIRS 监测 rScO₂、反映脑氧合状态具有重要价值。随着人们对 NIRS 的进一步了解,相信这项技术具有广泛的应用前景,未来 NIRS 技术在婴幼儿心脏手术围术期的发展应用包括以下几个方面:①术前风险分层^[39],应用 NIRS 监测进行手术风险评估;②进一步研究 rScO₂与传统的有创监测组织灌注指标(颈静脉血氧饱和度、脑组织氧分压)等参数的相关性,并与这些脑氧监测技术进行多模式联合监测,实时、准确反映婴幼儿心脏手术围术期的脑氧供需平衡变化;③应用 NIRS 衍生的脑血流自动调节指数,指导 CPB 中及围术期的个体化血压管理。

参考文献:

- [1] Zhao QM, Liu F, Wu L, *et al*. Prevalence of congenital heart disease at live birth in china[J]. *J Pediatr*, 2019, 204: 53-58.
- [2] Jafri SK, Ehsan L, Abbas Q, *et al*. Frequency and outcome of acute neurologic complications after congenital heart disease surgery[J]. *J Pediatr Neurosci*, 2017, 12 (4): 328-331.
- [3] Jobsis FF. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters [J]. *Science*, 1977, 198 (4323): 1264-1267.
- [4] Spaeder MC. Near-infrared spectroscopy monitoring after pediatric cardiac surgery: time for an intervention[J]? *Pediatr Crit Care Med*, 2018, 19 (5): 496-497.
- [5] 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.
- [6] Saito J, Takekawa D, Kawaguchi J, *et al*. Preoperative cerebral and renal oxygen saturation and clinical outcomes in pediatric patients with congenital heart disease [J]. *J Clin Monit Comput*, 2019, 33(6): 1015-1022.
- [7] Lei L, Katznelson R, Fedorko L, *et al*. Cerebral oximetry and postoperative delirium after cardiac surgery: a randomised, controlled trial[J]. *Anaesthesia*, 2017, 72(12): 1456-1466.
- [8] Kurth CD, Levy WJ, McCann J. Near-infrared spectroscopy cerebral oxygen saturation thresholds for hypoxia-ischemia in piglets [J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2002, 22 (3): 335-341.
- [9] 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.
- [10] Hou X, Ding H, Teng Y, *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.
- [11] Rivera-Lara L, Zorrilla-Vaca A, Geocadin RG, *et al*. Cerebral autoregulation-oriented therapy at the bedside: a comprehensive review[J]. *Anesthesiology*, 2017, 126 (6): 1187-1199.
- [12] Joshi B, Ono M, Brown C, *et al*. Predicting the limits of cerebral autoregulation during cardiopulmonary bypass[J]. *Anesth Analg*, 2012, 114 (3): 503-510.
- [13] Ono M, Joshi B, Brady K, *et al*. Risks for impaired cerebral autoregulation during cardiopulmonary bypass and postoperative stroke[J]. *Br J Anaesth*, 2012, 109(3): 391-398.
- [14] Hoshino K, Nishimoto N, Morimoto Y. Examination of the influence of age and cardiopulmonary bypass on cerebral autoregulation in pediatric patients for the cardiac surgery by using near-infrared spectroscopy[J]. *Masui*, 2015, 64(9): 960-965.
- [15] Razlevic I, Rugyte DC, Strumylaite L, *et al*. Assessment of risk factors for cerebral oxygen desaturation during neonatal and infant general anesthesia; an observational, prospective study[J]. *BMC Anesthesiol*, 2016, 16(1): 107.
- [16] Hu Z, Xu L, Zhu Z, *et al*. Effects of hypothermic cardiopulmonary bypass on internal jugular bulb venous oxygen saturation, cerebral oxygen saturation, and bispectral index in pediatric patients undergoing cardiac surgery: a prospective study[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2016, 95(2): e2483.
- [17] Kussman BD, Laussen PC, Benni PB, *et al*. Cerebral oxygen saturation in children with congenital heart disease and chronic hypoxemia[J]. *Anesth Analg*, 2017, 125(1): 234-240.
- [18] Menke J, Moller G. Cerebral near-infrared spectroscopy correlates to vital parameters during cardiopulmonary bypass surgery in children[J]. *Pediatr Cardiol*, 2014, 35 (1): 155-163.
- [19] vanBel F, Lemmers P, Naulaers G. Monitoring neonatal regional cerebral oxygen saturation in clinical practice: value and pitfalls [J]. *Neonatology*, 2008, 94(4): 237-244.
- [20] Ricci Z, Haiberger R, Tofani L, *et al*. Multisite near infrared spectroscopy during cardiopulmonary bypass in pediatric patients [J]. *Artif Organs*, 2015, 39(7): 584-590.
- [21] Kurth CD, Steven JM, Nicolson SC. Cerebral oxygenation during pediatric cardiac surgery using deep hypothermic circulatory arrest [J]. *Anesthesiology*, 1995, 82(1): 74-82.
- [22] Austin EH 3rd, Edmonds HL Jr, Auden SM, *et al*. Benefit of neurophysiologic monitoring for pediatric cardiac surgery [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 1997, 114 (5): 707-715.
- [23] Simons J, Sood ED, Derby CD, *et al*. Predictive value of near-infrared spectroscopy on neurodevelopmental outcome after surgery for congenital heart disease in infancy [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2012, 143(1): 118-125.
- [24] Hoffman GM, Brosig CL, Mussatto KA, *et al*. Perioperative cerebral oxygen saturation in neonates with hypoplastic left heart syndrome and childhood neurodevelopmental outcome [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2013, 146(5): 1153-1164.
- [25] Deschamps A, Lambert J, Couture P, *et al*. Reversal of decreases in cerebral saturation in high-risk cardiac surgery [J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2013, 27(6): 1260-1266.
- [26] 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.
- [27] Mittnacht AJ. Near infrared spectroscopy in children at high risk of low perfusion [J]. *Curr Opin Anaesthesiol*, 2010, 23(3): 342-347.
- [28] Hickok RL, Spaeder MC, Berger JT, *et al*. Postoperative abdominal NIRS values predict low cardiac output syndrome in neonates [J]. *World J Pediatr Congenit Heart Surg*, 2016, 7(2): 180-184.
- [29] Suemori T, Skowno J, Horton S, *et al*. Cerebral oxygen saturation and tissue hemoglobin concentration as predictive markers of early postoperative outcomes after pediatric cardiac surgery [J]. *Paediatr Anaesth*, 2016, 26(2): 182-189.
- [30] Gradidge EA, Grimaldi LM, Cashen K, *et al*. Near-infrared spectroscopy for prediction of extubation success after neonatal cardiac surgery [J]. *Cardiol Young*, 2019, 29(6): 787-792.
- [31] Groom RC. Is it time for goal-directed therapy in perfusion [J]. *J Extra Corpor Technol*, 2017, 49(2): P8-P12.
- [32] Haydin S, Onan B, Onan IS, *et al*. Cerebral perfusion during cardiopulmonary bypass in children; correlations between near-infrared spectroscopy, temperature, lactate, pump flow, and blood pressure [J]. *Artif Organs*, 2013, 37(1): 87-91.
- [33] 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.