·综述·

# 功能性近红外光谱技术在脑卒中患者运动功能康复中的应用进展*

眭有昕[1] 郭 川[2] 朱仕哲[1] 沈 滢[2] 王 尊[3] 王 彤[2,4]

脑卒中是我国成人致死、致残的首要病因[1],约70%—80%的卒中患者因残疾而不能独立生活[2],给家庭和社会带来沉重的经济负担。循证医学指出,脑卒中康复是降低致残率最有效的途径[3],而对脑卒中患者进行精准评定、制定个性化的康复治疗方案是脑卒中康复发展的必然趋势[4]。

功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)作为一种新型非侵入性脑成像工具,可通过检测大脑血氧代谢变化,反映大脑神经活动,评价脑卒中后功能恢复潜能和疗效。fNIRS具有安全、无创、便携、低成本、抗运动干扰等优点,是目前脑卒中后功能恢复的精准化评定工具[5]。本文综述其在脑卒中后运动功能康复中的应用进展。

## 1 fNIRS概述

### 1.1 fNIRS的成像原理

fNIRS是基于波长为650—1000nm的近红外光的一种光学成像技术,光子穿透至深层待测组织,根据生物组织中氧合血红蛋白(oxygenated hemoglobin, $HbO_2$)和脱氧血红蛋白(hemoglobin, HbR)对近红外光的吸收比周围组织强的特点,其中HbR对790nm以下的近红外光吸收更强,$HbO_2$对790nm以上的近红外光吸收更强,通过近红外光探针接收的散射光子量,可以反映与大脑皮层激活相关的局部血流动力学改变[6]。通常情况下,由于脑血管存在的自身调节机制,局部脑血流和局部氧代谢率保持相对稳定状态。而当大脑处于激活状态时,局部神经元发生电活动,根据神经血管耦合原理[7],局部脑血流会增加,脑组织血氧浓度随之发生改变[8],表现为$HbO_2$浓度的增加和HbR浓度的降低[9]。据此,fNIRS可以通过$HbO_2$、HbR和总血红蛋白(total hemoglobin, HbT)浓度的改变,间接地反映大脑的神经活动[10]。其成像原理与通过血氧水平依赖的功能磁共振成像(functional magnetic resonance image, fMRI)类似[11],都是基于血红蛋白浓度改变的无创性脑功能检测技术。

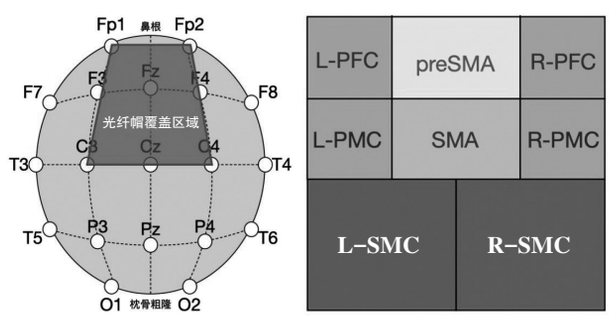
### 1.2 脑卒中后运动功能相关的fNIRS感兴趣区

fNIRS设备佩戴前,需要选取感兴趣区域(region of interest, ROI)。在研究脑卒中后运动功能恢复时,通常将fNIRS探针定位于额、顶叶区,覆盖运动皮层,包括双侧前额叶皮质(prefrontal cortex, PFC)、辅助运动前区(presupplementary motor area, preSMA)、皮质运动前区(premotor cortex, PMC)、辅助运动区(supplementary motor area, SMA)和感觉运动区(sensorimotor cortex, SMC)等[12],见图1。PFC主要负责计划、调节和控制人的心理活动[13],然而越来越多的证据表明PFC在调节躯体感觉输入的过程中发挥重要作用,参与人类高级行为的调控[14]。位于SMA前方的preSMA能够接收来自背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)的投影,这种连通性说明preSMA参与介导高阶的认知控制[15]。PMC和SMA构成Brodmann 6区,是次级运动区(second motor cortex, M2)的重要组成部分[16],在运动的准备、组织、执行与调节中发挥关键作用[17]。SMC包括执行运动的初级运动区(primary motor cortex, M1)和初级感觉皮层区(primary somatosensory cortex, S1)区[13],是参与运动控制的主要脑区。

## 2 fNIRS评估脑卒中后运动功能相关的大脑激活模式

脑卒中后运动功能障碍与血液供应不足、大脑氧合引起

图1 fNIRS覆盖脑区示意图




脑电图10/20系统下光纤帽定位　　各ROI脑区示意图

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.09.025
*基金项目:国家科技部重点研发计划(2018YFC2001600, 2018YFC2001603)
1 南京医科大学康复医学院,江苏省南京市,210029; 2 南京医科大学第一附属医院康复医学中心; 3 南京中医药大学康复教研室; 4 通讯作者
第一作者简介:眭有昕,女,硕士研究生;收稿日期:2021-03-11

的皮层损害有关。因此，及时监测脑循环和氧合的变化可以反映康复疗效[18]。临床常用的行为学评估是从外周肢体表现反映患者的功能水平[19]，评估结果因评估者而异，存在一定的主观性。而fNIRS是用于评估大脑皮层活动的功能成像，可在躯体运动过程中进行实时监测，不仅有利于观测患者执行运动时相关脑区的激活状态，而且能够与主观的行为学评估互为补充，为脑卒中后运动功能恢复提供全面而精准的评定，为临床及科研提供客观的依据。

**2.1** 上肢运动功能恢复评估

在上肢功能康复评定中，Saita等[20]通过fNIRS观察具备生物电反馈和视觉反馈的外骨骼机器人对脑卒中患者运动脑区的影响，发现与治疗前相比，治疗后患侧半球M1区$HbO_2$显著升高，HbR无显著性改变，提示患侧M1区在机器人辅助运动下显著激活。揭示了此种能够提供生物电刺激及视觉反馈的上肢机器人，能够有效诱导脑卒中患者上肢运动任务相关的中枢反应，改善脑卒中患者的上肢运动功能。Kinoshita等[10]应用fNIRS对双侧大脑皮质进行监测，提供了与运动功能相关的脑皮质激活信息。在患者训练前后使用fNIRS采集患手手指重复屈伸动作时的信号变化，观察双侧M1、PMC、SMA区的$HbO_2$的变化量（$\Delta HbO_2$），并根据$\Delta HbO_2$计算偏侧化指数（laterality index，LI）。结果发现经过2个月上肢干预后，患侧半球M1区激活程度显著提高，且关于M1区卒中后3个月与卒中后1个月的LI变化量（ΔLI）与手臂动作调查量表（action research arm test，ARAT）得分呈负相关，说明亚急性卒中的患者的皮层脑活动向健侧半球的转移与运动功能恢复有关，反映了半球间平衡与运动功能恢复间的关系。Delorme等[21]也发现脑卒中患者随着上肢运动功能的恢复，其LI逐渐趋向于正值，即患侧半球激活程度增加，与Fugl-Meyer上肢运动功能测试（Fugl-Meyer assessment for upper limb ，FMA-UL）成正比，显示出双侧大脑半球间的平衡与上肢运动功能恢复相关联。Arun等[22]进一步应用fNIRS分析轻度脑卒中患者上肢训练前后的运动皮质功能连接变化，研究偏瘫上肢功能恢复过程中不同脑区间的关系。结果发现在上肢功能恢复过程中，左侧半球受损的患者表现为两侧半球间的PMC、SMA的功能连接增强，而右侧半球受损患者表现为患侧半球的PMC、SMA功能连接增强，两侧半球间的PMC、M1区的功能连接增强。

**2.2** 下肢运动和平衡功能恢复评估

fNIRS在活动状态下具有较强的抵抗运动伪影的能力，且可随身佩戴，因而在下肢步行功能及平衡功能评估中得以应用。Caliandro等[23]探讨下肢外骨骼机器人引起的运动学变化与中枢步态控制之间的关系。用表面肌电记录受试者在有、无机器人辅助下平地步行的双侧下肢运动学信息，并通过fNIRS观察PFC脑区的皮质活动状态。结果发现卒中患者在机器人辅助下步行时比未佩戴机器人时，双侧PFC区的$HbO_2$、组织氧指数（tissue oxygen index，TOI）显著升高、HbR降低，而健康人群未见明显变化。此研究阐明了卒中后下肢运动障碍的患者在平地步行时，相比健康人需要调动更多的注意力，且机器人辅助下的步行训练能够更好的激活PFC区。一项最新的系统评价[24]分析了不同步态时期和步行状态对脑卒中患者大脑皮质状态的影响，发现在步行的启动和加速阶段，双侧PFC显著激活，而在平稳步行及复杂步行（如设置步行障碍、双任务步行）中，双侧PFC、PMC、SMA、SMC等多个脑区表现出广泛的激活，体现了脑卒中后步行训练多样化的必要性。

此外，fNIRS能够反映脑卒中后平衡功能相关的中枢活动。Fujimoto等[25]发现脑卒中患者经过高强度的平衡训练后，当处于失衡状态时，双侧SMA的$HbO_2$显著增加，而HbR无显著改变，表现出双侧SMA的高度激活。此研究揭示了位于大脑内侧的SMA区在脑卒中后姿势平衡控制中起着关键作用。与前期Mihara等[26]的研究结果一致，卒中患者在进行姿势平衡控制时，双侧的PFC、PMC、SMA都会有所激活，其中PFC和SMA显著激活，体现了PFC和SMA对脑卒中患者姿势维持和平衡控制的重要作用。

**2.3** 脑网络功能连接评估相关运动功能

脑功能重塑是脑卒中后运动功能恢复的重要机制之一，目前通过fMRI观察脑卒中后脑功能重塑的相关研究已日趋成熟[27]，但由于fMRI对头动极为敏感，因此对患者有严格的姿势限制，无法实现动态脑功能检测。相比之下，fNIRS可通过便携设备实现多功能体位（如坐位、立位等）下运动相关的脑皮质活动状态监测，由此反映康复训练过程中患者的神经重塑过程，可以作为探索脑卒中后运动功能恢复机制的有效工具[28]。Huo等[29]通过fNIRS研究脑卒中患者进行四肢联动运动训练时相关皮质活动状态的改变，以双侧半球的PFC、运动皮质（motor cortex，MC）、枕叶（occipital lobe，OL）为感兴趣区，并作脑网络分析。结果发现与健康人相比，脑卒中患者在进行四肢联动运动时健侧半球MC区的激活显著高于患侧半球，且试验组健侧MC、OL与患侧PFC的功能连接明显增强。Lu等[30]也开展了与之类似的研究，认为通过fNIRS评估不同脑区的功能连接（functional connectivity，FC），可以作为定量评估康复训练疗效的新方法，实现精准化评估。由此可见，fNIRS在运动功能评估中，不仅能够动态反映不同脑区的激活状态，而且可以分析不同脑区的功能连接情况，有助于进一步了解大脑活动与行为之间的相互关系。

## 3 fNIRS用于优化脑卒中运动康复方案

fNIRS对大脑皮层激活状态的监测，不仅有利于康复疗

效的评估,而且有助于制定康复方案。然而,临床康复方案的制定不仅需要考虑个体间的差异,还需要随患者功能恢复的进展,适时调整训练方案[31]。fNIRS可提供运动恢复过程中神经可塑性的动态变化信息,这样不仅可以通过脑卒中患者的外周运动表现,还可依据患者大脑的激活模式及程度,制定并优化个体化运动康复方案。

Bai等[15]应用fNIRS研究感觉刺激是否有利于脑卒中后运动功能恢复,给所有被试左手佩戴能够每分钟震动一次的腕表装置,并在这种震感的提示下连续做10次的握紧、放松动作。ROI选取了运动、感觉及认知相关的多个脑区,检测指标为$\Delta HbO_2$。结果发现在感觉刺激下M1、S1及DLPFC的$HbO_2$明显升高,皮质激活程度显著高于假刺激组。此研究揭示了在外界感觉刺激下进行运动训练有利于脑卒中患者的运动功能恢复,同时能够提高认知—行为能力,是一种外周—中枢—外周的闭环式训练方法。Bae等[32]使用fNIRS探索手腕康复机器人的最优运动频率,旨在最大程度地提高大脑可塑性,促进运动功能恢复。选取了9例右侧偏瘫的患者,将机器人设置为低频(0.25Hz)、中频(0.5Hz)和高频(0.75Hz)三种不同频率的被动活动模式。观测SMC和PMA区的$\Delta HbO_2$,结果发现高频的腕部被动屈伸比低频、中频能够更好地激活运动相关皮质区域,促进手腕屈伸运动的恢复,此研究为临床应用手腕机器人提供了最优运动频率的参考。Chao等[33]研究了被动踩车时配合不同强度的电刺激对脑卒中患者的影响,以双侧PMC、SMA、SMC和次级感觉皮质(secondary sensory cortex, S2)为ROI。将受试者分为无刺激组、高强度(30mA)刺激组和低强度(10mA)刺激组进行被动踩车训练。结果发现与无刺激组和高强度(30mA)电刺激组相比,低强度(10mA)电刺激下能够更好的激活双侧S2区,该研究为脑卒中患者进行被动模式下踩车训练时,选择不同强度的电刺激提供了指导。

目前关于fNIRS优化运动康复方案方面的研究多集中在外周干预方案的指导。Hara等[34]在fNIRS引导下对卒中后失语患者进行重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)治疗,显著改善了语言功能,为fNIRS应用于中枢调控技术提供了可行性。未来可将fNIRS与非侵入性脑刺激结合,如rTMS、经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)等,应用于卒中后运动功能障碍,更有针对性地对目标脑区进行干预,实现中枢与外周的闭环康复[35]。

## 4 fNIRS用于脑卒中运动功能预后判断

多种非侵入性脑影像技术已被应用于评估脑卒中后不同脑区的静息态功能连接(resting-state functional connectivity, rsFC),如fMRI、PET等,反映人脑内在功能结构间的相互联系,帮助判断疾病的预后[36]。fNIRS作为一种新兴的无创脑成像技术,已被证实用于评估大脑rsFC的可行性[37]。Li等[19]通过fNIRS与脑电图(electroencephalogram, EEG)的联合成像方法研究上肢偏瘫的脑卒中患者功能改善与脑网络连接之间的相互关系,进行为期4周的常规上肢康复训练,分别于干预前后进行FMA-UL评估和fNIRS-EEG脑成像,并分析脑功能连接情况。ROI选择双侧M1、S1、PMC和SMA。结果发现干预前患侧半球SMA-M1的功能连接性与干预后FMA-UL呈显著负相关($r$= - 0.745),即患侧半球SMA-M1的功能连接性越强,康复训练后上肢运动功能改善情况越差。

同时,还可根据大脑半球间的LI判断运动功能预后。Tamashiro等[38]给予59例脑卒中患者健侧半球低频rTMS和高强度的作业治疗(occupational therapy, OT),以研究两侧大脑半球间的不对称性与上肢运动功能恢复之间的关系。在试验前用fNIRS记录所有患者SMC和SMA区的$HbO_2$,并由此计算LI。根据试验前的LI将患者分为两组,健侧半球优势组(n=27,LI: - 1—0)和患侧半球优势组(n=32,LI: 0—1),分别进行为期15天的LF-rTMS/OT训练。结果发现干预前的LI与干预后FMA-UL、Wolf运动功能测试评分呈负相关,即干预前的LI越低,干预后运动功能恢复越好。基于fNIRS的脑功能网络和半球间不对称性分析体现了对脑卒中后运动功能恢复的重要预测价值,对临床应用fNIRS具有重要指导意义。

## 5 基于fNIRS的多模态脑成像在脑卒中后运动功能康复中的应用

由于fMRI、EEG、fNIRS等神经成像技术都有其自身的局限性,只能提供单一的大脑活动信息,因此多模态脑成像受到越来越多的关注[40]。据报道,通过不同的神经影像学重组,可以敏锐地观察到大脑的变化[22],反映脑卒中后与运动功能恢复相关的皮质动态变化信息。

其中,fNIRS-EEG联合成像应用较为广泛。fNIRS-EEG的结合可实现无可见光电干扰条件下,大脑皮层电活动和血氧代谢动力信息的联合检测与互相补充,由此更好地反映神经活动的时空特征信息,获得更高时空分辨率、更高精度的脑成像,具有更高的敏感性和特异性[39],已成为一种常用的多模态脑功能成像技术[40]。Berger等[41]总结了近十年来fNIRS-EEG系统应用于机器人辅助步态训练(robot-assisted gait training, RAGT)的研究,发现fNIRS-EEG的联合成像可从不同视角提供RAGT相关的神经电生理活动,有助于全面了解RAGT促进步态恢复的机制。Guhathakurta等[42]在一篇方法学论文中,通过fNIRS-EEG联合成像监测tDCS治疗缺血性卒中患者时大脑的神经元活动与血流动力学之间的

关系，充分肯定了便携式fNIRS-EEG多模态成像在监测tDCS诱发皮层活动中的作用，可用于指导tDCS对特定脑区的干预，实现精准治疗。

同时，fNIRS技术凭借其灵活性和可移动性，逐渐应用于无创型脑机接口技术（brain-computer interfaces，BCI）。基于fNIRS的BCI技术是以血流动力学反应为神经成像方式，通过大脑活动来控制计算机或其他外部设备的技术，促进瘫痪患者与周围环境进行交互[43]。已有研究证明将其应用于脑卒中手功能康复[44]、步行训练[45]及坐站训练[46]中的可行性，可以改善运动皮质的兴奋性[47]，提高脑卒中患者的运动功能[48]。目前基于fNIRS-EEG系统的多模态成像BCI技术尚未在临床中得以应用，主要用于科研。Koo等[49]在6例健康受试者中应用BCI执行运动想象（motor imagery，MI），发现使用fNIRS-EEG联合成像技术不仅可以通过NIRS的血氧信号检测到MI的发生，而且可以通过EEG采集的脑电信号将MI对应的大脑信号进行分类（左手/右手抓取）。该系统对MI总体检出率达到98%，真阳性率达到88%。与Fazli等[50]得出的结论一致，认为基于fNIRS-EEG的联合成像能够显著提高BCI的性能。不仅可以作为BCI新分析方法的应用，而且为MI疗法在脑卒中后运动功能康复中的应用提供了更好的技术支持。

有关fNIRS的其他多模态成像技术在脑卒中方向的研究尚未见报道，但Huppert等[51]在健康人群中通过fNIRS-fMRI和fNIRS-MEG联合成像，发现fNIRS的空间定位与fMRI和脑磁图（magnetoencephalogram，MEG）结果密切相关，且在执行任务期间，这三种成像所表现的脑皮质反应呈线性相关。该研究为未来在脑卒中领域应用fNIRS-fMRI、fNIRS-MEG的多模态成像提供了依据。

## 6 小结

fNIRS作为一种新兴的脑成像技术，已逐渐成为评价脑卒中患者脑功能状态的有力工具，但也存在一定的局限性。近红外光在头颅的穿透深度约为1.5—2.5cm，因此只能浅皮层成像[47]；与fMRI比较，其空间分辨率低、信噪比低且定位不够精确[31]。此外，由于血氧信号滞后于神经电生理信号，因此fNIRS的时间分辨率（约200ms）低于EEG。

通过观察大脑激活情况，fNIRS可作为脑卒中损伤机制、神经重塑过程及疗效评价的有效工具[52]，并且有助于提升对脑卒中患者预后的判断，优化康复训练方案，具有广阔的应用前景。本综述纳入的研究样本量较小，都是基于外周肢体运动的脑区激活状态观测，与中枢干预方式联合的较少，希望未来能够开展多中心、大样本的研究，实现外周与中枢的联合康复，最大程度促进脑卒中后运动功能恢复，并为fNIRS临床应用提供更高的循证依据。

## 参考文献


[1] 《中国脑卒中防治报告》编写组，《中国脑卒中防治报告2019》概要[J]. 中国脑血管病杂志，2020，17(5)：272—281.

[2] 张通，赵军. 中国脑卒中早期康复治疗指南[J]. 中华神经科杂志，2017，50(6)：405—412.

[3] 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)：e98—e169.

[4] 吴毅. 脑卒中精准康复[J]. 中国现代神经疾病杂志，2017，17(3)：161—165.

[5] 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.

[6] Chen WL，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.

[7] Iadecola C. The neurovascular unit coming of age：a journey through neurovascular coupling in health and disease[J]. Neuron，2017，96(1)：17—42.

[8] Yucel MA，Selb JJ，Huppert TJ，et al. Functional near infrared spectroscopy：enabling routine functional brain imaging[J]. Curr Opin Biomed Eng，2017，4：78—86.

[9] 胡汉彬. 功能近红外光谱成像研究及应用[D]. 合肥：中国科学技术大学，2010.

[10] Kinoshita S，Tamashiro H，Okamoto T，et al. Association between imbalance of cortical brain activity and successful motor recovery in sub-acute stroke patients with upper limb hemiparesis：a functional near-infrared spectroscopy study[J]. Neuroreport，2019，30(12)：822—827.

[11] Cui X，Bray S，Bryant DM，et al. A quantitative comparison of NIRS and fMRI across multiple cognitive tasks[J]. Neuroimage，2011，54(4)：2808—2821.

[12] Yang M，Yang Z，Yuan T，et al. A systemic review of functional near-infrared spectroscopy for stroke：current application and future directions[J]. Front Neurol，2019，10：58.

[13] Branco MP，De Boer LM，Ramsey NF，et al. Encoding of kinetic and kinematic movement parameters in the sensorimotor cortex：a brain-computer interface perspective[J]. Eur J Neurosci，2019，50(5)：2755—2772.

[14] Brown MJN，Staines WR. Differential effects of continuous theta burst stimulation over left premotor cortex and right prefrontal cortex on modulating upper limb somatosensory input[J]. Neuroimage，2016，127：97—109

[15] Bai Z，Fong KNK. "Remind-to-Move" treatment enhanced activation of the primary motor cortex in patients with stroke[J]. Brain Topogr，2020，33(2)：275—283.

[16] Barthas F，Kwan AC. Secondary motor cortex：where 'sensory' meets 'motor' in the rodent frontal cortex[J]. Trends Neurosci，2017，40(3)：181—193.

[17] 窦佳鸣，李春光，眭演祥，等. 重复经颅磁刺激对脑卒中后上肢功能影响的近红外脑功能成像研究[J]. 中华物理医学与康复杂志，2019，6：418—423.

[18] Yang M，Yang Z，Yuan T，et al. A systemic review of functional near-infrared spectroscopy for stroke：current ap-

plication and future directions[J]. Front Neurol. 2019，10：58.

[19] Li R，Li S，Roh J，et al. Multimodal neuroimaging using concurrent EEG/fNIRS for poststroke recovery assessment：an exploratory study[J]. Neurorehabil Neural Repair，2020，34(12)：1099—1110.

[20] Saita K，Morishita T，Arima H，et al. Biofeedback effect of hybrid assistive limb in stroke rehabilitation：a proof of concept study using functional near infrared spectroscopy [J]. PLoS One，2018，13(1)：e0191361.

[21] 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.

[22] 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.

[23] Caliandro P，Molteni F，Simbolotti C，et al. Exoskeleton-assisted gait in chronic stroke：an EMG and functional near-infrared spectroscopy study of muscle activation patterns and prefrontal cortex activity[J]. Clin Neurophysiol，2020，131(8)：1775—1781.

[24] Lim SB，Louie DR，Peters S，et al. Brain activity during real-time walking and with walking interventions after stroke：a systematic review[J]. J Neuroeng Rehabil，2021，18(1)：8.

[25] Fujimoto H，Mihara M，Hattori N，et al. Cortical changes underlying balance recovery in patients with hemiplegic stroke[J]. Neuroimage，2014，85(1)：547—554.

[26] 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.

[27] 张豪杰，李芳，李晁金子，等. 神经影像在卒中后脑可塑性机制中的应用进展[J]. 中国康复理论与实践，2021，27(1)：48—53.

[28] Perrey S. Possibilities for examining the neural control of gait in humans with fNIRS[J]. Front Physiol，2014，5：204.

[29] 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.

[30] 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.

[31] Rieke JD，Matarasso AK，Yusufali MM，et al. Development of a combined，sequential real-time fMRI and fNIRS neurofeedback system to enhance motor learning after stroke [J]. J Neurosci Methods，2020，341：108719.

[32] Bae SJ，Jang SH，Seo JP，et al. A pilot study on the optimal speeds for passive wrist movements by a rehabilitation robot of stroke patients：a functional NIRS study[J]. IEEE Int Conf Rehabil Robot，2017，2017：7—12

[33] Chao CL，Lin PY，Hoe ZY，et al. Near infrared spectroscopy study of cortical excitability during electrical stimulation-assisted cycling for neurorehabilitation of stroke patients [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng，2018，26(6)：1292—300.

[34] Hara T，Abo M，Kakita K，et al. The effect of selective transcranial magnetic stimulation with functional near-infrared spectroscopy and intensive speech therapy on individuals with post-stroke aphasia[J]. Eur Neurol，2017，77(3—4)：186—194.

[35] Sitaram R，Ros T，Stoeckel L，et al. Closed-loop brain training：the science of neurofeedback[J]. Nat Rev Neurosci，2017，18(2)：86—100.

[36] 吴毅. 脑卒中康复的精准评定[J]. 康复学报，2016，26(5)：1—7

[37] Zhang H，Zhang YJ，Duan L，et al. Is resting-state functional connectivity revealed by functional near-infrared spectroscopy test-retest reliable?[J]. J Biomed Opt，2011，16(6)：067008.

[38] Tamashiro H，Kinoshita S，Okamoto T，et al. Effect of baseline brain activity on response to low-frequency rTMS/intensive occupational therapy in poststroke patients with upper limb hemiparesis：a near-infrared spectroscopy study [J]. Int J Neurosci，2019，129(4)：337—343.

[39] Chiarelli AM，Zappasodi F，Di Pompec F，et al. Simultaneous functional near-infrared spectroscopy and electroencephalography for monitoring of human brain activity and oxygenation：a review[J]. Neurophotonics，2017，4(4)：041411.

[40] 周伊婕，宋西姊，何峰，等. 基于脑电的多模态神经功能成像新技术研究进展[J]. 中国生物医学工程学报，2020，39(5)：595—602.

[41] Berger A，Horst F，Müller S，et al. Current state and future prospects of EEG and fNIRS in robot-assisted gait rehabilitation：a brief review[J]. Front Hum Neurosci，2019，13：172.

[42] Guhathakurta D，Dutta A. Computational pipeline for NIRS-EEG joint imaging of tDCS-evoked cerebral responses-an application in ischemic stroke[J]. Front Neurosci，2016，10：261.

[43] Naseer N，Hong KS. fNIRS-based brain-computer interfaces：a review[J]. Front Hum Neurosci，2015，28(9)：3.

[44] Lee J，Mukae N，Arata J，et al. A multichannel-near-infrared-spectroscopy-triggered robotic hand rehabilitation system for stroke patients[J]. IEEE Int Conf Rehabil Robot，2017，2017：158—163.

[45] Rea M，Rana M，Lugato N，et al. Lower limb movement preparation in chronic stroke：a pilot study toward an fNIRS-BCI for gait rehabilitation[J]. Neurorehabil Neural Repair，2014，28(6)：564—575.

[46] Almulla L，Alnaib I，Althobaiti M. Hemodynamic responses during standing and sitting activities：a study toward fNIRS-BCI[J]. Biomed Phys Eng Express，2020，6(5)：055005.

[47] Castermans T，Duvinage M，Cheron G，et al. Towards effective non-invasive brain-computer interfaces dedicated to gait rehabilitation systems[J]. Brain Sci，2013，4(1)：1—48.

[48] Ushiba J，Soekadar SR. Brain-machine interfaces for reha-

bilitation of poststroke hemiplegia[J]. Prog Brain Res, 2016, 228:163—183
[49] Koo B, Lee HG, Nam Y, et al. A hybrid NIRS-EEG system for self-paced brain computer interface with online motor imagery[J]. J Neurosci Methods, 2015, 244:26—32.
[50] Fazli S, Mehnert J, Steinbrink J, et al. Enhanced performance by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface[J]. Neuroimage, 2012, 59(1):519—529.
[51] Huppert T, Barker J, Schmidt B, et al.Comparison of group-level, source localized activity for simultaneous functional near-infrared spectroscopy-magnetoencephalography and simultaneous fNIRS-fMRI during parametric median nerve stimulation[J]. Neurophotonics, 2017, 4(1):015001.
[52] 崔威，李春光，徐嘉诚，等. 功能性近红外光谱技术在神经疾病中的应用[J]. 中国康复理论与实践，2020，26(7):771—774.

·综述·

# 运动相关性脑震荡诊疗与康复方案*

张 新[1] 潘韵竹[1] 李建军[1,2]

全球每年约有1000万创伤性颅脑损伤病例，其中75%—90%为轻型颅脑损伤，美国每年就有近百万人遭受运动相关性脑震荡(sport related concussion, SRC)的困扰，在赛场上，脑震荡运动员会出于尽快重返比赛的目的不及时报告病状，或虽未现场表现出明显的症状但症状会逐渐显现，因此SRC被称为“沉默的流行病”，然而无论何种方式的沉默都会给患者带来长远的身心影响[1]。有研究发现，反复发生SRC运动员在晚年时相比常人有较高的认知心理障碍、执行控制力缺陷等慢性创伤性脑病表现[2—5]。近年来，SRC发生率逐年增加，高中生运动损伤中SRC占8.9%，大学生占5.8%[1,6]。SRC可以发生在所有的运动项目中，尤其是在足球、摔跤、冰球和长曲棍球等碰撞和接触的运动项目中有更高的发生率[7]。国际运动教练员协会发表体育运动相关脑震荡管理的国际共识将脑震荡定义为由生物机械力引起的脑损伤，产生复杂的病理生理过程，通常导致快速而短暂神经功能损伤并自发缓解[8]。国内定义脑震荡是一种轻型的原发性脑损伤，占脑创伤发病率的80%—90%，指脑组织在头部、面部、颈部遭受生物机械力作用下发生的病理生理改变，表现为不超过30min的意识丧失，不超过24h的遗忘，头痛、头晕等短暂可逆的神经系统功能障碍，常规影像学检查未发现异常的一组临床综合征[9]。SRC可以给运动员的职业生涯和人生造成巨大影响，近年来运动性脑损伤研究热点集中在SRC领域，研究主要关注完善运动相关脑损伤诊断评估、治疗康复、重返运动场评估及建立预防保障体系[10]。

## 1 脑震荡后综合征

脑震荡后综合征是一种轻型脑损伤的后遗症，常表现为头痛、头晕、失眠、心慌、焦虑、注意力不集中等神经精神、神经心理症状，这种症状多在数周内恢复，其中3%—5%可持续数月到数年，对患者生活、学习、重返赛场、社交等能力产生不良影响[11—12]。WHO定义脑震荡后综合征临床标准为具有以下3种或以上的持续性症状，包括疲劳、头痛、头晕、易怒、失眠、注意力不集中或记忆困难，没有规定时间范围[13]。既往反复多次诊断脑震荡病史者，年轻女性，有认知功能障碍史、情感障碍、抑郁及焦虑等病史者患脑震荡后综合征风险增加[14—17]。脑震荡后综合征是持续不缓解的非特异性症状，即没有明确神经病理生理学依据的相关特征性临床表现，需要对其症状进行鉴别诊断，如既往情感障碍史、偏头痛、精神健康等问题，需要对颈椎、前庭功能、视觉等进行相关检查排除器质性病变。

## 2 脑震荡病理学基础

在外力直接作用头、面或颈部，或者外力作用身体其他部位后传导至头颈部，导致脑组织在加速、减速、旋转等作用

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.09.026
*基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFF0301104)
1 中国康复研究中心北京博爱医院，首都医科大学康复医学院，北京市，100068；2 通讯作者
第一作者简介：张新，男，副主任医师；收稿日期：2022-01-17