

定量脑电图在脑卒中运动功能障碍康复中的应用进展

张宇佳^{1,2} 陈健尔^{1,2,3}

¹浙江中医药大学第三临床医学院, 杭州 310053; ²浙江中医药大学附属第三医院, 杭州 310009; ³浙江康复医疗中心, 杭州 310052

通信作者: 陈健尔, Email: chenje@zcmu.edu.cn

【摘要】 运动功能障碍是脑卒中患者常见的症状之一,严重影响日常生活活动能力和生活质量。定量脑电图(qEEG)作为一种非侵入性的脑功能成像技术,近年来被逐渐应用于临床。本文就 qEEG 在脑卒中运动功能障碍评估及康复治疗中的应用进展作一综述,旨在为相关研究提供参考。

【关键词】 定量脑电图; 脑卒中; 运动功能障碍; 康复

基金项目:浙江省重点科技研发计划项目(2021C03050);杭州市科技发展计划项目(2020ZDSJ0881)

Funding: Key Scientific and Technological Research and Development Program of Zhejiang Province (2021C03050); Science and Technology Development Plan Project of Hangzhou (2020ZDSJ0881)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.016

脑卒中已成为威胁人类健康的重要病因^[1]。多数脑卒中患者即使在康复后也会遗留不同程度的运动功能障碍^[2],导致跌倒风险增加,严重影响患者的日常生活活动能力和生活质量^[3]。现代脑卒中神经康复观点倾向于采用高强度、高重复性的任务导向性训练以及“脑-肢协同治疗技术”^[4]。运动功能障碍的康复治疗手段是基于运动再学习原理,来改善运动神经网络的可塑性,并且已被证实能有效促进慢性期脑卒中患者的运动功能恢复^[5-6]。

定量脑电图(quantitative electroencephalography, qEEG)是应用计算机对脑电及诱发电位进行时域和频域计算与显示的新技术。qEEG 能够敏感地监测因脑血流下降而造成的大脑内神经元的异常放电活动,通过复杂的数学算法可以将常规脑电图的频率、节律、波幅等转换为可量化的参数,能够实时、准确地反映出脑功能变化^[7]。qEEG 克服了常规脑电图分析受主观影响的局限性,能通过时域或频域分析来客观量化脑电活动,可有效反映大脑皮质潜在的功能状态,具有便携、低成本、安全、分辨率较高等优势^[8]。

与功能性磁共振成像和脑磁图相比,qEEG 可以监测受试者在运动执行过程中的大脑活动。与功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)相比,qEEG 具有更高的时间分辨率。有研究表明,qEEG 可以作为评判脑卒中后运动功能预后的特异性生物标记物,进而为脑卒中患者的治疗方案提供参考,实现个性化的运动康复^[9]。本文就 qEEG 在脑卒中运动功能障碍康复中的应用作一综述,分析目前存在的问题,为 qEEG 在神经康复领域的应用提供依据。

qEEG 在脑卒中运动功能障碍评估中的应用

一、评估大脑皮质功能网络连接

功能连接是指大脑不同区域间的神经生理活动在时间序列上的相关性,是一种绘制大脑功能网络的有效方法^[10]。在脑卒中后的功能恢复过程中,大脑皮质的部分未损伤区域可以补偿受损的神经功能,并构建新的神经网络^[11]。并且大脑部分区

域中的皮质-皮质功能网络连接可能会随着康复训练的深入而增加,从而促进脑卒中后偏瘫患者运动功能的恢复。

大脑内的功能网络连接情况可以通过基于 qEEG 的分析来评估,以获得相关系数。相关系数被认为是衡量不同大脑皮质区域之间功能连接程度的定量指标^[12]。目前,利用 qEEG 的相关分析来评估神经系统疾病患者的大脑功能连接程度的研究较多^[13-14]。Zheng 等^[15]利用静息态 qEEG 观察脑卒中患者康复训练过程中的功能网络连接情况,发现损伤半球的相关系数显著增加,半球间的连接加强,提示部分皮质-皮质区域的功能网络连接随着康复训练的进行有所增强。进一步的研究表明,qEEG 相关系数和脑损伤半球 F3-F7 或 F4-F8 运动任务激活的升高,可作为脑卒中后偏瘫患者上肢运动功能结局的预测指标^[16]。

在大脑皮质功能网络连接与运动功能的关系方面,有研究通过初级运动皮质(M1)qEEG 评估了脑卒中患者患侧上肢的运动恢复情况,发现从对侧 M1 到同侧 M1,β 带静息状态下的功能连接显著增加,表明静息状态下功能连接的这种变化与脑卒中后亚急性期上肢运动功能恢复相关^[17]。Hordacre 等^[18]研究表明,下行运动通路较为完整的患者,其半球间静息状态下的功能连接更强,且静息状态下的功能连接与上肢运动功能呈正相关。Hoshino 等^[19]证实静息状态下双侧半球内功能连接、踝关节运动时同侧半球内功能连接和两侧 M1 间半球内功能连接,均与下肢运动功能恢复有关。

二、评估大脑半球间偏侧化

在静息状态下,大脑呈现出半球间相互作用的活跃状态。脑卒中后的重组可导致与解剖学相关皮质区域神经活动的变化。成对衍生的大脑对称指数(brain symmetry index, BSI)是静息状态 qEEG 参数,可反映受影响和未受影响半球成对同源通道之间 qEEG 信号频谱功率的不对称量,BSI 的标准化范围为 0 到 1,当 BSI 为 0 时,表示双侧半球对称性最好,当 BSI 为 1 时,表示双侧半球对称性最差;δ/α 相对功率比(δ/α ratio, DAR)是评估脑卒中患者预后的重要参数,DAR 比值越低,表明患者的

神经功能预后越好^[20]。BSI 和 DAR 两个参数有利于理解脑卒中后的大脑半球受累模式^[21]。

Saes 等^[22]研究表明,慢性期脑卒中患者半球间频谱功率不对称,其中以低频表现最为明显,考虑与上肢运动功能障碍有关。Anastasi 等^[23]观察到脑卒中患者的 BSI 较健康对照组显著升高,且是在亚急性期脑卒中后阶段增加,与脑卒中后 1~2 个月的运动功能相关。一项静息状态 qEEG 与脑卒中后早期临床神经损伤恢复的纵向研究表明,受影响半球 DAR 和定向 BSI 可反映神经损伤的整体改善情况,且定向 BSI 与脑卒中后早期上肢运动功能恢复相关,频谱特征的变化并不局限于神经损伤恢复的时间窗^[20]。因此,在脑卒中功能恢复的研究中增加 BSI 评估,可能有利于深入探究皮质重组与运动恢复之间的关系。

三、评估皮质-运动系统的变化

皮质-肌肉相干性(corticomuscular coherence, CMC)可用于量化大脑和肌肉之间的功能连接情况,反映运动控制过程中皮质-肌肉的相互作用,是分析大脑皮质与肌肉间皮质-脊髓通路功能连通性的有效方法^[24-25]。

Xu 等^[26]对健康人和脑卒中患者单侧踝关节静态背屈时的 qEEG 和肌电图进行了记录,结果发现脑卒中患者的下肢 CMC 明显较低,认为大脑皮质与下肢肌肉之间的 CMC 可作为脑卒中康复评估的一种新的生物标志物。由于脑卒中后运动功能的神经可塑性是一种涉及下行和上行皮质肌肉通路的双向改变^[27],Zhou 等^[28]采用定向 CMC 方法,发现脑卒中后的上肢代偿表现为从远端到近端的下行反馈改变,而精细运动控制的远端上肢的上行反馈增加,分析认为原因是健侧半球的代偿和前运动皮质的抑制减弱。Bao 等^[29]通过记录 qEEG 和肌电图信号,发现在接受重复神经肌肉电刺激踏板训练后,慢性期脑卒中患者的皮质-肌肉相互作用显著增强,并且这种改善在患侧大脑半球和偏瘫下肢肌肉之间的上行和下行通路上都得到了体现。

传统的 CMC 分析主要基于相干性方法,无法确定耦合方向,而 Granger 因果关系(Granger causality, GC)在识别线性因果关系方面受到限制^[30]。She 等^[31]提出了一种基于时频域的 GC(copula-GC)方法,来评估脑卒中上肢运动障碍患者和健康人在稳态抓握任务中的 CMC 强度,结果表明 CMC 现象是双向的,提示基于 copula-GC 的分析方法可以有效检测皮质振荡与肌肉活动之间的复杂功能耦合关系,为运动控制和康复评估提供了一种潜在的定量分析手段。

qEEG 在脑卒中运动功能障碍康复治疗中的应用

一、评估康复机器人辅助训练的作用

康复机器人辅助训练(robot-assisted training, RAT)通过丰富的环境刺激(如感觉、运动和姿势刺激),可以促进大脑受损皮质恢复,提高运动控制能力,并改善运动功能^[32]。qEEG 可以评估不同任务下的 RAT 对大脑功能网络变化的影响,以更好地把控 RAT 在运动功能神经调控应用中的关键因素,有助于促进疾病恢复。

在上肢训练过程中,Gandolfi 等^[33]通过 qEEG 发现双侧重复上肢机器人辅助训练可以改善慢性期脑卒中患者的上肢运动功能,减少上肢痉挛,其痉挛与同侧感觉运动网络的脑电图变化相关。Trujillo 等^[34]评估了慢性期脑卒中患者静息状态下

的 qEEG 信号与接受上肢机器人辅助训练后运动结果之间的关系,结果发现功率比指数($\delta + \theta / \alpha + \beta$)与运动功能恢复显著相关,提示 qEEG 指标可能有助于预测运动预后,为临床决策提供有价值的信息。

在下肢训练过程中,Formaggio 等^[35]发现机器人辅助足部被动运动时,C3 和同侧额叶区的 $\alpha 2$ 节律不同步,在双侧运动区检测到 β 事件相关电位去同步化;在下肢运动想象任务中, $\alpha 1$ 在对侧感觉运动皮质、 $\alpha 2$ 在双侧运动区域以及 β 在头皮中央区域明显失同步。Calabrò 等^[36]采用 qEEG 发现,与传统地面步态训练相比,慢性期脑卒中患者在外骨骼机器人辅助下步行时,其额顶有效连接性显著增强。Molteni 等^[37]发现,与无辅助的地面行走相比,患者在接受外骨骼辅助步行后,对侧感觉运动区和同侧前额叶区 $\alpha 1$ 和 $\alpha 2$ 的节点强度增加,提示单次外骨骼训练可为慢性期脑卒中患者提供短期的神经可塑性调节效应。

二、评估脑机接口训练系统的作用

脑机接口(brain-computer interface, BCI)是一项新兴技术,能够将大脑活动直接转化为运动动作,被认为是促进脑卒中后肢体运动功能恢复的工具之一^[38-39]。BCI 的原理是通过强化趋于正常的与运动相关的脑活动(最常见的来源于 qEEG),从而改善脑卒中患者的运动功能^[40]。有基于神经反馈疗法的研究报道,BCI 控制系统可以改善受试者的注意力^[41-42]。

在上肢与手部功能方面,Mattia 等^[43]研究报道,亚急性期脑卒中患者在接受基于 qEEG-BCI 辅助的手运动想象训练后,手部功能显著改善,且疗效可以长期维持。Frolov 等^[44]将基于 qEEG-BCI 的运动想象训练应用于严重上肢瘫痪的脑卒中患者,结果发现患者手部的抓握能力改善。Pichiorri 等^[45]将 CMC(来自多个 qEEG 和肌电图通道)作为 BCI 混合特征的基础并开展研究,发现高密度 CMC 网络可以在简单的手部运动中捕获脑卒中患者的运动异常。

在下肢步态与平衡功能方面,Contreras-Vidal 等^[46]认为可利用 qEEG 判断脑卒中患者的步态运动学情况。Zhao 等^[47]对亚急性期脑卒中患者使用基于 qEEG-BCI 控制的机器人训练,并结合传统的物理治疗,结果发现其可以促进患者认知功能恢复,增强下肢运动功能。Li 等^[48]研究发现,基于 BCI 的下肢康复机器人能有效促进脑卒中患者的下肢运动功能恢复,这可能与改善大脑皮质兴奋性和白质纤维束连通性有关。此外,一种基于 qEEG-fNIRS 的混合性 BCI 技术,有望在监测神经可塑性方面取得突破,在研究步态和平衡障碍方面也具有较大的潜力^[49]。

问题与展望

qEEG 可呈现高时间分辨率,能精确收集高效、客观的大脑活动数据,但其空间分辨率受限^[50]。空间分辨率可以通过改进技术而提高。Kwon 等^[51]报道了一种深度卷积神经网络的超分辨率技术,其可以增强 qEEG 空间分辨率,同时保持其数据特性。Passera 等^[52]将经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)-qEEG 耦合作为神经成像工具,发现 TMS-qEEG 耦合的空间分辨率至少可达 10 mm。qEEG 的空间分辨率较差,而 fNIRS 可以提供较好的空间分辨率,将 qEEG 与 fNIRS 联合应用可以发挥优势互补作用,在噪声环境中有望保持一定的稳定

性^[53]。qEEG 信号会受低信噪比和伪影污染的影响^[54-56]。Alzahrani 等^[57] 研究报道,与圆盘电极相比,三极同心环电极可提高表面电活动记录的空间分辨率。Kilicarslan 等^[58] 对自适应降噪方案进行了优化,结果发现能够在脑电图测量中实时去除伪影。Zhang 等^[59] 提出了一种新的脑电信号认证框架,该框架具有良好的分类性能。

应用 qEEG 可以评估脑卒中后静息态和任务态下的大脑皮质功能网络连接情况。利用静息态 qEEG 的 BSI 参数,可分析大脑的偏侧化水平,为实现精准康复提供临床依据,深入了解大脑皮质重组和运动功能恢复之间的关系。将 qEEG 与肌电图联合,可以利用 CMC 技术来分析大脑皮质-肌肉之间的功能连接关系。通过 qEEG 观察发现,康复机器人训练可以激发患者的大脑神经可塑性,基于 qEEG-BCI 的运动想象训练可以有效促进重症脑卒中患者的功能恢复。

目前有关 qEEG 的研究,样本量小,范式也有所不同。在设备和信号处理技术方面,还可以采用新的算法、结合其它脑成像技术来改善 qEEG 在精度上的不足。此外,还可以设计使用更加便捷的电极和导电材料,提高受试者的舒适度。随着技术的改进,qEEG 将有望更好地被用于研究大脑功能网络的变化,在康复领域内发挥重要的临床价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang X, Elnady AM, Randhawa BK, et al. Combining mental training and physical training with goal-oriented protocols in stroke rehabilitation: a feasibility case study [J]. *Front Hum Neurosci*, 2018, 12: 125. DOI: 10.3389/fnhum.2018.00125.
- [2] Mustafaoglu R, Erhan B, Yeldan I, et al. Does robot-assisted gait training improve mobility, activities of daily living and quality of life in stroke? A single-blinded, randomized controlled trial [J]. *Acta Neurol Belg*, 2020, 120(2): 335-344. DOI: 10.1007/s13760-020-01276-8.
- [3] Hobbs B, Artemiadis P. A review of robot-assisted lower-limb stroke therapy: unexplored paths and future directions in gait rehabilitation [J]. *Front Neurobot*, 2020, 14: 19. DOI: 10.3389/fnbot.2020.00019.
- [4] 燕铁斌. 积极开展“脑-肢协同治疗技术”的临床应用研究 [J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(10): 1195-1197. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2021.10.001.
- [5] Rojek A, Mika A, Oleksy L, et al. Effects of exoskeleton gait training on balance, load distribution, and functional status in stroke: a randomized controlled trial [J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 1344. DOI: 10.3389/fneur.2019.01344.
- [6] Tedla JS, Dixit S, Gular K, et al. Robotic-assisted gait training effect on function and gait speed in subacute and chronic stroke population: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Eur Neurol*, 2019, 81(3-4): 103-111. DOI: 10.1159/000500747.
- [7] Bentes C, Peralta AR, Viana P, et al. Quantitative EEG and functional outcome following acute ischemic stroke [J]. *Clin Neurophysiol*, 2018, 129(8): 1680-1687. DOI: 10.1016/j.clinph.2018.05.021.
- [8] van Putten MJ, Hofmeijer J. EEG monitoring in cerebral ischemia: basic concepts and clinical applications [J]. *J Clin Neurophysiol*, 2016, 33(3): 203-210. DOI: 10.1097/wnp.0000000000000272.
- [9] Mane R, Chew E, Phua KS, et al. Prognostic and monitoring EEG-bio-markers for bci upper-limb stroke rehabilitation [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(8): 1654-1664. DOI: 10.1109/tnsr.2019.2924742.
- [10] Rätty S, Ruuth R, Silvennoinen K, et al. Resting-state functional connectivity after occipital stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2022, 36(2): 151-163. DOI: 10.1177/15459683211062897.
- [11] Guggisberg AG, Koch PJ, Hummel FC, et al. Brain networks and their relevance for stroke rehabilitation [J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(7): 1098-1124. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.04.004.
- [12] Jalili M, Knyazeva MG. Constructing brain functional networks from EEG: partial and unbiased correlations [J]. *J Integr Neurosci*, 2011, 10(2): 213-232. DOI: 10.1142/s0219635211002725.
- [13] Hassan M, Merlet I, Mheich A, et al. Identification of interictal epileptic networks from dense-EEG [J]. *Brain Topogr*, 2017, 30(1): 60-76. DOI: 10.1007/s10548-016-0517-z.
- [14] Malaia E, Bates E, Seitzman B, et al. Altered brain network dynamics in youths with autism spectrum disorder [J]. *Exp Brain Res*, 2016, 234(12): 3425-3431. DOI: 10.1007/s00221-016-4737-y.
- [15] Zheng F, Sato S, Mamada K, et al. Changes of cortico-cortical neural connections associated with motor functional recovery after stroke [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2022, 31(9): 106689. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2022.106689.
- [16] Zheng F, Sato S, Mamada K, et al. EEG correlation coefficient change with motor task activation can be a predictor of functional recovery after hemiparetic stroke [J]. *Neurol Int*, 2022, 14(3): 738-747. DOI: 10.3390/neurolint14030062.
- [17] Patel J, Pattison I, Glassen M, et al. EEG based resting state connectivity changes in the motor cortex associated with upper limb motor recovery in the subacute period post-stroke [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2022, 2022: 4801-4804. DOI: 10.1109/embc48229.2022.9870886.
- [18] Hordacre B, Goldsworthy MR, Welsby E, et al. Resting state functional connectivity is associated with motor pathway integrity and upper-limb behavior in chronic stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, 34(6): 547-557. DOI: 10.1177/1545968320921824.
- [19] Hoshino T, Oguchi K, Inoue K, et al. Relationship between lower limb function and functional connectivity assessed by EEG among motor-related areas after stroke [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2021, 28(8): 614-623. DOI: 10.1080/10749357.2020.1864986.
- [20] Saes M, Zandvliet SB, Andringa AS, et al. Is resting-state EEG longitudinally associated with recovery of clinical neurological impairments early poststroke? A prospective cohort study [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2020, 34(5): 389-402. DOI: 10.1177/1545968320905797.
- [21] Finnigan S, Wong A, Read S. Defining abnormal slow EEG activity in acute ischaemic stroke: delta/alpha ratio as an optimal QEEG index [J]. *Clin Neurophysiol*, 2016, 127(2): 1452-1459. DOI: 10.1016/j.clinph.2015.07.014.
- [22] Saes M, Meskers CG, Daffertshofer A, et al. How does upper extremity Fugl-Meyer motor score relate to resting-state EEG in chronic stroke? A power spectral density analysis [J]. *Clin Neurophysiol*, 2019, 130(5): 856-862. DOI: 10.1016/j.clinph.2019.01.007.
- [23] Anastasi AA, Falzon O, Camilleri K, et al. Brain symmetry index in healthy and stroke patients for assessment and prognosis [J]. *Stroke Res Treat*, 2017, 2017: 8276136. DOI: 10.1155/2017/8276136.
- [24] Li M, Xu G, Xie J, et al. A review: motor rehabilitation after stroke

- with control based on human intent[J]. *Proc Inst Mech EngH*, 2018, 232(4): 344-360. DOI: 10.1177/0954411918755828.
- [25] Liu J, Sheng Y, Liu H. Corticomuscular coherence and its applications: a review[J]. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 100. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00100.
- [26] Xu R, Zhang H, Shi X, et al. Lower-limb motor assessment with corticomuscular coherence of multiple muscles during ankle dorsiflexion after stroke[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31: 160-168. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3217571.
- [27] Campfens SF, Zandvliet SB, Meskers CG, et al. Poor motor function is associated with reduced sensory processing after stroke [J]. *Exp Brain Res*, 2015, 233(4): 1339-1349. DOI: 10.1007/s00221-015-4206-z.
- [28] Zhou S, Guo Z, Wong K, et al. Pathway-specific cortico-muscular coherence in proximal-to-distal compensation during fine motor control of finger extension after stroke [J]. *J Neural Eng*, 2021, 18(5): 621. DOI: 10.1088/1741-2552/ac20bc.
- [29] Bao SC, Leung KW, Tong KY. Cortico-muscular interaction to monitor the effects of neuromuscular electrical stimulation pedaling training in chronic stroke[J]. *Comput Biol Med*, 2021, 137: 104801. DOI: 10.1016/j.combiomed.2021.104801.
- [30] Zhang Y, Zou C, Chen X, et al. Synchronous analysis of corticomuscular coherence based on Gabor wavelet-transfer entropy [J]. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*, 2017, 34(6): 850-856. DOI: 10.7507/1001-5515.201608018.
- [31] She Q, Zheng H, Tan T, et al. Time-frequency-domain copula-based Granger causality and application to corticomuscular coupling in stroke [J]. *Int J Hum Robot*, 2019, 16(2019): 1950018. DOI: 10.1142/S021984361950018X.
- [32] Bertani R, Melegari C, De Cola MC, et al. Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis[J]. *Neurol Sci*, 2017, 38(9): 1561-1569. DOI: 10.1007/s10072-017-2995-5.
- [33] Gandolfi M, Formaggio E, Geroin C, et al. Quantification of upper limb motor recovery and EEG power changes after robot-assisted bilateral arm training in chronic stroke patients: a prospective pilot study [J]. *Neural Plast*, 2018, 2018: 8105480. DOI: 10.1155/2018/8105480.
- [34] Trujillo P, Mastropietro A, Scano A, et al. Quantitative EEG for predicting upper limb motor recovery in chronic stroke robot-assisted rehabilitation[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2017, 25(7): 1058-1067. DOI: 10.1109/tnsre.2017.2678161.
- [35] Formaggio E, Masiero S, Bosco A, et al. Quantitative EEG evaluation during robot-assisted foot movement[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2017, 25(9): 1633-1640. DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2627058.
- [36] Calabrò RS, Naro A, Russo M, et al. Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 98124. DOI: 10.1186/s12984-018-0377-8.
- [37] Molteni F, Formaggio E, Bosco A, et al. Brain connectivity modulation after exoskeleton-assisted gait in chronic hemiplegic stroke survivors: a pilot study[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2020, 99(8): 694-700. DOI: 10.1097/PHM.0000000000001395.
- [38] Pichiorri F, Mattia D. Brain-computer interfaces in neurologic rehabilitation practice[J]. *Handb Clin Neurol*, 2020, 168: 101-116. DOI: 10.1016/b978-0-444-63934-9.00009-3.
- [39] Monge-Pereira E, Ibañez-Pereda J, Alguacil-Diego IM, et al. Use of electroencephalography brain-computer interface systems as a rehabilitative approach for upper limb function after a stroke: a systematic review[J]. *PM R*, 2017, 9(9): 918-932. DOI: 10.1016/j.pmrj.2017.04.016.
- [40] Iturrate I, Chavarriaga R, Millán JD. General principles of machine learning for brain-computer interfacing[J]. *Handb Clin Neurol*, 2020, 168: 311-328. DOI: 10.1016/b978-0-444-63934-9.00023-8.
- [41] Yoo IG. Electroencephalogram-based neurofeedback training in persons with stroke: a scoping review in occupational therapy[J]. *NeuroRehabilitation*, 2021, 48(1): 9-18. DOI: 10.3233/nre-201579.
- [42] Belkacem AN, Jamil N, Palmer JA, et al. Brain computer interfaces for improving the quality of life of older adults and elderly patients[J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 692. DOI: 10.3389/fnins.2020.00692.
- [43] Mattia D, Pichiorri F, Colamarino E, et al. The promoter, a brain-computer interface-assisted intervention to promote upper limb functional motor recovery after stroke: a study protocol for a randomized controlled trial to test early and long-term efficacy and to identify determinants of response[J]. *BMC Neurol*, 2020, 20(1): 254. DOI: 10.1186/s12883-020-01826-w.
- [44] Frolov AA, Mokienco O, Lyukmanov R, et al. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: a randomized controlled multicenter trial[J]. *Front Neurosci*, 2017, 11: 400. DOI: 10.3389/fnins.2017.00400.
- [45] Pichiorri F, Toppi J, de Seta V, et al. Exploring high-density corticomuscular networks after stroke to enable a hybrid brain-computer interface for hand motor rehabilitation[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1): 5. DOI: 10.1186/s12984-023-01127-6.
- [46] Contreras-Vidal JL, Bortole M, Zhu F, et al. Neural decoding of robot-assisted gait during rehabilitation after stroke [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2018, 97(8): 541-550. DOI: 10.1097/PHM.0000000000000914.
- [47] Zhao CG, Ju F, Sun W, et al. Effects of training with a brain-computer interface-controlled robot on rehabilitation outcome in patients with subacute stroke: a randomized controlled trial[J]. *Neurol Ther*, 2022, 11(2): 679-695. DOI: 10.1007/s40120-022-00333-z.
- [48] Li C, Wei J, Huang X, et al. Effects of a brain-computer interface-operated lower limb rehabilitation robot on motor function recovery in patients with stroke [J]. *J Healthc Eng*, 2021, 2021: 4710044. DOI: 10.1155/2021/4710044.
- [49] Khan H, Naseer N, Yazidi A, et al. Analysis of human gait using hybrid EEG-fNIRS-based BCI system: a review[J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 613254. DOI: 10.3389/fnhum.2020.613254.
- [50] Fang T, Wang J, Mu W, et al. Noninvasive neuroimaging and spatial filter transform enable ultra low delay motor imagery EEG decoding [J]. *J Neural Eng*, 2022, 19(6): 702. DOI: 10.1088/1741-2552/aca82d.
- [51] Kwon M, Han S, Kim K, et al. Super-resolution for improving EEG spatial resolution using deep convolutional neural network-feasibility study[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(23): 5317. DOI: 10.3390/s19235317.
- [52] Passera B, Chauvin A, Raffin E, et al. Exploring the spatial resolu-

- tion of TMS-EEG coupling on the sensorimotor region [J]. Neuroimage, 2022, 259: 119419. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.119419.
- [53] Li R, Yang D, Fang F, et al. Concurrent fNIRS and EEG for brain function investigation: a systematic, methodology-focused review [J]. Sensors (Basel), 2022, 22(15): 5865. DOI: 10.3390/s22155865.
- [54] Porcaro C, Medaglia MT, Krott A. Removing speech artifacts from electroencephalographic recordings during overt picture naming [J]. Neuroimage, 2015, 105: 171-180. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2014.10.049.
- [55] Ferracuti F, Casadei V, Marcantoni I, et al. A functional source separation algorithm to enhance error-related potentials monitoring in non-invasive brain-computer interface [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2020, 191: 105419. DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105419.
- [56] Bigdely-Shamlo N, Mullen T, Kothe C, et al. The PREP pipeline: standardized preprocessing for large-scale EEG analysis [J]. Front Neuroinform, 2015, 9: 16. DOI: 10.3389/fninf.2015.00016.
- [57] Alzahrani SI, Anderson CW. A comparison of conventional and tripolar EEG electrodes for decoding real and imaginary finger movements from one hand [J]. Int J Neural Syst, 2021, 31(9): 2150036. DOI: 10.1142/s0129065721500362.
- [58] Kilicarslan A, Grossman RG, Contreras-Vidal JL. A robust adaptive denoising framework for real-time artifact removal in scalp EEG measurements [J]. J Neural Eng, 2016, 13(2): 026013. DOI: 10.1088/1741-2560/13/2/026013.
- [59] Zhang R, Zeng Y, Tong L, et al. EEG identity authentication in multi-domain features: a multi-scale 3D-cnn approach [J]. Front Neurobot, 2022, 16: 901765. DOI: 10.3389/fnbot.2022.901765.

(修回日期:2024-01-13)

(本文编辑:凌琛)

· 征订启事 ·

欢迎订阅《中华物理医学与康复杂志》

《中华物理医学与康复杂志》是中华医学会主办的物理医学与康复学专业的高水平学术期刊之一。本刊全面介绍本学科及相关领域领先的科研成果和新理论、新技术、新方法、新经验,以及对物理因子治疗、康复临床、疗养等有指导作用且与本学科密切相关的基础理论研究,及时反映我国物理医学与康复领域的重大进展。

本刊现设有述评、基础研究、临床研究、研究快报、个案报道、综述、讲座、继续教育、学术争鸣、外刊重要文章摘登、学会信息、康复器械与用品信息等栏目,并将依来稿情况随时作一些调整。

《中华物理医学与康复杂志》为月刊,大 16 开,内芯 96 页码,中国标准刊号:ISSN 0254-1424 CN 42-1666/R,邮发代号:38-391,每月 25 日出版;2024 年每册定价 30 元,全年 360 元整。热忱欢迎国内外物理治疗、物理医学与康复、康复医学领域以及神经内科、神经外科、骨科等相关科室的各级医务工作者踊跃订阅、投稿。

订购办法:①邮局订阅:按照邮发代号 38-391,到全国各地邮局办理订阅手续。②直接订阅:通过邮局汇款至《中华物理医学与康复杂志》编辑部订购,各类订户汇款时务请注明所需的杂志名称及年、卷、期、册数等。

编辑部地址:430100 武汉市蔡甸区中法新城同济专家社区 E 栋《中华物理医学与康复杂志》编辑部。

电话:(027)-69378391;E-mail:cjpmr@tjh.tjmu.edu.cn;杂志投稿网址:www.cjpmr.cn。

请及时关注本刊微信公众号。

