

• 综 述 •

近红外光谱分析技术在无创监测脑自主调节功能中的应用*

任昱洁¹综述, 彭 玲²审校

(1. 四川大学华西医院麻醉科/四川大学华西临床医学院, 四川 成都 610044;

2. 四川大学华西医院麻醉科, 四川 成都 610044)

[摘要] 脑自主调节功能(CA)与脑血流量、颅内压、血压等关键临床参数密切相关, CA 的评估与监测在脑血管疾病、创伤性脑损伤、手术、新生儿等领域中均具有重要意义。现有的 CA 评估技术包括热稀释法、指示剂稀释法、CT 血管造影、磁共振血管造影等侵入性手段, 以及正电子发射断层扫描、经颅多普勒超声、近红外光谱(NIRS)分析技术等无创监测方法。然而侵入性监测技术、正电子发射断层扫描、经颅多普勒超声等技术由于有创、操作复杂或费用高昂等弊端在临床实际工作中应用受限。NIRS 具有无创、便捷、经济且可定量等诸多优势, 为临床实际工作中 CA 的评估带来了极大的便利, 具有良好的应用前景。该文综述了 NIRS 技术在 CA 监测与评估中的应用、临床意义、准确性、局限性、发展前景等。

[关键词] 脑自主调节功能; 近红外光谱; 总血红蛋白反应性指数; 脑血氧饱和度指数; 脑血管疾病; 创伤性脑损伤; 综述

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2023.07.027

中图法分类号:R741

文章编号:1009-5519(2023)07-1211-07

文献标识码:A

Application of near-infrared spectroscopy in noninvasive monitoring of cerebral autoregulation function*REN Yujie¹, PENG Ling²

(1. Department of Anesthesia, West China Hospital, Sichuan University/West China Medical School of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610044, China; 2. Department of Anesthesiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610044, China)

[Abstract] Cerebral autoregulation(CA) function is closely related to key clinical parameters such as cerebral blood flow(CBF), intracranial pressure(ICP) and blood pressure, etc. The evaluation and monitoring of CA function are important in the fields of cerebrovascular disease, traumatic brain injury, surgery, neonatology and so on. The existing CA evaluation techniques include thermal dilution, indicator dilution, computed tomography(CT) angiography, magnetic resonance angiography and other invasive methods, as well as non-invasive monitoring methods such as positron emission tomography, transcranial Doppler ultrasound, and near-infrared spectroscopy (NIRS). However, invasive methods, positron emission tomography, and transcranial Doppler ultrasound are limited in practical clinical application due to drawbacks like invasiveness, complexity of operation, or high cost. NIRS has many advantages such as being noninvasive, convenient, economical and quantifiable, which has brought great convenience to the evaluation of CA in clinical practice and has great application prospects. This article reviewed the application, clinical significance, accuracy, limitations and development prospects of NIRS technology in CA monitoring and evaluation.

[Key words] Cerebral autoregulation function; Near-infrared spectroscopy; Total hemoglobin reactivity index; Cerebral blood oxygen saturation index; Cerebrovascular disease; Traumatic brain injury; Review

脑自主调节功能(CA)使机体可以维持大脑供氧与耗氧平衡, 且当平均动脉压(MAP)为 50~150 mm Hg(1 mm Hg=0.133 kPa)时使脑血流量(CBF)仍能保持在相对稳定且适宜的水平^[1]。CA 主要受血

氧分压和二氧化碳分压、血压, 以及代谢等因素的影响, 涉及肌源性机制、神经源性机制、脑血流动力学等领域, 与 CBF、颅内压、血压、二氧化碳水平、脑耗氧量等重要的临床生理指标息息相关^[1-2]。

* 基金项目:国家自然科学基金面上基金项目(81971772)。

侵入性 CA 监测方法在临床实际工作中的应用有限^[3],无创监测方法主要包括近红外光谱(NIRS)、正电子发射断层扫描和经颅多普勒超声(TCD)等。NIRS 技术由于其无创、便捷、有效且可定量等诸多优点近年来在临床实际工作中应用范围不断拓宽,用于手术、创伤性脑损伤(TBI)、脑血管疾病、新生儿等人群 CA 的评估^[3-5]。现将目前主要几种 CA 测量方法的优缺点,以及 NIRS 在临床实际工作中的应用、临床意义、准确性、局限性、发展前景等综述如下,以期今后以 NIRS 技术监测 CA 的研究提供一定的帮助。

1 CA 监测手段

侵入性监测手段可通过颅内压检查及组织氧合程度确定适宜的 MAP。目前,主要包括热稀释法、指示剂稀释法、CT 血管造影、磁共振血管造影等^[6]。这些操作均需对被监测者进行导管置入,操作复杂且有创^[3]。此外,在抗凝剂或造影剂的使用,以及对目标温度的管理控制等过程中可能会对人体产生一定的不良反应,增加了患者出血的风险,且可能诱发一系列严重并发症^[3,6]。

正电子发射断层扫描是一种已被广泛使用的临床成像技术,使用水和葡萄糖等生物标志物推算 CBF,能在分子水平监测方面发挥很好的效能,测量结果准确且可量化,可用于 CA 的动态监测;但其价格昂贵,设备复杂,需要专门的技师操作,难以普遍使用^[7]。TCD 技术是目前监测 CA 的“金标准”^[8]。该方法无辐射,设备具有较强的便携性,价格较 CT 血管造影、磁共振血管造影更低廉且可重复使用,便于对患者脑功能情况进行连续、长期关注,也可较好地用于急诊室中^[9]。然而该技术尚存在许多限制之处:至少有 10% 的患者没有足够的骨窗实现该监测^[10];颞骨窗口不足可能导致信号不足^[11],而颞骨重塑又与年龄增长相关,因此,TCD 监测在相当大比例的老年人中是不可行的^[8];在监测颅内主干动脉血管的血流时具有较好的准确性,但由于颅骨厚度、动脉迂曲、动脉走行等因素会给超声声束的穿透程度以及方向造成一定的影响,难以较好地反应微血管网络的血流状况^[12];该方法假设血管口径恒定,没有考虑血管声波的角度,难以长时间、稳定地记录^[13];被探测的动脉直径未知,无法由测出的血液速度确定绝对血流量,在多数临床情况下仅能反应 CBF 的相对变化^[14];测量结果的可重复性有限^[8,15],尚缺乏统一的判定标准^[4];在测量过程中需对传感器进行频繁地重新配置^[16];对操作者的技术要求较高^[10]等。NIRS 技术与其他方式比较,具有无创、便捷、有效且可定量等诸多优点,

应用范围也更广^[4,17]。

2 NIRS

2.1 NIRS 监测组织氧 NIRS 光谱波长为 780~2 500 nm,可穿过颅外组织到达脑,并易于穿过脑组织。短波段(780~1 100 nm)能达到皮下组织 6 cm 处^[3]。在穿透的过程中近红外光可被氧合血红蛋白(HbO₂)、脱氧血红蛋白(HHb)等与脑血氧饱和度相关的生色团进行不同程度的吸收,引起组织吸收光谱的改变^[18]。基于朗伯-比尔定律、修正朗伯-比尔定律,以及对光强衰减程度的监测可计算出这些吸光物质的浓度,使 NIRS 可用于血氧饱和度的连续测定^[3,7]。1977 年有学者将 NIRS 引入对大脑 HHb-HbO₂ 稳态、脑血容量(CBV)、细胞色素 a, a₃ 的氧化还原状态的监测,并证实这一监测技术具有较高的灵敏度^[18]。基于 NIRS 测量的 HbO₂、HHb 的浓度变化可作为脑血流动力学的替代指标^[19]。基于 NIRS 的局部氧饱和度(rSO₂)监测,包括局部组织氧饱和度及局部脑氧饱和度(rScO₂)监测受运动伪影的干扰较小,已被广泛用于新生儿 CA 评估中^[13,20],也为许多其他科室提供了重要的临床数据^[21]。

2.2 基于 NIRS 氧监测结合血压的变化评估 CA 肌原、代谢和神经元等多种机制在不同时间尺度上影响脑血管张力,产生了 CBF、CBV 和氧合作用中的慢波(0.050~0.003 Hz)^[20]。在多模态神经监测中对这种脑血流动力学的缓慢震荡进行分析可提供新的 CA 替代测量措施。NIRS 慢波活动在总血红蛋白和 rSO₂ 中表现明显^[17]。已有研究通过总血红蛋白和颅内压确定 CBV 慢波,并在假定脑组织摄氧稳定的情况下通过 rSO₂ 确定 CBF 波^[17]。因此,将基于 NIRS 测得的组织血红蛋白指数(THI),以及 rSO₂ 与血压的变化相结合是无创评估 CA 的重要手段。

2.2.1 基于 NIRS 衍生的总血红蛋白反应性指数(THx)评估 CA THI 是一种对相对 HbO₂、HHb 浓度的标准化测量方法,可对 CBV 进行追踪以实现 CA 的监测^[22]。压力反应性指数(PRx)是一种已受到广泛研究的 CA 评估参数,被定义为颅内压和动脉血压(ABP)之间的相关系数,但其只能用于可承受有创颅内压监测者^[18]。类似地,有学者基于无创 NIRS 技术测得 THI,计算其与 ABP 的相关系数以建立 THx^[23]。已有大量研究表明,THx 可能是颅内压衍生指数(如 Prx)的可行替代方案,可用于评估最佳大脑灌注压和 ABP,在面向脑血管反应性恢复和连续性治疗中可能具有临床价值^[23],还具有评估脑血管反应性半球差异的额外优势^[24]。总之,基于 NIRS 的

THI、THx 参数对无法承受有创监测手段者具有重要意义,是一种潜在的替代 PRx 等参数测量的手段,未来可采取更多比较性前瞻性试验以更充分地了解其作用。结合 THx 和动态脑血管自调节指数分析的 CA 多模式监测可能具有重要的应用前景^[17]。

2.2.2 基于 NIRS 的脑血氧饱和度指数(COx)评估 CA 有研究基于 MAP 与 NIRS 技术测得的 rScO₂ 的相关系数建立 COx 用于评估 CBF,从而实现 CA 的监测^[25]。已有大量研究以 PRx 和基于 TCD 技术测得的平均速度指数等参数为标准证实了其测量结果的有效性^[26-27]。值得注意的是,2020 年 HOIL-AND 等^[28]研究表明,由 PRx 确定的最佳 MAP 与由 COx 确定的最佳 MAP 具有良好的一致性,平均差异较小,仅为 1.4 mm Hg,但一致性的可变性范围及 CA 的上、下限变化较大;COx 监测 PRx 评定的 CA 受损的灵敏度仅为 3%。但其样本数量较小,且存在心脏骤停病因不同、在启动颅内压测量时存在明显的延迟等问题,也未评估 NIRS 监测器之间导出 rSO₂ 的算法差异,因此,其外部有效性尚有待于考证^[6]。

2.3 基于 NIRS 评估 CA 的临床应用

2.3.1 手术患者 约 35% 的接受心脏手术患者存在 CA 受损^[29]。包括心肺转流(尤其是需进行深低温停循环的全弓手术)、冠状动脉旁路移植手术、瓣膜手术、主动脉弓修复手术等^[1,30]。老年患者、经历复杂手术或采取于各种仰卧位手术(如沙滩椅位手术)患者更易发生 CA 损伤^[31]。进行 CA 实时监测有助于识别主动脉插管错位、早期发现空气栓塞或主动脉夹层,尽早发现接受心脏手术患者病情恶化征象,有利于指导脑保护措施、脑灌注策略和选择拟交感神经以纠正麻醉引起的低血压^[1,30-31],降低患者术中、术后发生谵妄,术后发生死亡、中风、急性肾损伤,以及需行肾脏替代治疗等不良结局的可能性和术后 30 d 主要不良事件的综合评分(包括死亡、中风、肾衰竭、机械通气时间延长、正性肌力药或主动脉内球囊泵支持)^[32-33]。此外,CA 受损也常发生于许多非心脏手术,如血管(颈动脉内膜剥脱术需转流、外周动脉搭桥和腹主动脉瘤修复)、胸部(肺叶切除术和全肺切除术)和腹腔内(结直肠、胃、食道、胰腺、泌尿外科、肝脏移植术、肝脏和妇科肿瘤手术)等,且同样与不良结局的发生密切相关^[31,34]。

2.3.2 TBI 患者 CA 受损是 TBI 患者在发生急性脑损伤后脑血流动力学不稳的关键机制^[4,17]。连续评估与监测 CA 可能为治疗提供新的靶点,有助于确定急性脑损伤后的治疗窗,将 ABP、大脑灌注压控制至最佳水平,从而最大限度地减少继发性脑损伤^[35],降

低死亡率与残疾率^[17,32,36]。目前,NIRS 已与 TCD 并列列为最重要的无创监测 TBI 患者 CA 的技术^[37]。

2.3.3 脑血管疾病患者 脑血管疾病(特别是急性期时)也可能损坏 CA^[38-39]。小血管性缺血性卒中患者表现为双侧 CA 受损,而大血管性则表现为局灶性或半球损伤^[38]。CA 早期受损的卒中患者发生出血性转化、脑水肿,以及需半颅切除术风险显著升高^[39-40]。未经治疗的慢性高血压患者 CA 甚至可能在急性卒中前就被损坏^[39]。CA 受损也与在颈动脉狭窄患者发生同侧半球卒中风险、脑实质内出血患者的临床以及影像学方面的严重程度、血管狭窄再通治疗后再灌注损伤和蛛网膜下腔出血患者发生血管痉挛,以及迟发性脑出血且 6 个月功能结果不良等且密切相关^[38-39,41-43]。对脑血管病患者进行 CA 的早期监测有助于指导个体化急性管理、预后预测和预防继发性损伤,改善临床结局^[39]。

2.3.4 新生儿 已有多项研究表明,早产儿存在 CA 障碍,而这又可能提高其发生死亡、严重脑室内出血(3 或 4 级)和脑室周围白质软化等不良事件的风险^[13,44]。rScO₂ 是评估新生儿 CA 的重要依据,而 NIRS 作为最常用的测量新生儿 rScO₂ 的技术^[45],对确定其最佳 ABP,以及在早期监测到脑氧合降低和 CA 的变化具有重要意义,从而有助于尽早识别有死亡或神经放射损伤风险的极早产儿^[13,46]。此外,CA 损伤也常在帕金森病(尤其是合并 2 型糖尿病的帕金森病)等合并自主神经障碍的疾病,以及神经重症监护、感染性休克和医院外心脏骤停等领域中发生,且已被证实与不良结局相关^[1,42,47]。目前,对帕金森病患者的 CA 研究较少见,且主要采用直立倾斜试验结合 TCD 方法进行评估^[42]。NIRS 技术有望用于其中,为此类疾病的临床诊治提供新的思路。

2.4 基于 NIRS 评估 CA 的临床意义 2003 年 KELLER 等^[48]以 NIRS 记录光强,根据光强变化计算吲哚菁绿(ICG)浓度变化,实现数字化记录 ICG 在光场中的出现和染料稀释曲线的目的,同时,也将结果与 MRI 测得的结果进行比较,结果证实了以 NIRS 测量 CBF 的有效性。2006 年 SORENSEN 等^[49]将 NIRS 用于早产儿脑组织氧合指数的测量,认为这种测量方法的可重复性与精确度尚有待于提高,但若以此方法对同一研究对象连续测量 5 次并取平均值则获得的平均组织氧饱和度的准确度可与脉搏血氧仪相比,为科研人员在研究中减小样本量提供了便利。有许多研究以经历了心脏手术^[50-51]、TBI^[4]、蛛网膜下腔出血^[41]、昏迷状态^[26]等多种临床条件的患者为样本,验证了其测量结果的有效性。但现存的验证

NIRS 测量结果可靠性的研究采用的研究方法不一,不同设备和传感器的算法存在差异^[3,26-27],给测量结果之间的比较带来了不便,可重复性与精确度尚有待于提高^[5,52]。总的来说,验证这种方法在临床老年人群中有效性的实验依据较为有限。2021 年 MOL 等^[8]以老年、高血压(血压在可控范围内)和存在认知障碍人群为样本对 NIRS 测量结果的有效性进行了研究,结果显示,NIRS 监测 CA 标准的有效性可能足以用于各类人群之间的比较,但尚不足以用于临床个体间的比较。此外,NIRS 监测的准确性受到许多因素的影响;其准确性建立于血红蛋白水平稳定,以及动、静脉体积之比固定等假设之上^[5];如心脏舒张、收缩引发的搏动性程度不足,NIRS-ICG 稀释法也难以得出可靠的结果^[48];对大脑中动脉明显狭窄个体的额叶进行 NIRS 监测时可能更易引入误差^[53];血肿时浓缩血液的过度吸收可能影响光的传播,从而影响结果的准确性^[54]。

3 基于 NIRS 评估 CA 的不足与展望

除 NIRS 测量结果准确性尚有待于进一步验证与提高、在一些因素的影响下临床意义有限外,目前 NIRS 技术尚存在一些限制:(1)NIRS 监测过程要求患者不能有较大的身体活动,因此,难以用于有焦虑情绪的患者^[48];(2)近红外光穿透深度与探头距离密切相关,一般限制在几厘米以内,因此,仅可观察到大脑皮质的活动,无法反映深层脑区的变化,也无法明确获得精确的采样体积和位置^[4,55];(3)近红外光需漫射透过头发、颅骨,因此,更适合用于头发稀、颅骨薄的人群,如老年人和儿童,而用于青年人可能需花费较多时间调试头发浓密处的探头信号^[55]。

在脑功能评估方面,NIRS 可监测血液中血红蛋白的浓度,且设备更便携,可用于部分代替功能性磁共振成像(fMRI),方便临床使用。但由于 NIRS 只能用于扫描靠近头皮的皮质组织,难以测量额叶皮层的腹面、基底神经节和大部分小脑,而 fMRI 可用于监测整个脑的活跃度,因此,尚无法完全替代 fMRI^[56]。在脑氧合程度的评估方面,NIRS 监测指数 rSO₂ 可更好地反应颈静脉气体分析所遗漏的局部变化,但由于该指数是区域测量,而颈静脉气体分析是全局测量^[4],因此,二者也各有优劣之处。此外,NIRS 技术在区分不同组织层的氧合程度时作用有限^[56],且无法区分动脉与静脉的氧饱和度^[25]。

与其他监测技术(如 fMRI 对软组织的对比度分辨率)的分辨率比较,功能性 NIRS(fNIRS)的空间分辨率较低^[57]。NIRS 技术的空间分辨率主要受探测器光极数量及光从发射器散射至探测器光极的路径

的限制^[58]。有研究表明,多通道 NIRS 仪的光极帽将光极放置在受试者的头皮周围可增加光极密度,提高其空间分辨率^[58]。有研究正尝试采用多通道高频 fNIRS 设备开发大脑连续脑血管反应性图谱^[24]。此外,还有研究表明,与单一距离比较,多距离探头配置具有更好的空间分辨率,能获取更准确的大脑活动信息^[59]。将 fNIRS 与其他技术相融合也有望提高其时空分辨率^[57]。

4 小 结

CA 是一种重要的大脑保护机制,与多种重要临床指标密切相关。侵入性监测手段在临床的应用存在诸多限制,且可能对患者造成不必要的伤害,目前,非侵入性监测手段在临床实际工作中应用较广,且以 TCD 为“金标准”。NIRS 监测技术便捷、有效且可定量,是一种很有前景的无创 CA 监测手段,基于该技术建立的 THx、COx 对 CBV 及 CBF 等指标的测量具有重要的临床应用价值,有助于手术、脑创伤、脑血管疾病患者,以及新生儿等诸多人群 CA 的评估,可降低患者发生不良结局的可能性。目前,该技术监测结果的准确性尚有待于进一步的验证与提高,尚存在许多不足之处,但可在技术方面进行改良以弥补。

总之,目前 NIRS 技术优势诸多、研究前景广阔,进一步发展后有望在 CA 监测中提供大量更准确、更详细的信息,为临床诊治提供指导。

参考文献

- [1] MOERMAN A, DEHERT S. Why and how to assess cerebral autoregulation [J]. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*, 2019, 33(2): 211-220.
- [2] WILLIE C K, TZENG Y C, FISHER J A, et al. Integrative regulation of human brain blood flow: Integrative regulation of human brain blood flow [J]. *J Physiol*, 2014, 592(5): 841-859.
- [3] 查雨彤, 刘光达, 王永祥, 等. 基于 NIRS-ICG 的脑血流量无创测量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1069-1073.
- [4] ROLDAN M, KYRIACOU P A. Near-infrared spectroscopy (NIRS) in traumatic brain injury (TBI) [J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1586.
- [5] KOOI E M W, RICHTER A E. Cerebral autoregulation in sick infants: Current insights [J]. *Clin Perinatol*, 2020, 47(3): 449-467.
- [6] SKRIFVARS M B, ANEMAN A. Near-infrared spectroscopy “under pressure” as a post-cardiac

- arrest monitoring technique of cerebral autoregulation[J]. *Resuscitation*, 2020, 152:203-204.
- [7] 胡裕, 韩阳东, 王宁, 等. 围手术期脑血流灌注的常用监测方法及进展[J]. *医学综述*, 2020, 26(9):1770-1775.
- [8] MOL A, MESKERS C G M, SANDERS M L, et al. Cerebral autoregulation assessed by near-infrared spectroscopy: Validation using transcranial doppler in patients with controlled hypertension, cognitive impairment and controls[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2021, 121(8):2165-2176.
- [9] BRUNSER A M, LAVADOS P M, HOPPE A, et al. Accuracy of transcranial doppler compared with CT angiography in diagnosing arterial obstructions in acute ischemic strokes[J]. *Stroke*, 2009, 40(6):2037-2041.
- [10] FRANCOEUR C L, MAYER S A. Management of delayed cerebral ischemia after subarachnoid hemorrhage[J]. *Crit Care*, 2016, 20(1):277.
- [11] COUTURE E J, DESJARDINS G, DENAULT A Y. Transcranial doppler monitoring guided by cranial two-dimensional ultrasonography[J]. *Can J Anaesth*, 2017, 64(8):885-887.
- [12] 刘彩彩, 凌浩, 冯士杰, 等. 诱发生理状态下的脑血流动力学的无创光学评估[J]. *中国医疗设备*, 2020, 35(2):36-39.
- [13] KOOI E M W, VERHAGEN E A, ELTING J W J, et al. Measuring cerebrovascular autoregulation in preterm infants using near-infrared spectroscopy: An overview of the literature[J]. *Expert Rev Neurother*, 2017, 17(8):801-818.
- [14] 王孟岩, 左云霞. 经颅多普勒超声监测脑血流在麻醉手术中的应用[J]. *华西医学*, 2022, 37(1):131-134.
- [15] PHAM P, BINDRA J, ANEMAN A, et al. Non-invasive monitoring of dynamic cerebrovascular autoregulation and optimal blood pressure in normal adult subjects[J]. *Neurocrit Care*, 2019, 30(1):201-206.
- [16] BRADY K, JOSHI B, ZWEIFEL C, et al. Real-time continuous monitoring of cerebral blood flow autoregulation using near-infrared spectroscopy in patients undergoing cardiopulmonary bypass[J]. *Stroke*, 2010, 41(9):1951-1956.
- [17] HIGHTON D, GHOSH A, TACHTSIDIS I, et al. Monitoring cerebral autoregulation after brain injury: Multimodal assessment of cerebral slow-wave oscillations using near-infrared spectroscopy[J]. *Anesth Analg*, 2015, 121(1):198-205.
- [18] JOBSIS F F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters[J]. *Science*, 1977, 198(4323):1264-1267.
- [19] KIM J M, CHOI J K, CHOI M, et al. Assessment of cerebral autoregulation using continuous-wave near-infrared spectroscopy during squat-stand maneuvers in subjects with symptoms of orthostatic intolerance[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1):13257.
- [20] JILDENSTAL P, WIDARSSON NORBECK D, SNYGG J, et al. Cerebral autoregulation in infants during sevoflurane anesthesia for craniofacial surgery[J]. *Paediatr Anaesth*, 2021, 31(5):563-569.
- [21] 郑业英, 郭飞, 魏蔚. 局部氧饱和度监测在围术期的临床应用进展[J]. *海南医学院学报*, 2019, 25(6):467-471.
- [22] DIEDLER J, ZWEIFEL C, BUDOHOSKI K P, et al. The limitations of near-infrared spectroscopy to assess cerebrovascular reactivity: The role of slow frequency oscillations[J]. *Anesth Analg*, 2011, 113(4):849-857.
- [23] ZWEIFEL C, CASTELLANI G, CZOSNYKA M, et al. Noninvasive monitoring of cerebrovascular reactivity with near infrared spectroscopy in head-injured patients[J]. *J Neurotrauma*, 2010, 27(11):1951-1958.
- [24] GOMEZ A, SAINBHI A S, FROESE L, et al. Near infrared spectroscopy for high-temporal resolution cerebral physiome characterization in TBI: A narrative review of techniques, applications, and future directions[J]. *Front Pharmacol*, 2021, 12:719501.
- [25] ONO M, BROWN C, LEE J K, et al. Cerebral blood flow autoregulation is preserved after hypothermic circulatory arrest[J]. *Ann Thorac Surg*, 2013, 96(6):2045.
- [26] RIVERA-LARA L, GEOCADIN R, ZORRIL-

- LA-VACA A, et al. Validation of near-infrared spectroscopy for monitoring cerebral autoregulation in comatose patients[J]. *Neurocrit Care*, 2017, 27(3):362-369.
- [27] 刘光达, 王郁霖, 秦琪, 等. 基于脉搏色素法/近红外光谱术测量脑血流参数[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(12):3111-3119.
- [28] HOILAND R L, SEKHON M S, CARDIM D, et al. Lack of agreement between optimal mean arterial pressure determination using pressure reactivity index versus cerebral oximetry index in hypoxic ischemic brain injury after cardiac arrest[J]. *Resuscitation*, 2020, 152:184-191.
- [29] MOERMAN A T, VANBIERVLIET V M, VAN WESEMAEL A, et al. Assessment of cerebral autoregulation patterns with near-infrared spectroscopy during pharmacological-induced pressure changes [J]. *Anesthesiol*, 2015, 123(2):327-335.
- [30] ZHENG F, SHEINBERG R, YEE M S, et al. Cerebral near-infrared spectroscopy monitoring and neurologic outcomes in adult cardiac surgery patients: A systematic review[J]. *Anesth Analg*, 2013, 116(3):663-676.
- [31] SORENSEN H. Near infrared spectroscopy evaluated cerebral oxygenation during anesthesia[J]. *Dan Med J*, 2016, 63(12):B5318.
- [32] HAASE-FIELITZ A, HAASE M, BELLOMO R, et al. Perioperative hemodynamic instability and fluid overload are associated with increasing acute kidney injury severity and worse outcome after cardiac surgery [J]. *Blood Purif*, 2017, 43(4):298-308.
- [33] CHAN B, ANEMAN A. A prospective, observational study of cerebrovascular autoregulation and its association with delirium following cardiac surgery[J]. *Anaesthesia*, 2019, 74(1):33-44.
- [34] CHUAN A, SHORT T G, PENG A Z Y, et al. Is cerebrovascular autoregulation associated with outcomes after major noncardiac surgery? A prospective observational pilot study[J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2019, 63(1):8-17.
- [35] LAZARIDIS C, SMIELEWSKI P, STEINER L A, et al. Optimal cerebral perfusion pressure: Are we ready for it[J]. *Neurol Res*, 2013, 35(2):138-148.
- [36] STOCKER R A. Intensive care in traumatic brain injury including multi-modal monitoring and neuroprotection[J]. *Med Sci(Basel)*, 2019, 7(3):37.
- [37] ROLDAN M, ABAY T Y, KYRIACOU P A. Non-invasive techniques for multimodal monitoring in traumatic brain injury: Systematic review and meta-analysis [J]. *J Neurotrauma*, 2020, 37(23):2445-2453.
- [38] CASTRO P, AZEVEDO E, SOROND F. Cerebral autoregulation in stroke[J]. *Curr Atheroscler Rep*, 2018, 20(8):37.
- [39] ALKAWAZ M, CHO S M, GOTTESMAN R F, et al. Impact of cerebral autoregulation monitoring in cerebrovascular disease: A systematic review [J]. *Neurocrit Care*, 2022, 36(3):1053-1070.
- [40] CASTRO P, AZEVEDO E, SERRADOR J, et al. Hemorrhagic transformation and cerebral edema in acute ischemic stroke: Link to cerebral autoregulation[J]. *J Neurol Sci*, 2017, 372:256-261.
- [41] PARK J J, KIM Y, CHAI C L, et al. Application of near-infrared spectroscopy for the detection of delayed cerebral ischemia in poor-grade subarachnoid hemorrhage[J]. *Neurocrit Care*, 2021, 35(3):767-774.
- [42] 姜振威, 胡鸣一, 黄艳露, 等. 瓦氏动作在脑血流自动调节功能中的应用[J]. *中国卒中杂志*, 2019, 14(3):260-264.
- [43] YU L, SUN L, WANG F, et al. Cerebral autoregulation in patients with unilateral carotid artery stenosis [J]. *Zhongguo Yi Xue Ke Xue Yuan Xue Bao*, 2020, 42(3):327-330.
- [44] HOFFMAN S B, CHENG Y J, MAGDER L S, et al. Cerebral autoregulation in premature infants during the first 96 hours of life and relationship to adverse outcomes [J]. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed*, 2019, 104(5):473-479.
- [45] LEON R L, ORTIGOZA E B, ALI N, et al. Cerebral blood flow monitoring in high-risk fetal and neonatal populations[J]. *Front Pediatr*,

2022,9:748345.

- [46] CHOCK V Y, KWON S H, AMBALAVANAN N, et al. Cerebral oxygenation and autoregulation in preterm infants (Early NIRS Study) [J]. *J Pediatr*, 2020, 227: 94-100.
- [47] 范磊, 邓文娟, 岳秉宏, 等. 帕金森病合并 2 型糖尿病患者脑血流自动调节参数与自主神经功能障碍的相关性研究 [J]. *广西医学*, 2022, 44(7): 722-726.
- [48] KELLER E, NADLER A, ALKADHI H, et al. Noninvasive measurement of regional cerebral blood flow and regional cerebral blood volume by near-infrared spectroscopy and indocyanine green dye dilution [J]. *NeuroImage*, 2003, 20(2): 828-839.
- [49] SORENSEN L C, GREISEN G. Precision of measurement of cerebral tissue oxygenation index using near-infrared spectroscopy in preterm neonates [J]. *J Biomed Opt*, 2006, 11(5): 054005.
- [50] BLAINE EASLEY R, KIBLER K K, BRADY K M, et al. Continuous cerebrovascular reactivity monitoring and autoregulation monitoring identify similar lower limits of autoregulation in patients undergoing cardiopulmonary bypass [J]. *Neurol Res*, 2013, 35(4): 344-354.
- [51] MONTGOMERY D, BROWN C, HOGUE C W, et al. Real-time intraoperative determination and reporting of cerebral autoregulation state using near-infrared spectroscopy [J]. *Anesth Analg*, 2020, 131(5): 1520-1528.
- [52] NAKANO M, NOMURA Y, WHITMAN G, et al. Cerebral autoregulation in the operating room and intensive care unit after cardiac surgery [J]. *Br J Anaesth*, 2021, 126(5): 967-974.
- [53] ONO M, BRADY K, EASLEY R B, et al. Duration and magnitude of blood pressure below cerebral autoregulation threshold during cardiopulmonary bypass is associated with major morbidity and operative mortality [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, 147(1): 483-489.
- [54] KIM M N, DURDURAN T, FRANGOS S, et al. Noninvasive measurement of cerebral blood flow and blood oxygenation using near-infrared and diffuse correlation spectroscopies in critically brain-injured adults [J]. *Neurocrit Care*, 2010, 12(2): 173-180.
- [55] 吴毅. 功能性近红外光谱技术在脑卒中患者康复中的临床应用 [J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(11): 1281-1283.
- [56] DAVIES D J, CLANCY M, DEHGHANI H, et al. Cerebral oxygenation in traumatic brain injury: can a non-invasive frequency domain near-infrared spectroscopy device detect changes in brain tissue oxygen tension as well as the established invasive monitor [J]. *J Neurotrauma*, 2019, 36(7): 1175-1183.
- [57] 王丽群, 李雨谿, 金荣疆, 等. 功能性近红外光谱在抑郁症研究中的应用 [J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(11): 1799-1804.
- [58] CHEN W L, WAGNER J, HEUGEL N, et al. Functional near-infrared spectroscopy and its clinical application in the field of neuroscience: Advances and future directions [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14(2): 724-727.
- [59] CHEN X, SONG X, CHEN L, et al. Performance Improvement for detecting brain function using fnirs: A multi-distance probe configuration with PPL method [J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 569508.

(收稿日期: 2022-08-24 修回日期: 2022-11-16)