.综述.

功能性近红外光谱技术在运动控制及其障碍中的研究进展

牛传欣^{1,2} 陈志³ 宋小慧^{1,2} 王继先^{1,2} 谢青^{1,2} ¹上海交通大学医学院附属瑞金医院,上海 200025;²上海市瑞金康复医院,上海 200023; ³上海交通大学医学院,上海 200025 通信作者:谢青,Email;ruijin_xq@163.com

【摘要】 功能性近红外光谱(fNIRS)作为一种新兴的脑观测技术,在检测与运动相关的脑活动时具有优势,此前多被应用于心理、情感等领域。本文就 fNIRS 在运动控制及其障碍中的研究进展作一综述,包括姿势保持、节律运动、反射与被动运动、随意运动、运动想像等方面,旨在为相关研究提供可行方向。

【关键词】 功能性近红外; 运动障碍; 康复医学; 运动控制

基金项目:国家自然科学基金面上项目(81971722);上海市科委项目(19511105600);上海市卫健委项目 (2019SY004)

Funding: General Project of National Natural Science Foundation of China (81971722); Shanghai Science and Technology Commission Project(19511105600); Shanghai Municipal Health Commission Project(2019SY004)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.01.018

运动控制是神经系统的一种特殊机能。利用运动控制,人 类可以通过中枢和外周神经系统来指挥身体中的相关部位,克 服环境障碍,达成运动目标^[1]。一个健康成年人能够控制的运 动种类很多,包括姿势保持、节律性运动、随意运动、被动与反 射性运动等^[2]。大脑对于实现运动控制非常重要,如利用学习 获得运动能力、基于规划形成运动指令、经由相关脑区执行运 动指令、捕获感觉信号对运动进行调校和纠错等^[1,3]。当运动 相关脑区结构受损时,就可能会出现运动障碍,重建运动控制 也就成为功能恢复的一个重要途径^[4]。因此,观测脑的运动控 制过程,明确运动障碍的发生部位和机制,对神经康复具有重 要意义。

功能性近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)技术是将波长 600~900 nm 的近红外光照射在头皮上, 光束经脑皮质漫射后、透射出头皮,再测量透射出的光强度,进 而计算出光极附近血红蛋白的浓度,以此反映脑内功能活动水 平^[56]。fNIRS 技术在运动功能研究中具有优势,其可以在相对 自然、真实的运动场景中检测大脑皮质血氧信号变化,且 fNIRS 是基于血氧饱和水平信号的成像技术,其结果与功能性核磁共 振结果具有较好的一致性^[7]。除此之外,fNIRS 的优势还包括 价格相对低廉^[8]、时间分辨率相对较高(可达 100 Hz)^[9]、结果 可重复性较高等^[10]。

本文就 fNIRS 在运动控制及其障碍中的研究进展作一综述,通过整理成年人运动相关的实验范式,明确利用 fNIRS 可以观测的感兴趣脑区及可能的脑激活模式,旨在为探讨运动障碍康复的脑机制提供参考。

姿势保持

姿势保持是人体运动的基础,对于维持或恢复平衡具有重要作用。在姿势保持的过程中,神经系统通过维持肢体与环境间的相对稳定,一方面避免肢体形变或损伤,另一方面也为运动做好准备^[11]。有研究报道,与平衡功能相关的关键皮质区域

是辅助运动区^[12]。fNIRS 研究也证实了辅助运动区在平衡任务 中存在显著激活^[13],且其激活程度与任务的运动学参数有关(如 运动方向^[14]),也与任务中反馈给受试者的信息有关(如有无观 察本人训练录像^[15])。除运动区外,fNIRS 研究还发现颞上 回^[16]、顶叶联合皮质区^[13]等脑区也参与了平衡的维持或恢复。

姿势保持能力若出现障碍,患者可能会表现为平衡能力受损,或神经肌肉骨骼的协调能力下降。以脑卒中为例,平衡功能受损的患者在维持平衡时,利用 fNIRS 技术可观测到患者双侧辅助运动区与健侧皮质运动区均显著激活,且辅助运动区的激活程度与脑卒中患者的 Berg 平衡量表评分呈现为正相关^[13]。提示脑卒中后姿势保持能力恢复的关键脑区可能是辅助运动区。一些康复训练研究证实了这一想法,通过神经反馈训练,患者的大脑辅助运动区出现显著激活,平衡能力改善^[17];通过常规康复训练后,也观察到了患者的平衡能力改善及双侧辅助运动区激活^[18]。

此外,fNIRS 还被用于观测完成抓握力、憋气等姿势保持任务。研究发现,与年轻人比较,老年人在精确控制握力时,运动区激活程度更高,但保持握力的精确性较低^[19]。进行憋气任务时, 患者的年龄与脑区激活面积呈正相关,与激活程度呈负相关^[20]。

节律运动

节律运动是指轨迹呈周期性变化的运动,其运动控制主要 受脊髓和脑干回路支配^[2]。常见的下肢节律运动包括行走、骑 车、跑步机训练、椭圆机训练等。利用 fNIRS 技术观察节律运动 时,健康成年人的皮质激活区主要集中于初级运动皮质区。骑 行时,肢体对侧初级运动皮质显著激活^[21],且运动前区激活程 度随运动强度增加而增强^[22]。与站立相比,正常人行走时的感 觉运动区无显著激活,提示行走这一动作主要由皮质下系统支 配,与运动皮质的关联较少^[23]。

中枢神经系统病变会影响运动时的脑区激活情况,主要表现为脑区激活的偏侧化和激活程度不同。在节律性康复训练

中,脑卒中患者的脑区激活状态不平衡,具体表现为健侧脑激 活水平显著高于患侧^[24]。在康复早期,健侧脑会代偿患侧脑的 部分功能,出现同侧或双侧激活;但在康复后期,会表现为对侧 激活^[25],且脑功能连接的模式也会发生变化^[26]。除脑卒中外 的一些中枢神经障碍也常常累及节律运动,如脑瘫患者在进行 下肢活动时,未涉及运动的肌肉也产生了收缩,可能导致其脑 激活范围较正常人分散,激活程度更高^[27]。

被动运动与反射性运动

被动运动是指肢体不主动参与的运动,一般由外力引起。 被动训练在早期康复中的作用非常重要。研究发现,脑卒中患 者在被动运动时,运动皮质呈现出不同程度的激活,激活程度受 运动频率、运动方向和刺激等因素的影响,但总体激活程度低于 主动运动。与主动运动相比,脑卒中患者进行被动下肢运动时的 脑区激活程度更低^[28]。上肢运动中,被动运动时脑区激活的程 度还与运动的方向有关,不同方向的运动,所激活的脑区不同,如 腕关节产生桡偏时,初级运动皮质的激活程度更高^[29]。

反射也是一种被动运动,其是由中枢神经系统调控而产生的应激运动^[2],主要受脊髓和皮质下回路的支配。fNIRS 能直接观测反射性运动的研究并不多见,可能与实验装置较为复杂 有关。全身振动训练可以诱发肢体的反射性运动。近期研究 发现,如果对全身进行 27 Hz 的相对高频振动,双侧初级运动皮 质与右侧前额叶皮质会被显著激活,而频率低至 10 Hz 时则无 明显脑激活,该研究为 fNIRS 观测反射性运动提供了一种可行 的范式^[30]。

随意运动

随意运动是大脑皮质有意识支配的运动^[2],多数上肢运动 (尤其是手的精细运动)都属于此类,其运动控制机理与康复的 关系十分密切。

一、健康人的上下肢随意运动

fNIRS 研究发现,上肢随意运动主要涉及双侧初级运动区、 辅助运动区和运动前区等。手的运动是最常见的随意运动,健 康人在执行抓握^[31]、按键^[32]以及使用筷子^[33]等活动时,初级 运动皮质均显著激活,辅助运动区与运动前区不同程度激活。 在进行重复性对指、叩击和伸展等简单动作时,成年人表现出 双侧初级运动皮质显著激活,且对侧初级运动皮质激活程度更 高^[34]。在完成较复杂的双侧协同运动时,左右上肢同时运动可 以激活双侧初级运动皮质,单侧运动则会激活对侧初级运动皮 质^[35]。且有研究发现,单侧运动时会出现"同侧抑制"现象^[36]。

随意运动中的脑区激活受到很多因素的影响,可能的因素 包括运动任务的复杂程度^[23]、肌肉的募集方式^[37]和多感觉输 入^[38]等。在运动的复杂程度方面,辅助运动区与运动前区会参 与精确踩踏等复杂运动^[23];顶下小叶、额下回等区域也不同程 度地参与了运动控制,且脑区激活程度与任务的复杂程度有 关。总体来说,动作越复杂,初级运动皮质的激活程度越高,且 额下回、顶下小叶激活的偏侧化程度越高^[39],前额叶皮质的激 活程度也随之上升^[40]。在肌肉募集方面,不同的肌肉募集方式 和感觉输入会影响运动皮质的激活情况,与向心运动相比,慢 速离心运动时感觉运动区的激活程度更高^[37]。在多感觉输入 方面,听觉、视觉和触觉输入指导下的手指训练,比常规训练更 能激活感觉运动区^[38]。另外,在同时执行认知和运动任务时, 脑区的激活程度显著上升,反应时显著下降^[41]。辅助运动区、 运动前区会参与运动学习、运动规划等与认知结合的运动控制 任务^[42]。

脑区间的功能连接也是研究随意运动时重要的观测指标。 一项 fNIRS 研究发现,功能连接会随运动状态的变化而改变。 如在运动开始后,辅助运动区与左侧初级运动皮质之间的单向 连接变为双向连接^[43],研究者认为单向连接可能与运动抑制有 关,而双向连接可能与运动准备、感觉运动信息更新和运动执 行等因素有关。可见,fNIRS 对于分析运动控制的精细过程也 具有研究价值。

二、中枢神经病变患者的随意运动及运动疲劳

脑卒中患者在进行随意运动时,脑区激活表现为偏侧化, 利用 fNIRS 观测其手抓握动作时,患者双侧初级运动皮质与辅 助运动区均显著激活^[31]。单侧脑瘫的患者在进行上肢活动时, 激活的脑区较正常人分散,且激活程度较高^[44]。

脑卒中患者在进行上下肢运动时,其同侧或双侧脑区的激活情况会随康复训练的进展而逐渐改善^[25]。上肢运动中,患者的偏侧化指数会随着功能恢复而增加^[45];下肢运动中,患者对侧运动前区的激活程度显著提高^[46]。有研究利用 fNIRS 技术发现,速度反馈指导下的下肢康复训练可以增强健侧脑区运动前区的激活程度^[28]。

运动疲劳虽然不是中枢神经系统病变,但也会显著影响前额叶和运动区的脑活动。研究发现,运动负荷的改变会显著影响前额叶皮质的激活程度^[47]。在中强度持续运动后,糖尿病患者运动区血氧信号高于正常人^[48]。此外,中强度骑行运动后,辅助运动区和感觉运动区的血氧信号会出现先降、后升、再降的现象^[49]。随意运动的异常还存在一种特殊情况,即运动中对侧运动区的血氧浓度出现负激活^[50],分析认为可能与血管窃血有关。

运动想象

运动想象是一类特殊的脑活动,其是指想象者能够对特定 运动进行演练或模拟,却不真正驱动肢体和肌肉进行运动^[51]。 fNIRS 研究发现,运动想象中的脑区激活程度、激活区域和激活 速度,与真实运动时存在明显区别。在手指叩击及抓握实验 中,真实运动较运动想象的激活程度更高、反应时更快,两者激 活的空间分布也不同^[52-53]。

运动想象训练是早期康复的重要手段,通过前额叶的神经 反馈技术,可以高效促进患者的运动功能恢复。有研究发现, 经过规范的神经反馈指导训练后,患者初级运动皮质与运动前 区激活程度提高^[54],在此基础上辅以运动想象疗法可以更好地 激活运动前区^[55]。

总结

fNIRS 可用于观测人体在正常或疾病状态下的神经运动控制情况。健康人群运动时,肢体的对侧运动区显著激活,激活程度及范围与任务复杂程度、运动强度、肌肉募集方式、感觉输入和年龄等因素有关。与健康人群比较,脑卒中患者运动时左

右半球的感兴趣区均被激活,随着康复治疗的深入,双侧激活 逐渐变为对侧激活,脑区的激活程度也与功能恢复显著相关。 利用 fNIRS 观测到,运动时的感兴趣区主要是初级运动皮质、辅 助运动区和前运动皮质,推测认为 fNIRS 技术在揭示运动规划 和运动学习机制方面具有优势。但在临床研究中发现,fNIRS 也存在一定局限。首先,fNIRS 的空间分辨率显著低于功能性 核磁共振,在计算光极对应的脑区位置时,需要借助相应的定 位和溯源手段。其次,由于光在脑内穿行的路径无法准确测 量,所以 fNIRS 测出的血红蛋白浓度绝对值一般不能作为诊断 依据,而是要从浓度的相对变化来推断脑活动。目前,fNIRS 在 运动控制和运动障碍的研究中体现出了一定的优势,今后可为 康复治疗的神经机制提供更加丰富、客观的循证依据。

参考文献

- Shumway-cook A, Woollacott MH. Motor control: translating research into clinical practice [M]. Fifth edition. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2017:1-10.
- [2] Kandel ER.Principles of neural science [M]. New York: McGraw-Hill, 2013:10-12.
- [3] Magill RA, Anderson D. Motor learning and control: concepts and applications[M]. New York: McGraw-Hill, 2014:5-10.
- [4] Winstein CJ, Stein J, Arena R, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American heart association/American stroke association [J]. Stroke, 2016, 47 (6): 98-169. DOI: 10. 1161/STR. 00000000000098.
- [5] Scholkmann F, Kleiser S, Metz AJ, et al. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology[J]. Neuroimage, 2014, 85: 6-27. DOI:10.1016/j. neuroimage.2013.05.004.
- [6] Niioka K, Uga M, Nagata T, et al. Cerebral hemodynamic response during concealment of information about a mock crime: application of a general linear model with an adaptive hemodynamic response function: cerebral hemodynamic response during concealment of information[J]. Jpn Psychol Res, 2018, 60(4): 311-326. DOI:10.1111/jpr.12194.
- [7] Duan L, Zhang YJ, Zhu CZ. Quantitative comparison of resting-state functional connectivity derived from fNIRS and fMRI; a simultaneous recording study[J]. NeuroImage, 2012, 60(4):2008-2018.DOI:10. 1016/j.neuroimage.2012.02.014.
- [8] Herold F, Wiegel P, Scholkmann F, et al. Applications of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) neuroimaging in exercise-cognition science: a systematic, methodology-focused review [J]. J Clin Med, 2018,12(7):466. DOI:10.3390/jcm7120466.
- [9] 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.
- [10] Strangman G, Goldstein R, Rauch SL, et al. Near-infrared spectroscopy and imaging for investigating stroke rehabilitation: test-retest reliability and review of the literature[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2006, 87(12):12-19. DOI:10.1016/j.apmr.2006.07.269.
- [11] Carini F, Mazzola M, Fici C, et al. Posture and posturology, anatomical and physiological profiles: overview and current state of art[J].Acta Biomed, 2017, 88(1):11-16.DOI: 10.23750/abm.v88i1.5309.

- Zwergal A, Linn J, Xiong G, et al. Aging of human supraspinal locomotor and postural control in fMRI[J]. Neurobiol Aging, 2012, 33 (6): 1073-1084. DOI:10.1016/j.neurobiolaging.2010.09.022.
- [13] Mihara M, Miyai I, Hattori N, et al. Cortical control of postural balance in patients with hemiplegic stroke [J]. Neuroreport, 2012, 23 (5): 314-319. DOI:10.1097/WNR.0b013e328351757b.
- [14] Herold F, Orlowski K, Börmel S, et al. Cortical activation during balancing on a balance board [J]. Hum Mov Sci, 2017, 51: 51-58. DOI:10.1016/j.humov.2016.11.002.
- [15] Hiyamizu M, Maeoka H, Matsuo A, et al. Effects of self-action observation on standing balance learning: a change of brain activity detected using functional near-infrared spectroscopy [J]. NeuroRehabilitation, 2014, 35(3): 579-585. DOI:10.3233/NRE-141153.
- [16] Karim H, Schmidt B, Dart D, et al. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) of brain function during active balancing using a video game system[J]. Gait & Posture, 2012, 35(3):367-372. DOI:10. 1016/j.gaitpost.2011.10.007.
- Fujimoto H, Mihara M, Hattori N, et al. Neurofeedback-induced facilitation of the supplementary motor area affects postural stability [J]. Neurophotonics, 2017, 4 (4): 045003. DOI: 10.1117/1. NPh. 4. 4. 045003.
- [18] Fujimoto H, Mihara M, Hattori N, et al. Cortical changes underlying balance recovery in patients with hemiplegic stroke [J]. Neuroimage, 2014,85:547-554. DOI:10.1016/j.neuroimage.2013.05.014.
- [19] Berger A, Steinberg F, Thomas F, et al. Neural correlates of age-related changes in precise grip force regulation: a combined EEG-fNIRS study[J]. Front Aging Neurosci, 2020, 12: 594810. DOI:10.3389/ fnagi.2020.594810.
- [20] Karunakaran KD, JI K, Chen DY, et al. Relationship between age and cerebral hemodynamic response to breath holding: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. Brain Topogr, 2021, 34(2): 154-166. DOI:10.1007/s10548-021-00818-4.
- [21] Tempest GD, Reiss AL. The utility of functional near-infrared spectroscopy for measuring cortical activity during cycling exercise [J]. Med Sci Sports Exerc, 2019, 51 (5):979-987. DOI: 10.1249/MSS. 000000000001875.
- [22] Seidel O, Carius D, Roediger J, et al. Changes in neurovascular coupling during cycling exercise measured by multi-distance fNIRS: a comparison between endurance athletes and physically active controls [J]. Exp Brain Res, 2019, 237 (11): 2957-2972. DOI:10.1007/ s00221-019-05646-4.
- [23] Koenraadt KL, Roelofsen EG, Duysens J, et al. Cortical control of normal gait and precision stepping: an fNIRS study[J]. Neuroimage, 2014, 85: 415-422. DOI:10.1016/j.neuroimage.2013.04.070.
- [24] Huo C, Xu G, Li Z, et al. Limb linkage rehabilitation training-related changes in cortical activation and effective connectivity after stroke: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. Sci Rep, 2019, 9 (1): 6226. DOI:10.1038/s41598-019-42674-0.
- [25] Takeda K, Gomi Y, Imai I, et al. Shift of motor activation areas during recovery from hemiparesis after cerebral infarction: a longitudinal study with near-infrared spectroscopy [J]. Neurosci Res, 2007, 59 (2):136-144. DOI:10.1016/j.neures.2007.06.1466.
- [26] Lu K, Xu G, Li W, et al. Frequency-specific functional connectivity related to the rehabilitation task of stroke patients [J]. Med Phys, 2019, 46(4):1545-1560. DOI:10.1002/mp.13398.

- [27] Sukal-Moulton T, De Campos AC, Alter KE, et al. Relationship between sensorimotor cortical activation as assessed by functional near infrared spectroscopy and lower extremity motor coordination in bilateral
- 10.1016/j.nicl.2018.07.023.
 learn

 [28] Lin PY, Chen JJ, Lin SI. The cortical control of cycling exercise in stroke patients: an fNIRS study: cortical control of cycling exercise in stroke patients[J]. Hum Brain Mapp, 2013, 34(10): 2381-2390.
 [43] Baja
- [29] Jalalvandi M, Sharini H, Naderi Y, et al. Assessment of brain cortical activation in passive movement during wrist task using functional near infrared spectroscopy (fNIRS) [J]. Front Biomed Technol, 2019, 6 (2):99-105. DOI:10.18502/fbt.v6i2.1691.

DOI:10.1002/hbm.22072.

cerebral palsy [J]. Neuroimage Clin, 2018, 20(1): 275-285. DOI:

- [30] Choi DS, Lee HJ, Shin YI, et al. Modulation of cortical activity induced by high-frequency whole-body vibration exercise: an fNIRS study[J]. J Sport Rehabil, 2019: 28(7):665-670. DOI: 10.1123/ jsr.2017-0012.
- [31] Kato H, Izumiyama M, Koizumi H, et al. Near-infrared spectroscopic topography as a tool to monitor motor reorganization after hemiparetic stroke: a comparison with functional MRI[J]. Stroke, 2002, 33(8): 2032-2036. DOI:10.1161/01.STR.0000021903.52901.97.
- [32] Holper L, Biallas M, Wolf M. Task complexity relates to activation of cortical motor areas during uni- and bimanual performance: a functional NIRS study[J]. Neuroimage, 2009,46(4):1105-1113. DOI:10. 1016/j.neuroimage.2009.03.027.
- [33] Lee SH, Jin SH, An J. The difference in cortical activation pattern for complex motor skills: a functional near- infrared spectroscopy study
 [J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 14066. DOI: 10.1038/s41598-019-50644-9.
- [34] Yang CL, Lim SB, Peters S, et al. Cortical activation during shoulder and finger movements in healthy adults: a functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study[J]. Front Hum Neuro, 2020, 14: 260. DOI:10.3389/fnhum.2020.00260.
- [35] Nishiyori R, Bisconti S, Ulrich B. Motor cortex activity during functional motor skills: an fNIRS study[J]. Brain Topogr, 2016, 29(1): 42-55. DOI:10.1007/s10548-015-0443-5.
- [36] Arun KM, Smitha KA, Sylaja PN, et al. Identifying resting-state functional connectivity changes in the motor cortex using fNIRS during recovery from stroke[J]. Brain Topogr, 2020, 33(6): 710-719. DOI: 10.1007/s10548-020-00785-2.
- [37] Borot L, Vergotte G, Perrey S. Different hemodynamic responses of the primary motor cortex accompanying eccentric and concentric movements: a functional NIRS study [J]. Brain Sciences, 2018, 8(5): 75. DOI:10.3390/brainsci8050075.
- [38] Li Q, Feng J, Guo J, et al. Effects of the multisensory rehabilitation product for home-based hand training after stroke on cortical activation by using NIRS methods [J]. Neurosci Lett, 2020, 717: 134682. DOI:10.1016/j.neulet.2019.134682.
- [39] Li X, Krol MA, Jahani S, et al. Brain correlates of motor complexity during observed and executed actions [J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 10965. DOI:10.1038/s41598-020-67327-5.
- [40] Sagari A, Kanao H, Mutai H, et al. Cerebral hemodynamics during a cognitive-motor task using the limbs[J]. Front Hum Neurosci, 2020, 14: 568030. DOI:10.3389/fnhum.2020.568030.
- [41] Salzman T, Aboualmagd A, Badawi H, et al. Prefrontal cortex in-

volvement during dual-task stair climbing in healthy older adults: an fNIRS study[J]. Brain Sci, 2021, 11(1): 71. DOI:10.3390/brains-ci11010071.

- [42] Hatakenaka M, Miyai I, Mihara M, et al. Frontal regions involved in learning of motor skill-a functional NIRS study [J]. Neuroimage, 2007, 34(1): 109-116. DOI:10.1016/j.neuroimage.2006.08.014.
- [43] Bajaj S, Drake D, Butler AJ, et al. Oscillatory motor network activity during rest and movement: an fNIRS study[J]. Front Syst Neurosci, 2014, 8:13.DOI:10.3389/fnsys.2014.00013.
- [44] De Campos AC, Sukal-Moulton T, Huppert T, et al. Brain activation patterns underlying upper limb bilateral motor coordination in unilateral cerebral palsy: an fNIRS study[J]. Dev Med Child Neurol, 2020, 62(5): 625-632. DOI:10.1111/dmcn.14458.
- [45] Delorme M, Vergotte G, Perrey S, et al. Time course of sensorimotor cortex reorganization during upper extremity task accompanying motor recovery early after stroke: an fNIRS study[J]. Restor Neurol Neurosci, 2019, 37(3): 207-218. DOI:10.3233/RNN-180877.
- [46] Miyai I, YagurA H, Hatakenaka M, et al. Longitudinal optical imaging study for locomotor recovery after stroke [J]. Stroke, 2003, 34 (12):2866-2870. DOI:10.1161/01.STR.0000100166.81077.8A.
- [47] Wu J, Liu T, Huang J, et al. The effects of exercise fatigue on prefrontal and motor activations as measured by near-infrared spectroscopy
 [J]. Neuroreport, 2017, 28 (17):1134-1138. DOI:10.1097/WNR. 000000000000882.
- [48] Tyagi O, Zhu Y, Johnson C, et al. Neural signatures of handgrip fatigue in type 1 diabetic men and women [J]. Front Hum Neurosci, 2020, 14: 564969. DOI:10.3389/fnhum.2020.564969.
- [49] Tsubaki A, Takehara N, Sato D, et al. Cortical oxyhemoglobin elevation persists after moderate-intensity cycling exercise: a near-infrared spectroscopy study[J], Adv Exp Med Biol, 2017, 977:261-268.DOI: 10.1007/978-3-319-55231-6_36.
- [50] Rosner AO, Barlow SM.Hemodynamic changes in cortical sensorimotor systems following hand and orofacial motor tasks and pulsed pneumotactile stimulation [J].Somatosens Mot Res, 2016,33(3-4):145-155. DOI: 10.1080/08990220.2016.1219711
- [51] Decety J. Do imagined and executed actions share the same neural substrate[J]. Brain Res Cogn Brain Res, 1996, 3(2): 87-93. DOI:10. 1016/0926-6410(95)00033-X.
- [52] Batula AM, Mark JA, Kim YE, et al. Comparison of brain activation during motor imagery and motor movement using fNIRS[J]. Comput Intell Neurosci, 2017, 2017: 1-12. DOI:10.1155/2017/5491296.
- [53] Wriessnegger SC, Kirchmeyr D, Bauernfeind G, et al. Force related hemodynamic responses during execution and imagery of a hand grip task: a functional near infrared spectroscopy study [J]. Brain Cogn, 2017, 117: 108-116. DOI:10.1016/j.bandc.2017.06.010.
- [54] Ota Y, Takamoto K, Urakawa S, et al. Motor imagery training with neurofeedback from the frontal pole facilitated sensorimotor cortical activity and improved hand dexterity[J]. Front Neurosci, 2020, 14: 34. DOI:10.3389/fnins.2020.00034.
- [55] Mihara M, Miyai I, Hattori N, et al. Neurofeedback using real-time near-infrared spectroscopy enhances motor imagery related cortical activation[J]. PLoS One, 2012, 7(3): e32234. DOI:10.1371/journal. pone.0032234.

(修回日期:2021-12-28) (本文编辑:凌 琛)