

• 综述 •

DOI: 10.12464/j.issn.0253-9802.2024-0012

近红外脑功能成像在中枢神经系统疾病中的应用

杨永勤¹, 李道静², 齐子有²✉

(1. 济宁医学院, 山东 济宁 272067; 2. 济宁医学院附属医院, 山东 济宁 272000)

【摘要】 近红外脑功能成像是一种脑功能神经影像技术, 被广泛应用于神经病学疾病的研究与临床诊断中。近红外技术能够非侵入性地测量组织的氧合状态和血流动力学参数, 为神经病学疾病的诊断、治疗和监测提供了新的工具。文章旨在总结近年来近红外技术在中枢神经系统疾病中的应用进展, 并探讨其潜在的临床意义, 包括在不同神经病学疾病中的应用以及在神经康复中的应用前景, 为疾病的诊断和治疗提供新的思路。

【关键词】 近红外脑功能成像; 中枢神经系统疾病; 神经康复

Application of near-infrared brain functional imaging in central nervous system diseases

YANG Yongqin¹, LI Daojing², QI Ziyou²✉

(1. Jining Medical University, Jining 272067, China; 2. Affiliated Hospital of Jining Medical College, Jining 272000, China)

Corresponding author: QI Ziyou, E-mail: zy-513@163.com

【Abstract】 Near-infrared spectroscopy is a brain functional neuroimaging technology, which is widely used in the research and clinical diagnosis of neurological diseases. Near-infrared technology can measure tissue oxygenation status and hemodynamic parameters non-invasively, providing a new tool for diagnosis, treatment and monitoring of neurological diseases. The purpose of this paper is to summarize the application progress of near-infrared technology in central nervous system diseases in recent years, and discuss its potential clinical significance, including the application in different neurological diseases and the application prospect in neurological rehabilitation, so as to provide new ideas for the diagnosis and treatment of diseases.

【Key words】 Near-infrared brain functional imaging technology; Central nervous system disease; Neurorehabilitation

近红外脑功能成像 (near-infrared spectroscopy, NIRS) 是一种非侵入性测量组织氧合状态的光谱分析技术, 利用近红外光在物质中的吸收和散射特性来研究物质的组成和结构。其生物学原理是在神经血管耦合机制的作用下, 个体在大脑进行脑功能活动时耗氧量增加^[1], 葡萄糖的代谢需求增加, 导致局部脑血流量供过于求, 以满足大脑增加的代谢需求, 而氧气通过血液中的血红蛋白进行传输, 所以在认知活动时, 大脑活动区域会出现血液中的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白浓度的变化^[2]。大脑皮层有着丰富的血管, 通过测量在认知活动中大脑局部血管里的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的变化可以间接反映大脑的功能状态, 推测认知活动相关的脑区和脑区间的相互关系。其物理学原理是当光通过组织时, 会被组织

中的染色物质吸收, 导致出射光的强度减弱, 这基于物质对不同波长的近红外光的吸收和散射特性不同^[2]。不同物质的分子结构和化学键会对近红外光的吸收产生特定的影响^[3]。在近红外光谱范围内, 血红蛋白、氧合血红蛋白和细胞色素氧化酶是组织中的重要染色物质, 它们的吸收光谱随氧合状态的改变而变化。通过测量这些染色物质的吸收变化, 可以实时监测组织的氧合状态^[4]。自 Jöbsis^[5] 发明了体内 NIRS 开始, 多个研究小组进行了早期的 NIRS 实验, NIRS 已被证明是研究脑生理学的有效工具, 尤其是功能性 NIRS (functional NIRS, fNIRS), 对于评估脑功能和疾病诊断具有重要意义^[3, 6], 已被广泛应用于脑卒中神经康复、精神疾病、儿童发育障碍及神经退行性疾病等多个领域^[7]。

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 齐鲁卫生与健康领军人才工程-杰出青年人才 (2021-QLJQ-003); 济宁市重点研发计划项目 (2024YXNS080)

作者简介: 杨永勤, 硕士研究生, 研究方向: 功能近红外光谱技术, E-mail: 15139499325@163.com; 齐子有, 通信作者, 副主任医师, 硕士生导师, 研究方向: 脑血管病、神经重症, E-mail: zy-513@163.com

1 近红外光谱在中枢神经系统疾病中的应用

1.1 脑卒中

脑卒中是指由于血管病变导致脑部血液供应障碍的疾病,包括脑梗死、脑出血等,是世界范围内第二大死亡原因,也是导致残疾的主要原因^[8]。NIRS可以实时监测脑血流灌注和氧合水平的变化,提供对脑血管病诊断和治疗过程的实时监测和评估。Annus等^[9]通过NIRS监测急性缺血性脑卒中患者在溶栓或血栓切除手术过程中的脑血管血流动力学变化,结果显示,在溶栓或血栓切除过程中,NIRS监测的脑氧饱和度可以反映脑血流动力学的变化。不同患者的脑氧饱和度变化情况不同,但总体上与前循环侧支循环的变化和临床结果相关。该研究结果支持使用NIRS监测急性缺血性脑卒中患者,NIRS既可以提供实时的脑血流动力学信息,也能监测溶栓和血栓切除的效果。Becker等^[10]通过NIRS探讨了急性缺血性脑卒中患者的脑自动调节功能,并与健康对照组进行比较,结果显示患者组的脑自动调节功能受损,无法像健康对照组那样有效地调节系统血压的波动。这项研究揭示了急性缺血性脑卒中患者的脑自动调节功能受损,这可能是导致其脑血流异常的重要因素,提示NIRS对于进一步理解脑卒中的病理生理机制及开发相关治疗方法具有重要意义。

1.2 神经系统变性疾病

1.2.1 帕金森病

帕金森病是一种神经系统退行性疾病,其主要症状包括震颤、肌肉僵直和运动障碍等。NIRS可以实时监测帕金森病患者的脑血流量和氧合水平,辅助评估疾病的严重程度和病情进展^[11]。研究表明,帕金森病患者的脑血流灌注和氧合水平与病情的发展和严重程度相关^[12],因此通过NIRS非侵入性地实时监测脑血流动力学有助于评估患者疾病状况。Hofmann等^[13]探讨了PD患者在执行连线测试任务时的认知功能和脑血氧水平的变化,他们采用了fNIRS来测量大脑皮层的氧合水平,并通过行为数据分析来评估连线测试任务的执行情况,结果显示帕金森病患者在执行连线测试任务时的认知功能和脑血氧水平与健康对照组没有显著差异,这些结果对于进一步理解帕金森病患者的认知功能和脑血流动力学变化具有重要意义。

Maidan等^[14]使用了fNIRS测量前额叶皮层的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的变化来探究帕金森病患者在不同步态任务下的前额叶激活情况,分析脑活动与步态表现之间的关系。结果显示,在进行数字减法任务时,帕金森病患者的前额叶激活水平较低,与正常行走时相比有所下降。同时,帕金森病患者在通过障碍物时的步态表现也较差,步速较慢且通过障碍物的时间较长。这些结果表明,帕金森病患者在执行认知任务时,前额叶的激活水平下降,可能与步态控制障碍有关,这为该病患者的神经康复提供了重要信息。

1.2.2 阿尔茨海默病

阿尔茨海默病是一种中枢神经退行性病变^[7]。fNIRS是一种颇具前景的早期诊断阿尔茨海默病的工具。一项探讨fNIRS和正电子发射断层扫描评估轻度认知功能障碍和阿尔茨海默病相关性的研究表明,fNIRS和正电子发射断层扫描在评估两者时具有相关性,而且fNIRS可以提供额外的信息来帮助了解这两种疾病的生理机制^[15]。Keles等^[16]采用fNIRS研究了阿尔茨海默病患者的大脑活动,使用高密度fNIRS设备对阿尔茨海默病患者、轻度认知功能障碍患者和健康对照组进行了测量。结果显示,阿尔茨海默病患者的前额叶皮层的功能连接性与健康对照组存在显著差异。他们还通过机器学习算法发现使用少量的光学通道可以有效区分阿尔茨海默病患者和健康对照者,并且可以预测阿尔茨海默病患者的认知功能表现。这项研究表明fNIRS有助于更好地理解阿尔茨海默病的神经生理机制,并为其早期诊断和治疗提供了线索,可以作为一种潜在的阿尔茨海默病诊断工具和评估认知功能的方法。

1.2.3 认知功能障碍

NIRS有助于更好地理解和治疗认知功能障碍^[17]。Haberstumpf等^[18]使用fNIRS来测量参与者在视觉-空间处理任务时顶叶皮层的神经活动,结果显示,与健康对照组相比,轻度认知功能障碍患者在这项任务中表现出较低的顶叶激活水平。这表明轻度认知功能障碍患者在进行视觉-空间处理时存在脑功能异常。这项研究对于理解轻度认知功能障碍患者的脑功能变化以及认知功能障碍的进展具有重要意义。fNIRS有助于发现认知功能障碍的相关生物学标志物,有助于该疾病的早期检测和诊断,并为开发新的治疗方法和干

预措施提供基础。此外,部分研究表明NIRS在痴呆疾病的研究中也有很大的应用前景和潜力^[19,20]。

1.3 癫痫

NIRS在癫痫中的应用主要是通过脑血氧浓度的变化来监测癫痫发作。癫痫发作时,脑血流和血氧含量会发生变化,这些变化可以通过NIR进行监测和记录。Sirpal等^[21]探讨了将fNIRS测量结果与脑电图(electroencephalogram, EEG)数据相结合的优势,发现EEG-fNIRS多模态数据在癫痫发作检测任务中表现出更好的性能,并且具有较低的泛化误差和,误检率更低,可以提高癫痫发作检测的性能。此外,该研究提出的神经网络模型为未来的多模态癫痫检测和预测提供了潜力框架。此外,Tung等^[22]借助fNIRS有效记录了执行语言流畅性任务的癫痫患者和对照组的大脑活动。通过使用fNIRS,研究者可以了解颞叶癫痫患者在进行语言任务时大脑网络的重组情况,这有助于理解癫痫对大脑功能连接的影响,并为癫痫的诊断和治疗提供新的线索。

1.4 偏头痛

偏头痛是一种严重的致残性脑部疾病,被列为全球第六大致残性疾病^[23]。NIRS可以评估偏头痛与脑血管反应性或脑血流动力学之间的关系,因其具有非侵入性、非放射性、即时性、低成本、便携性和易操作等优点,因此在研究偏头痛方面具有较高潜力^[24]。Pourshoghi等^[25]使用fNIRS测量偏头痛患者的脑反应性,结果表明,血管理论可能无法完全解释偏头痛患者疼痛改善的机制,而神经理论可能更能解释偏头痛的发生原因。他们还指出,fNIRS可以作为在临床环境中评估不同药物对头痛和偏头痛血管效应的有效工具。

1.5 脑外伤

创伤性脑损伤是世界范围内死亡和残疾的主要原因^[26]。继发性脑损伤通常发生在创伤后前几小时内,因此无创检测可能有助于提供有关大脑状况的早期信息,帮助救助人员尽早筛查疑似脑外伤的患者^[27]。Robertson等^[28]评估了一种便携式NIRS设备在检测创伤性颅内血肿方面的临床效果,结果显示该便携式NIRS设备在检测创伤性颅内血肿方面具有潜力,并可能成为一种检测快速、非侵入性的筛查工具。有研究者使用手持式NIRS设备(Infrascanner)对疑似创伤性脑损伤患者进行了筛查。结果显示,与CT扫描结果相比,Infrascanner检测颅内血肿的敏感度为93.3%、特

异度为78.6%。这意味着Infrascanner可以较准确地识别出需要接受手术干预的患者^[29]。NIRS作为一种非侵入性的诊断工具,可以帮助医师及早发现创伤性脑损伤患者并实施适当的治疗和转运决策,从而提高患者的生存率和生活质量,因此NIRS可以成为现场和急救中心早期识别颅内血肿的实用辅助工具。

NIRS在监测创伤性脑损伤患者病情进展中也具有重要的作用和意义,可以非侵入性方式提供脑血流动力学参数,帮助评估脑自主调节功能,并预测患者的预后^[30]。有研究者通过使用血氧水平依赖功能磁共振成像和fNIRS来评估创伤性脑损伤患者的脑血管反应。结果显示,创伤性脑损伤患者的fNIRS结果与血氧水平依赖功能磁共振成像测量结果具有相关性,这提示使用NIRS可以更低价格且可重复地评估脑损伤患者的脑血管反应^[10]。

在创伤性脑损伤治疗方面,研究者通过NIRS实时监测脑部氧合水平的变化以了解经颅交流电刺激治疗对脑组织的影响,结果显示,在治疗过程中患者的脑氧合水平显著下降,这可能由神经元的活化引起。这一结果表明,在进行经颅交流电刺激治疗时可能需要辅助氧疗来维持脑部氧合水平。因此,NIRS在评估经颅交流电刺激对创伤性脑损伤患者脑氧合的影响方面起到了重要的作用。通过监测脑氧合水平的变化,可以更好地理解创伤性脑损伤对脑组织的影响,为患者的治疗提供指导和改进经颅交流电刺激治疗的策略^[31]。

1.6 意识障碍

意识障碍是指各种因素导致人们无法保持清醒和意识的状态。意识障碍包括昏迷、植物人状态和轻度意识障碍等不同病理状态^[32]。fNIRS可通过测量大脑皮层的血氧水平变化来反映大脑活动,可评估意识障碍患者的残余认知水平^[33],这对于判断患者的意识状态、制定个体化的康复治疗方​​案以及预测康复潜力具有重要意义。Shu等^[34]在研究中使用fNIRS记录了意识障碍患者在接受脑深部电刺激治疗前后的大脑活动。通过分析fNIRS数据,他们评估了不同脑叶之间的通信强度和整体通信效率的变化。结果表明,经脑深部电刺激治疗后,患者的大脑功能连接性得到改善,整体通信效率也有所提高。这些发现对于理解脑深部电刺激治疗对意识障碍患者的影响具有重要意义,提示fNIRS在评估意识障碍的治疗效果方面具有一定的潜力,为进一步研究神经调控效应和个体化

治疗提供了重要参考。

昏迷是指各种病因导致的高级神经中枢结构与功能活动处于严重而广泛抑制状态的病理过程,是一种持续的无意识状态。Rivera-Lara 等^[35]采用了 NIRS 和经颅多普勒超声监测技术监测 33 例昏迷患者,并比较了 2 种技术的最佳平均动脉压的计算结果。结果表明,2 种技术在评估昏迷患者的脑自主调节方面具有一致性,均可作为有效的监测工具。

fNIRS 在评估植物人状态和极低意识状态患者的残余意识水平方面也有一定的作用和意义。Lu 等^[36]使用 fNIRS 评估了 18 例长期意识障碍患者和 15 名健康对照组的脑功能,研究结果表明,fNIRS 可以通过测量患者对不同刺激的脑反应来评估其残余意识水平。与健康对照组相比,长期意识障碍患者在被动刺激下的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白浓度均值上升,且随着意识水平降低而呈上升趋势。这表明 fNIRS 在评估长期意识障碍患者的残余意识方面具有可行性和可靠性。此外,通过 fNIRS,研究人员揭示了极低意识状态患者前额叶功能网络的紊乱情况,有助于更好地理解极低意识状态的病理机制^[37]。fNIRS 也可以检测极低意识状态患者的残余功能网络^[38],这为进一步理解该类患者的神经生理特征和诊断提供了有价值的信息。

2 近红外光谱在神经重症监护中的应用

神经危重疾病是患者长期预后不良的常见原因,对于神经科医师来说,早期识别和治疗神经危重疾病患者是巨大的挑战^[39]。NIRS 正成为一种辅助决策因急性脑损伤进入 ICU 患者的治疗决策的有效工具^[40]。Adatia 等^[41]使用 NIRS 监测了患者的脑氧饱和度,并将其与体温变化进行比较。他们使用 COx 指数来评估患者的脑血流自动调节状态。通过监测脑血流自动调节的变化,医师可以及时调整治疗策略以维持患者的脑灌注和氧供,从而改善患者的预后。Rivera-Lara 等^[42]探讨了使用 NIRS 监测脑血流自动调节状态和计算最佳平均动脉压的可行性,并分析了平均动脉压偏离最佳平均动脉压与患者预后的关系。结果显示,通过优化脑灌注压,可以减少脑缺血和脑灌注不足,

从而降低患者的病死率和严重残疾率。该项研究提示 NIRS 在神经危重病患者的监测和治疗中具有重要的作用和意义。此外,多项研究系统地探讨了 NIRS 在神经危重病护理中的潜在应用和发展前景^[39-40, 43],未来 NIRS 将在神经危重疾病领域发挥更大作用。

3 近红外光谱在神经康复中的应用

近年来,NIRS 在神经康复领域得到了广泛应用^[44]。fNIRS 在研究脑功能和血氧代谢变化方面具有重要作用,它可被用于诊断和筛查脑功能障碍,推断神经活动状态,实时监测脑区的血氧代谢变化,并为康复治疗提供指导^[45]。康复训练对脑卒中后运动功能的恢复至关重要。研究者利用 fNIRS 分析了脑卒中患者和健康人群进行上肢训练时的大脑皮层活动状态,结果显示,在脑卒中患者和健康人群中,与被动运动相比,主动上肢运动更易引起更高的皮层激活,外部运动表现的视觉反馈可能有助于促进对侧大脑半球的感觉运动区的活动^[46]。这些发现对于理解脑卒中患者的上肢康复和运动训练的神经机制具有重要意义。此外,研究显示 fNIRS 还可用于评估脑卒中患者的吞咽功能和卒中后失语的康复治疗效果^[47-48],也可用于评估机器人辅助步态训练的效果^[49]。随着技术的不断发展和改进,NIRS 还可为神经源性下尿路功能障碍、女性的控尿功能障碍等疾病的病理机制研究提供神经影像学依据^[50],NIRS 将为神经康复的个体化治疗和康复效果评估提供更多的可能性,也能为开发新的诊断和治疗方法提供思路。

4 结语与展望

神经系统疾病在现代疾病发病率中的占比逐渐升高,因此早期诊断极其重要。NIRS 具有易操作、方便快捷、适用人群广、对身体及环境条件要求低、对参与者的行为限制少等优点。其中的 fNIRS 具有疾病病种适用广泛、应用场景多元、抗运动干扰、抗电磁干扰、支持长时程无创检测、可移动性好等独特优势,这使得 fNIRS 在脑功能疾病诊断和疗效评估方面的应用越来越广泛^[7]。目前,通过 fNIRS 可以实时监测脑血流灌注和氧合水

平变化,实现对神经系统疾病诊疗过程的实时监测和评估,为个性化治疗提供更多的可能性。但 NIRS 存在一些局限性,包括缺乏解剖特异性、空间分辨率低、无法进入不邻近头皮的皮质区域,信号容易受到头皮、头发等组织散射和吸收的影响,需要进行信号处理和校正^[2,6,51],这些挑战不可忽略。未来,随着技术水平的提高,设备的空间分辨率和时间分辨率将进一步提升,并可结合人工智能技术提高诊断效能,NIRS 将在神经系统疾病的诊疗中发挥更大的作用。

利益冲突声明: 本研究未受到企业、公司等第三方资助,不存在潜在利益冲突。

参 考 文 献

- [1] OKADA F, TOKUMITSU Y, HOSHI Y, et al. Impaired interhemispheric integration in brain oxygenation and hemodynamics in schizophrenia[J]. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci*, 1994, 244 (1): 17-25. DOI: 10.1007/BF02279807.
- [2] PINTI P, TACHTSIDIS I, HAMILTON A, et al. The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2020, 1464 (1): 5-29. DOI: 10.1111/nyas.13948.
- [3] FERRARI M, QUARESIMA V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application[J]. *Neuroimage*, 2012, 63 (2): 921-935. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.049.
- [4] OWEN-REECE H, SMITH M, ELWELL C E, et al. Near infrared spectroscopy[J]. *Br J Anaesth*, 1999, 82 (3): 418-426. DOI: 10.1093/bja/82.3.418.
- [5] JÖBSIS F F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters[J]. *Science*, 1977, 198 (4323): 1264-1267. DOI: 10.1126/science.929199.
- [6] 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 : 724. DOI: 10.3389/fnins.2020.00724.
- [7] 近红外脑功能成像临床应用专家共识编写组. 近红外脑功能成像临床应用专家共识[J]. *中国老年保健医学*, 2021, 19 (2): 3-9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2671.2021.02.001. Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology writing group. Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology[J]. *Chin J Geriatr Care*, 2021, 19 (2): 3-9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2671.2021.02.001.
- [8] FEIGIN V L, NORRVING B, MENSAH G A. Global burden of stroke[J]. *Circ Res*, 2017, 120 (3): 439-448. DOI: 10.1161/circresaha.116.308413.
- [9] ANNUS Á, NAGY A, VÉCSEI L, et al. 24-hour near-infrared spectroscopy monitoring of acute ischaemic stroke patients undergoing thrombolysis or thrombectomy: a pilot study[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2019, 28 (8): 2337-2342. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2019.05.026.
- [10] BECKER S, KLEIN F, KÖNIG K, et al. Assessment of dynamic cerebral autoregulation in near-infrared spectroscopy using short channels: a feasibility study in acute ischemic stroke patients[J]. *Front Neurol*, 2022, 13 : 1028864. DOI: 10.3389/fneur.2022.1028864.
- [11] BONILAURI A, SANGIULIANO INTRA F, ROSSETTO F, et al. Whole-head functional near-infrared spectroscopy as an ecological monitoring tool for assessing cortical activity in Parkinson's disease patients at different stages[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23 (23): 14897. DOI: 10.3390/ijms232314897.
- [12] MAIDAN I, NIEUWHOF F, BERNAD-ELAZARI H, et al. The role of the frontal lobe in complex walking among patients with Parkinson's disease and healthy older adults: an fNIRS study[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2016, 30 (10): 963-971. DOI: 10.1177/1545968316650426.
- [13] HOFMANN A, ROSENBAUM D, INT-VEEN I, et al. Abnormally reduced frontal cortex activity during Trail-Making-Test in prodromal Parkinson's disease: a fNIRS study[J]. *Neurobiol Aging*, 2021, 105 : 148-158. DOI: 10.1016/j.neurobiolaging.2021.04.014.
- [14] MAIDAN I, BERNAD-ELAZARI H, GAZIT E, et al. Changes in oxygenated hemoglobin link freezing of gait to frontal activation in patients with Parkinson disease: an fNIRS study of transient motor-cognitive failures[J]. *J Neurol*, 2015, 262 (4): 899-908. DOI: 10.1007/s00415-015-7650-6.
- [15] YOON J A, KONG I J, CHOI I, et al. Correlation between cerebral hemodynamic functional near-infrared spectroscopy and positron emission tomography for assessing mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: an exploratory study[J]. *PLoS One*, 2023, 18 (8): e0285013. DOI: 10.1371/journal.pone.0285013.
- [16] KELES H O, KARAKULAK E Z, HANOGLU L, et al. Screening for Alzheimer's disease using prefrontal resting-state functional near-infrared spectroscopy[J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16 : 1061668. DOI: 10.3389/fnhum.2022.1061668.
- [17] LI R, RUI G, CHEN W, et al. Early detection of Alzheimer's disease using non-invasive near-infrared spectroscopy[J]. *Front Aging Neurosci*, 2018, 10 : 366. DOI: 10.3389/fnagi.2018.00366.
- [18] HABERSTUMPF S, SEIDEL A, LAUER M, et al. Reduced parietal activation in participants with mild cognitive impairments during visual-spatial processing measured with functional near-infrared spectroscopy[J]. *J Psychiatr Res*, 2022, 146 : 31-42. DOI: 10.1016/j.jpsychires.2021.12.021.
- [19] BUTTERS E, SRINIVASAN S, O'BRIEN J T, et al. A promising tool to explore functional impairment in neurodegeneration: a systematic review of near-infrared spectroscopy in dementia[J].

- Ageing Res Rev, 2023, 90 : 101992. DOI: 10.1016/j.arr.2023.101992.
- [20] YEUNG M K, CHAN A S. Functional near-infrared spectroscopy reveals decreased resting oxygenation levels and task-related oxygenation changes in mild cognitive impairment and dementia: a systematic review[J]. J Psychiatr Res, 2020, 124 : 58-76. DOI: 10.1016/j.jpsychires.2020.02.017.
- [21] SIRPAL P, KASSAB A, POULIOT P, et al. fNIRS improves seizure detection in multimodal EEG-fNIRS recordings[J]. J Biomed Opt, 2019, 24 (5) : 1-9. DOI: 10.1117/1.jbo.24.5.051408.
- [22] TUNG H, LIN W H, LAN T H, et al. Network reorganization during verbal fluency task in fronto-temporal epilepsy: a functional near-infrared spectroscopy study[J]. J Psychiatr Res, 2021, 138 : 541-549. DOI: 10.1016/j.jpsychires.2021.05.012.
- [23] GOADSBY P J, HOLLAND P R, MARTINS-OLIVEIRA M, et al. Pathophysiology of migraine: a disorder of sensory processing[J]. Physiol Rev, 2017, 97 (2) : 553-622. DOI: 10.1152/physrev.00034.2015.
- [24] CHEN W T, HSIEH C Y, LIU Y H, et al. Migraine classification by machine learning with functional near-infrared spectroscopy during the mental arithmetic task[J]. Sci Rep, 2022, 12 (1) : 14590. DOI: 10.1038/s41598-022-17619-9.
- [25] POURSHOGHI A, DANESH A, TABBY D S, et al. Cerebral reactivity in migraine patients measured with functional near-infrared spectroscopy[J]. Eur J Med Res, 2015, 20 : 96. DOI: 10.1186/s40001-015-0190-9.
- [26] MCCREA M A, GIACINO J T, BARBER J, et al. Functional outcomes over the first year after moderate to severe traumatic brain injury in the prospective, longitudinal TRACK-TBI study[J]. JAMA Neurol, 2021, 78 (8) : 982-992. DOI: 10.1001/jamaneurol.2021.2043.
- [27] KO S B. Multimodality monitoring in the neurointensive care unit: a special perspective for patients with stroke[J]. J Stroke, 2013, 15 (2) : 99-108. DOI: 10.5853/jos.2013.15.2.99.
- [28] ROBERTSON C S, ZAGER E L, NARAYAN R K, et al. Clinical evaluation of a portable near-infrared device for detection of traumatic intracranial hematomas[J]. J Neurotrauma, 2010, 27 (9) : 1597-1604. DOI: 10.1089/neu.2010.1340.
- [29] PETERS J, VAN WAGENINGEN B, HOOGERWERF N, et al. Near-infrared spectroscopy: a promising prehospital tool for management of traumatic brain injury[J]. Prehosp Disaster Med, 2017, 32 (4) : 414-418. DOI: 10.1017/s1049023x17006367.
- [30] GOMEZ A, DIAN J, FROESE L, et al. Near-infrared cerebrovascular reactivity for monitoring cerebral autoregulation and predicting outcomes in moderate to severe traumatic brain injury: proposal for a pilot observational study[J]. JMIR Res Protoc, 2020, 9 (8) : e18740. DOI: 10.2196/18740.
- [31] TROFIMOV A O, KOPYLOV A A, MARTYNOV D S, et al. The changes in brain oxygenation during transcranial alternating current stimulation as consequences of traumatic brain injury: a near-infrared spectroscopy study[J]. Adv Exp Med Biol, 2021, 1269 : 235-239. DOI: 10.1007/978-3-030-48238-1_37.
- [32] SEPTIEN S, RUBIN M A. Disorders of consciousness: ethical issues of diagnosis, treatment, and prognostication[J]. Semin Neurol, 2018, 38 (5) : 548-554. DOI: 10.1055/s-0038-1667384.
- [33] SI J, YANG Y, XU L, et al. Evaluation of residual cognition in patients with disorders of consciousness based on functional near-infrared spectroscopy[J]. Neurophotonics, 2023, 10 (2) : 025003. DOI: 10.1117/1.nph.10.2.025003.
- [34] SHU Z, WU J, LI H, et al. fNIRS-based functional connectivity signifies recovery in patients with disorders of consciousness after DBS treatment[J]. Clin Neurophysiol, 2023, 147 : 60-68. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.12.011.
- [35] RIVERA-LARA L, GEOCADIN R, ZORRILLA-VACA A, et al. Validation of near-infrared spectroscopy for monitoring cerebral autoregulation in comatose patients[J]. Neurocritical Care, 2017, 27 (3) : 362-369. DOI: 10.1007/s12028-017-0421-8.
- [36] LU H, JIANG J, SI J, et al. A functional near-infrared spectroscopy study on hemodynamic changes of patients with prolonged disorders of consciousness responding to different auditory stimuli[J]. BMC Neurol, 2023, 23 (1) : 242. DOI: 10.1186/s12883-023-03292-6.
- [37] CHEN H, MIAO G, WANG S, et al. Disturbed functional connectivity and topological properties of the frontal lobe in minimally conscious state based on resting-state fNIRS[J]. Front Neurosci, 2023, 17 : 1118395. DOI: 10.3389/fnins.2023.1118395.
- [38] LIU Y, KANG X G, CHEN B B, et al. Detecting residual brain networks in disorders of consciousness: a resting-state fNIRS study[J]. Brain Res, 2023, 1798 : 148162. DOI: 10.1016/j.brainres.2022.148162.
- [39] VIDERMAN D, ABDILDIN Y G. Near-infrared spectroscopy in neurocritical care: a review of recent updates[J]. World Neurosurg, 2021, 151 : 23-28. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.04.054.
- [40] THOMAS R, SHIN S S, BALU R. Applications of near-infrared spectroscopy in neurocritical care[J]. Neurophotonics, 2023, 10 (2) : 023522. DOI: 10.1117/1.nph.10.2.023522.
- [41] ADATIA K, GEOCADIN R G, HEALY R, et al. Effect of body temperature on cerebral autoregulation in acutely comatose neurocritically ill patients[J]. Crit Care Med, 2018, 46 (8) : e733-e741. DOI: 10.1097/ccm.0000000000003181.
- [42] RIVERA-LARA L, GEOCADIN R, ZORRILLA-VACA A, et al. Optimizing mean arterial pressure in acutely comatose patients using cerebral autoregulation multimodal monitoring with near-infrared spectroscopy[J]. Crit Care Med, 2019, 47 (10) : 1409-1415. DOI: 10.1097/ccm.0000000000003908.
- [43] 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. DOI: 10.3389/fphar.2021.719501.
- [44] MIHARA M, MIYAI I. Review of functional near-infrared

- spectroscopy in neurorehabilitation[J]. *Neurophotonics*, 2016, 3 (3) : 031414. DOI: 10.1117/1.nph.3.3.031414.
- [45] LIU Y, LUO J, FANG J, et al. Screening diagnosis of executive dysfunction after ischemic stroke and the effects of transcranial magnetic stimulation: a prospective functional near-infrared spectroscopy study[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2023, 29 (6) : 1561-1570. DOI: 10.1111/cns.14118.
- [46] XIA W, DAI R, XU X, et al. Cortical mapping of active and passive upper limb training in stroke patients and healthy people: a functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Brain Res*, 2022, 1788 : 147935. DOI: 10.1016/j.brainres.2022.147935.
- [47] LIU H, PENG Y, LIU Z, et al. Hemodynamic signal changes and swallowing improvement of repetitive transcranial magnetic stimulation on stroke patients with dysphagia: a randomized controlled study[J]. *Front Neurol*, 2022, 13 : 918974. DOI: 10.3389/fneur.2022.918974.
- [48] XIE H, JING J, MA Y, et al. Effects of simultaneous use of m-NMES and language training on brain functional connectivity in stroke patients with aphasia: a randomized controlled clinical trial[J]. *Front Aging Neurosci*, 2022, 14 : 965486. DOI: 10.3389/fnagi.2022.965486.
- [49] SONG K J, CHUN M H, LEE J, et al. The effect of robot-assisted gait training on cortical activation in stroke patients: a functional near-infrared spectroscopy study[J]. *NeuroRehabilitation*, 2021, 49 (1) : 65-73. DOI: 10.3233/nre-210034.
- [50] 徐正娴, 潘伟婷, 于灿灿, 等. 基于 fNIRS 对女性不同膀胱状态下盆底肌收缩任务的前额叶激活情况 [J]. *新医学*, 2024, 55 (4) : 280-286. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9802.2024.04.008.
- XU Z X, PAN W T, YU C C, et al. fNIRS-based study of prefrontal cortex activation during pelvic floor muscle contraction in women under different bladder states[J]. *J New Med*, 2024, 55 (4) : 280-286. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9802.2024.04.008.
- [51] KHAKSARI K, CHEN W L, GROPMAN A L. Review of applications of near-infrared spectroscopy in two rare disorders with executive and neurological dysfunction: UCD and PKU[J]. *Genes (Basel)*, 2022, 13 (10) : 1690. DOI: 10.3390/genes13101690.

(责任编辑: 洪悦民)

