

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.08.012

医学信号处理与医学仪器

脑电神经反馈训练在提高工作记忆中应用的研究与挑战

陈泉宇, 随力, 李丽

上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093

【摘要】脑电(EEG)神经反馈技术是基于脑科学和行为认知科学发展形成的一种非侵入式、改善大脑功能和结构的训练方法。工作记忆是个体在心理认知活动中保持和加工信息的记忆系统,在人类学习、推理和创造力等高级认知活动中发挥着重要作用。将EEG神经反馈技术应用于工作记忆训练中,能有效提升个体工作记忆绩效,调节个体的精神、情感状态及相关脑区的认知功能。本文以EEG神经反馈技术在工作记忆训练中的应用研究与挑战为综述对象,从EEG神经反馈调控工作记忆的神经信息处理工程、EEG神经反馈作用工作记忆的相关激活脑区、基于EEG神经反馈工作记忆训练的系统构成和训练类型、基于EEG神经反馈的工作记忆训练系统的影响因素,以及对目前相关研究存在的问题和未来研究发展趋势等情况进行全面综述。

【关键词】脑电;神经反馈;工作记忆;认知功能;综述

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)08-0987-05

Advances and challenges of EEG neurofeedback training in improving working memory

CHEN Xiaoyu, SUI Li, LI Li

School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Electroencephalography (EEG) neurofeedback technology is a non-invasive training method based on the development of brain science and behavioral cognitive science to improve brain function and structure. Working memory is a memory system in individuals for maintaining and processing information in psychological cognitive activities, and it plays an important role in human learning, reasoning and creativity and other advanced cognitive activities. Applying EEG neurofeedback technology to working memory training can effectively improve individual working memory performance, regulate individual mental and emotional states, and improve cognitive functions of related brain areas. The researches on the application and challenges of EEG neurofeedback technology in working memory training are included in the study, and a comprehensive review is carried out from the aspects of EEG neurofeedback to regulate the neural information processing engineering of working memory, EEG neurofeedback to activate working memory and related activation brain regions, the system composition and training types of working memory training based on electrical neurofeedback, the influencing factors of the working memory training system based on EEG neurofeedback. Furthermore, the problems existing in current related researches and the development trend of future research are discussed.

Keywords: electroencephalography; neurofeedback; working memory; cognitive function; review

前言

神经反馈(Neurofeedback, NFB)是生物反馈应用大脑活动作为训练指标的一种形式,将大脑活动以神经生理信号的方式呈现给个体,使得个体能够依据大

脑信号自我调节改变其自身的认知与行为。基于EEG (Electroencephalography, EEG)信号的神经反馈训练(Neurofeedback Training, NFT)是将EEG图等神经信号中的特定成分转换为可视或可听形式的信息,如图像、声音、视频、游戏等^[1]。受试者通过有针对性的训练可以改变自身的EEG波形,如选择性地增加或者抑制特定的信号,从而达到调节脑功能的目的^[2]。工作记忆是个体在执行推理、理解和学习等复杂认知任务过程中,暂时保持信息和操作加工的记忆系统,也可视其为存储、加工信息的有限量系统^[3]。工作记忆是人类认知活动的核心,在问题解决、智力、推理、数学能力等认知活动中起到关键作用,为人类的感知、注意、记忆与行为

【收稿日期】2022-02-06

【基金项目】国家自然科学基金(11179015);上海理工大学科技发展项目(2019KJFZ239, 2020KJFZ232)

【作者简介】陈泉宇,硕士研究生,研究方向:脑机接口、神经调控, E-mail: georgechenn@163.com

【通信作者】随力,研究方向:脑电信号、神经工程, E-mail: lsui@usst.edu.cn

活动提供非常重要的连接^[4]。工作记忆训练是针对低容量的个体进行存储系统或者中央执行系统各成分的训练,以提升个体工作记忆绩效,改善相关脑区的认知功能。工作记忆是个体在复杂认知行为中表现差异的核心因素之一,工作记忆的衰退或降低是认知老化或一些神经精神性疾病最常见的表现。针对性的工作记忆训练对提高个体工作记忆能力,改善大脑的高级认知功能尤为重要。提高工作记忆的训练方法有多种,如传统的工作记忆训练、颅内刺激训练、神经反馈训练等。相较于其它训练方法,EEG神经反馈训练以其安全无创、接受度高、训练效果好等优势,在工作记忆训练应用中展现出了较好的应用价值^[5]。

1 EEG神经反馈训练提高工作记忆的相关研究

当前,EEG神经反馈训练在提高工作记忆方面的应用与研究主要是通过分析静息态下定量的EEG特征,找到工作记忆相关的EEG反馈信号,并以此设计出合理的EEG神经反馈训练方案,从而用于改善受试者的工作记忆认知水平。

1.1 EEG神经反馈调控工作记忆的神经信息处理过程

工作记忆包含4种主要成分,即中央执行系统(Central Executive)、语音环路子系统(Phonological Loop)、视觉空间存储器子系统(Visuo-spatial Sketchpad)和情景缓存器(Episodic Buffer)。工作记忆不仅包括短时记忆中信息的存储,而且包括信息的操作加工,在执行分心或干扰活动的时候,工作记忆可以将信息保持在主动记忆中,工作记忆具有从长久记忆、永久记忆中反复检索信息的能力^[6]。工作记忆中央执行系统的三大主要功能是:抑制、转换和刷新。工作记忆的神经信息处理过程可分为3个阶段:编码期(Coding Period)、保持期(Retention Period)和提取期(Retrieval Period)。编码期是信息的输入阶段,在这一阶段内信息被获取、处理或者更新。保持期是信息处理的中间部分,编码期内处理的信息在这一阶段转换成长期或者永久记忆^[7]。提取期是信息的输出阶段,在该阶段中大脑中存储的神经变化前记忆信息将会被唤醒^[8]。工作记忆的中央执行系统全程控制上述3个阶段,根据同步发生的任务情况进行注意力分配,并有意识地调控造成注意力分散的干扰信息。EEG神经反馈调控工作记忆的神经信息处理过程主要表现为通过特定的EEG信号反馈训练提高工作记忆的信息处理,从而使得个体在执行工作记忆任务时,信息处理速度更快,信息保存时间更长。

1.2 EEG神经反馈作用工作记忆的激活脑区

基于EEG神经反馈的工作记忆任务执行过程中大脑皮层中的额叶和顶叶是主要的激活脑区。Thermenos等^[9]研究表明,在工作记忆认知控制中起主要作用

的是顶叶皮层,工作记忆任务执行中右侧额叶和双侧后顶叶皮层的激活程度会显著增强。David和Riley等^[10-11]研究也进一步表明,前额叶背外侧区和双侧后顶叶皮层构成的额顶网络在工作记忆及相关执行控制中起到了至关重要的作用。工作记忆的神经基础即前额叶皮层的神经信息处理过程,前额叶皮层在工作记忆的编码阶段被激活;大脑进入工作记忆的信息保持阶段,前额叶皮层也会处于持续激活状态^[12-13]。

相关认知行为学数据表明:EEG神经反馈训练具有提高工作记忆能力的作用。受试者经过工作记忆相关的EEG神经反馈训练后,在认知活动中保持和处理信息的水平明显提高。同时,相关脑成像研究数据也表明,受试者经神经反馈训练后额叶和顶叶皮层的活动得到增强^[14]。可见,EEG神经反馈训练与提高个体的工作记忆绩效、改善个体的神经反馈及相关认知功能脑区的前额叶皮层的活动密不可分。EEG神经反馈提高工作记忆是基于大脑的可塑性,微观机制为神经反馈通过EEG信号调控工作记忆的神经信息处理过程,宏观机制为EEG神经反馈增强了工作记忆相关脑区的活动,特别是前额叶皮层和顶叶皮层的活动。相关研究发现,工作记忆能力与前额叶皮层和后顶叶皮层的脑区活动强弱有关;Reinhart等^[15]研究表明,EEG神经反馈提高工作记忆的主要原理是受试者通过EEG频率调节刺激相应的脑区从而可以提高受试者的工作记忆能力。

1.3 基于EEG神经反馈工作记忆训练的系统构成和训练类型

EEG神经反馈训练在提高工作记忆应用本质上是构建基于EEG神经反馈的工作记忆训练系统。系统通常可分为5个部分^[16]:(1)信号的数据采集部分。利用神经成像设备采集特定的神经反馈信号,EEG神经反馈训练通常采用的是EEG;(2)信号的数据预处理部分。这部分的主要任务是区分及去除干扰的伪迹信号,原始EEG信号中眼电伪迹和肌电伪迹是最常见的干扰信号;(3)信号的特征提取部分。EEG信息中的参数选择和特征提取是神经反馈系统的重要组成部分之一,常见的特征提取方法,如支持向量机、小波变化法、深度学习算法等,均适用于工作记忆任务中的EEG信号特征提取;(4)系统呈现部分。反馈信号的产生是将所提取的特征转换为可呈现的感觉刺激给受试者再进一步处理。因此,反馈信号是指利用大脑系统或过程的活动状态在大脑活动的目标特征或特征满足特定阈值或状态时发出信号,这与具有神经反馈的其他神经调节方法(如电模拟)是不同的,在EEG神经反馈训练的反馈信号的实时呈现过程中,通常包含奖赏机制,典型的例子是电子游戏;(5)训练人群。训练人群即受试者的

积极参与非常重要,受试者的神经反馈训练效果取决于多种因素。

基于 EEG 神经反馈的工作记忆训练按照类型通常可分为3类^[17]:第一类为慢皮层电位神经反馈训练。慢皮层电位作为一类特定事件相关电位,其电位幅值可为正值也可为负值,并且电位的水平与局部大脑皮层的唤醒和注意力程度高度相关。第二类神经反馈训练类型为连贯训练,可以改变大脑不同区域之间功能连接的固有模式。第三类神经反馈训练类型为频率训练,EEG 中含有经典的 δ (0~4 Hz)、 θ (4~8 Hz)、 α (8~13 Hz)、 β (14~30 Hz)和 γ (>40 Hz)频段,并且特定频段的幅值、功率和脑的认知功能之间存在一定的相互关系。此类神经反馈训练即通过训练来改变特定 EEG 频段的功率或功率百分比。

现有针对工作记忆训练的 EEG 神经反馈方案中,应用最为广泛的是基于 EEG 的频率训练,且选用静息态 EEG 特征频段多为 α 节律。以往关于 α EEG 节律的研究发现, α 活动与人们的认知表现有着密切联系,它的振荡不仅反映了最基本的认知过程之一,也在不同区域的大脑活动中发挥着关键作用^[18]。而关于 α 节律的 EEG 神经反馈训练,不论是视觉反馈还是听觉反馈都旨在增强 α EEG 活动。研究结果发现,反馈训练后受试者的 α 节律、 α EEG 活动或振奋相对于训练之前都有明显的增强,工作记忆能力得到提高^[19-21]。除了基于 α 波的神经反馈训练,其他波形的训练一定程度上也可以增强工作记忆,如 γ 波形、 θ 波、SMR(12~15 Hz)波等。Singh 等^[22]相关研究发现 γ 波形的能量变化与认知变化有关,研究人员通过对精神分裂患者进行持续时间的神经反馈训练发现,受试者在进行工作记忆任务中额部 γ 功率显著增强,且其精神状态得到显著改善。Dharmadhikari 等^[23]研究表明 θ 波活性与前扣带皮层的活性有关,且可能与连贯记忆和注意力处理机制相关。

1.4 基于 EEG 神经反馈的工作记忆训练系统的影响因素

基于 EEG 神经反馈的工作记忆训练系统在微观上的影响因素主要是:大脑的可塑性,外部刺激相应脑区起到提高工作记忆作用,但具体的影响机制尚不清楚;宏观上的影响因素通常是:被试群体健康状态、反馈波形、训练次数等。表1列举了国外内不同机构基于 EEG 神经反馈的工作记忆训练情形。由表1可以看出,尽管方案的设计(如训练次数、分组设计)不相同,但都是通过相应频率波形、调节相应脑区,使得受试者学会自我调节,从而改善其工作记忆能力。虽然已有研究结果表现出一定的不一致性,但基于 EEG 神经反馈的工作记忆训练确实对训练人群的工作记忆能力、认知能力有所改善^[32]。

2 目前存在的问题

目前,EEG 神经反馈在工作记忆方面已经有了不少的研究,并取得了一定的研究进展。也有荟萃分析表明,基于 EEG 神经反馈的工作记忆训练效果要高于传统的工作记忆行为学训练。但其在日常、临床广泛应用方面仍存在一定的困难需要解决。

2.1 系统调制不确定性

EEG 神经反馈训练提高工作记忆的神经生物学基础是基于脑的可塑性原理,EEG 神经反馈可以调控工作记忆的神经信息编码过程以及激活和工作记忆相关的脑区,但是 EEG 神经反馈训练提高工作记忆的确切机制,特别是在调控工作记忆的神经信息编码过程中的机制尚未完全阐明。EEG 神经反馈训练使用的 EEG 信号和工作记忆能力之间的对应关系有待进一步研究;EEG 神经反馈训练提高工作记忆是否具有特异性,即 EEG 神经反馈训练提高工作记忆的过程是否影响脑的其他的高级认知功能,这些问题的深入研究有助于解释有些接受神经反馈训练的受试者可以调控自己的 EEG 信号,但神经行为学上没有明显改善,或者 EEG 信号无明显变化但神经行为学改变显著的现象。

2.2 系统缺乏参考标准

EEG 神经反馈训练系统构成的一个重要方面就是 EEG 信号的特征提取和特征选择,但有关工作记忆特异性的 EEG 信号的提取上存在不少的分歧,因此,基于 EEG 的神经反馈用于提高工作记忆尚缺少一个标准化的方案,目前用于提高工作记忆的神经反馈方案都是由研究人员或者由治疗师决定的,不论是 EEG 信号的特征选择上,还是 EEG 信号的采集方面,如电极的数目、电极的位置等,以及反馈信息的呈现形式、奖励的类型、每次训练治疗持续时间、总训练次数等都缺少一个固定的参考标准。

2.3 受试人群存在特异性

受试人群对 EEG 神经反馈训练的敏感性表现不一,大约三分之一甚至二分之一的受试者对神经反馈训练没有明显反应,始终无法调控自己的 EEG 信号。头皮 EEG 非常微弱,易受肌电和眼电信号的干扰,有些受试者接受神经反馈训练时不恰当地利用肌电信号、眼电信号来完成反馈,这样貌似成功的反馈训练并不能起到调控脑功能的作用。此外,有些神经反馈具备良好的效果很大程度上依赖神经反馈训练的环境,随着训练场景的变化,训练的效果差异较大。

3 未来发展方向

EEG 神经反馈训练以其完全无创、操作简单、时间分辨率高等优势在神经调控和神经康复领域具有较广阔的应用前景,神经反馈训练提高工作记忆的作用仅

表 1 国内外基于 EEG 神经反馈的工作记忆训练的代表性文献汇总

Table 1 Summary of relevant literatures on working memory training based on EEG neurofeedback at home and abroad

参考研究	被试群体	实验分组	反馈波形	训练次数	效果评价
Hsueh 等 ^[24] , 2016	健康人群	实验组($n=25$, 8~12 Hz) 对照组($n=25$, 7~20 Hz)	α	每周进行 3 次, 为期 4 周, 共 12 次	实验组额叶顶区的 α 振幅和总 α 持续时间逐渐显著增加, 且大部分参与者中, 工作记忆和情景记忆的准确性都显著提高
Escolano 等 ^[25] , 2011	健康人群	实验组($n=10$) 对照组($n=7$)	高频 α	每天 1 次, 为期 5 d, 共 5 次	实验组的高频 α 显著增强, 并且对照组在工作记忆测试中表现无明显变化
Jirayucharoensak 等 ^[26] , 2014	健康老年人和轻度认知障碍(MCI)患者	健康组($n=8$), MCI 组($n=11$)	β/α	每周 2 次, 为期 6 周, 共 12 次	健康组和患者组, 大多数参与者都成功地提高了自身的 β/α 功率带的比率, 工作记忆能力和认知能力得到提升
Joana 等 ^[27] , 2016	老年人群	NF 组($n=9$), 神经反馈辅以认知训练($n=8$), 认知训练(CT) ($n=7$)和假神经反馈($n=6$)	密集化和短期 α 和 θ	每天 1 次, 连续 8 d, 共 8 次	NFB 组表现为干预后 α 和 θ 相对功率的增加以及矩阵旋转任务的表现, 并且在认知和基础 EEG 方面已经有了适度的改善
Geladé 等 ^[28] , 2018	ADHD 儿童	NF 组($n=33$), 药物(MPH)组($n=28$)或体力活动(PA)组($n=31$)	θ/β	每周 3 次, 为期 10 周左右, 共 30 次	相关随访报告中, NFB 组各方面成绩明显优于 PA 组, 但在 NFB 组中, 停止信号任务测量的反应速度更快, 工作记忆能力都得到改善
Debarpan 等 ^[29] , 2016	精神分裂患者	实验组($n=31$), 无对照组	γ	每周 2 次, 为期 12 周, 共 24 次	实验组在神经心理学测试中 n-back 表现和工作记忆、处理速度、推理和问题解决能力的显著改善相关, 精神症状也有显著改善
Gordon 等 ^[30] , 2020	健康人群	实验组($n=19$), 无对照组	α	单次神经反馈训练	NFB 组在任务相关活动训练后表现出较高的 α 能量, 在心理旋转任务中表现出较高的前刺激能量
Kober 等 ^[31] , 2015	脑卒中患者+健康人群	SMR-NF 患者组($n=11$, 12~15 Hz)或 α -NF 患者组($n=6$, 10~12 Hz), 患者对照组($n=7$), 健康人群对照组($n=40$)	SMR、 α	每天 1 次左右, 为期 12 d, 共 12 次	大约 70% 的患者和对照组在 NF 表现方面都取得了显著的进步; SMR 患者组在视觉-空间短期记忆表现上有明显改善, 而高 α 患者组在工作记忆表现上有明显改善

仅是神经反馈训练功能的一个方面,未来 EEG 神经反馈训练及神经反馈训练提高工作记忆方面的研究方向及发展趋势可能集中在以下几个方面。

3.1 EEG 神经反馈训练的规范化和个性化的有机融合

当前,提高工作记忆的 EEG 神经反馈训练尚无一个规范化的实验范式,探索标准化的神经反馈训练方案一直是神经反馈研究领域的一个研究方向,公认的 EEG 神经反馈训练方案的建立对于比较不同研究团队的 EEG 神经反馈研究结果及 EEG 神经反馈训练的效果至关重要。EEG 神经反馈提高工作记忆的作用在多种神经精神性疾病、在健康人群中均具有较好的应用前景。因此,EEG 神经反馈训练方案的设计及实施势必依据疾病的类型、受试者的年龄、受试者对 EEG 神经反馈训练的敏感性等因素而有所不同,建立个性化的治疗/康复方案才能充分发挥出神经反馈训练提高工作记忆的作用,神经反馈训练的规范化和个性化的有机融合必将是未来神经反馈的发展趋势之一。

3.2 EEG 神经反馈信号的多模态融合

相比于其他几种脑成像信号,如脑信号、功能性磁

共振成像信号及功能性近红外光谱成像信号,EEG 神经反馈训练在治疗/辅助治疗及日常生活中应用最为广泛,但 EEG 信号有其固有的局限性,如空间分辨率不高,易受肌电和眼电的干扰等,EEG 神经反馈训练提高工作记忆的受试人群的敏感性及训练效果还远远没有达到理想标准。提高神经反馈训练的训练效果是未来一个很重要的研究内容,采用多模态的神经成像信号,如 EEG 信号偶联功能性磁共振成像信号、EEG 信号偶联功能性近红外光谱脑成像信号等。多模态信号融合提高受试者对神经反馈训练的敏感性及训练效果是未来的发展趋势之一。

3.3 人工智能算法的使用

系统采用更为先进的信号处理算法,将人工智能算法与 EEG 神经反馈系统相结合,减少测量的误差。同时规范训练环境,按照相关标准进行系统布置以减少测量时产生的误差。对治疗效果不明显的解决方案,实现多导联的 EEG 分析,采用多参数的联合,实现电生理研究与医学影像学的辅助研究,以提高反馈训练的准确度,从而逐步打造一套较全面的系统方案。在综

合考虑各项影响因素的前提下,寻找一致性较强的客观生物标记物,推进EEG神经反馈在工作记忆方面训练方法的研究,开发更为有效的EEG神经反馈提高工作记忆的训练技术。

4 总结

工作记忆在认知系统中占有非常重要的作用,各项研究都表明经过EEG神经反馈训练的受试者,其工作记忆的表现均比之前有所改善。EEG神经反馈在研究神经系统作用、提高相关认知能力、作为康复训练工具等方面有着非常好的发展潜力,且相比于传统的药物治疗没有副作用。但由于目前技术发展水平仍然不是非常成熟,脑科学发展仍然不够完善,EEG神经反馈训练仍然存在很多需要我们解决的问题。如何提高系统训练效果,降低设备成本,让设备更加小型化、智能化从而应用于家庭治疗中,以及相关伦理问题如果采用游戏的呈现形式进行EEG神经反馈训练是否会让受试者产生游戏依赖或者成瘾。这些都是需要考虑和完善的。最后,随着人工智能技术的发展,EEG神经反馈的算法有了很大改进,系统的成本也大幅度下降。同时随着人工智能技术的发展,人工智能浪潮助力的精准医疗时代已经到来,基于EEG神经反馈的工作记忆训练必定会得到更大的发展,造福更多的人。

【参考文献】

- [1] 王鹏飞. 神经反馈训练对ADHD儿童EEG信号同步特性影响的研究[D]. 天津: 天津医科大学, 2019.
Wang PF. The effect of neurofeedback training on the synchronization characteristics of ADHD children's EEG signals[D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2019.
- [2] 蒲贤洁, 刘铁军, 吴强, 等. 基于EEG信号的神经反馈系统研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2014, 31(4): 894-898.
Pu XJ, Liu TJ, Wu Q, et al. Research on neurofeedback system based on EEG signals[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2014, 31(4): 894-898.
- [3] 蒋雅丽. 反馈模式对神经反馈学习和工作记忆的影响研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
Jiang YL. The effect of feedback mode on neurofeedback learning and working memory[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.
- [4] 赵鑫, 周仁来. 工作记忆训练: 一个很有价值的研究方向[J]. 心理科学进展, 2010, 18(5): 711-717.
Zhao X, Zhou RL. Working memory training: a valuable research direction[J]. Advances in Psychological Science, 2010, 18(5): 711-717.
- [5] Enriquez-Geppert S, Huster RJ, Herrmann CS. Boosting brain functions: improving executive functions with behavioral training, neurostimulation, and neurofeedback[J]. Int J Psychophysiol, 2013, 88(1): 1-16.
- [6] 赵鑫, 周仁来. 工作记忆刷新功能的可塑性[J]. 心理科学进展, 2014, 22(10): 1521-1531.
Zhao X, Zhou RL. Plasticity of working memory refresh function[J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(10): 1521-1531.
- [7] 范毅然. 轻度认知功能障碍工作记忆EEG网络连接缺损机制研究[D]. 天津: 天津医科大学, 2019.
Fan YR. Study on the mechanism of working memory EEG network connection defect in mild cognitive dysfunction[D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2019.
- [8] 范毅然, 郑旭媛. 轻度认知功能障碍人群工作记忆EEGtheta网络缺损模式研究[J]. 航天医学与医学工程, 2019, 32(3): 229-234.
Fan YR, Zheng XY. Study on the defect pattern of working memory and EEG theta network in people with mild cognitive impairment[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2019, 32(3): 229-234.
- [9] Thermenos HW, Goldstein JM, Buka SL, et al. The effect of working memory performance on functional MRI in schizophrenia [J]. Schizophr Res, 2005, 74(2-3): 179-194.
- [10] David S, Ciara G, Anastasia K, et al. A parieto-medial temporal pathway for the strategic control over working memory biases in human visual attention[J]. J Neurosci, 2012, 32(49): 17563-17571.
- [11] Riley MR, Christos C. Role of prefrontal persistent activity in working memory[J]. Front Syst Neurosci, 2015, 9: 181.
- [12] Mackey WE, Curtis CE. Distinct contributions by frontal and parietal cortices support working memory[J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 6188.
- [13] Mackey WE, Devinsky O, Doyle WK, et al. Human parietal cortex lesions impact the precision of spatial working memory [J]. J Neurophysiol, 2016, 116(3): 1049-1054.
- [14] 贺文顿, 卜海兵, 童莉, 等. 基于脑网络连接的实时功能磁共振成像神经反馈技术研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2017, 34(3): 456-460.
He WJ, Bu HB, Tong L, et al. Real-time functional magnetic resonance imaging neurofeedback technology based on brain network connection [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2017, 34(3): 456-460.
- [15] Reinhart R, Nguyen JA. Working memory revived in older adults by synchronizing rhythmic brain circuits[J]. Nat Neurosci, 2019, 22: 820-827.
- [16] Enriquez-Geppert S, Huster RJ, Herrmann CS. EEG-neurofeedback as a tool to modulate cognition and behavior: a review tutorial [J]. Front Hum Neurosci, 2017, 11: 51.
- [17] Nina O, Bojan R, Piero PB, et al. Review of the therapeutic neurofeedback method using electroencephalography: EEG neurofeedback[J]. Bosnian J Basic Med, 2019, 19(3): 213-220.
- [18] Klimesch W. Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information[J]. Trends Cogn Sci, 2012, 16(12): 606-617.
- [19] Escolano C, Navarro-Gil M, Garcia-Campayo J, et al. The Effects of a single session of upper alpha neurofeedback for cognitive enhancement: a sham-controlled study[J]. Appl Psychophys Biof, 2014, 39(3): 227-236.
- [20] Dekker M, Sitskoorn MM, Denissen A, et al. The time-course of alpha neurofeedback training effects in healthy participants[J]. Biol Psychol, 2014, 95: 70-73.
- [21] Kober SE, Schweiger D, Reichert JL, et al. Upper alpha based neurofeedback training in chronic stroke: brain plasticity processes and cognitive effects[J]. Appl Psychophys Biof, 2017, 42(1): 69-83.
- [22] Singh F, Shu IW, Hsu SH, et al. Modulation of frontal gamma oscillations improves working memory in schizophrenia [J]. NeuroImage, 2020, 27: 1023-1039.
- [23] Dharmadhikari AS, Tandle AL, Jaiswal SV, et al. Frontal theta asymmetry as a biomarker of depression [J]. East Asian Arch Psychiatry, 2018, 28(1): 17-22.
- [24] Hsueh JJ, Chen TS, Chen JJ, et al. Neurofeedback training of EEG alpha rhythm enhances episodic and working memory[J]. Hum Brain Mapp, 2016, 37(7): 2662-2675.
- [25] Escolano C, Aguilar M, Minguez J. EEG-based upper alpha neurofeedback training improves working memory performance[C]// Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE, 2011.
- [26] Jirayucharoensak S, Israsena P, Pan-Ngum S, et al. A game-based neurofeedback training system for cognitive rehabilitation in the elderly[C]. ICST, 2014.
- [27] Joana R, Maria PA, Luís F, et al. An alpha and theta intensive and short neurofeedback protocol for healthy aging working-memory training [J]. Front Aging Neurosci, 2016, 8: 157.
- [28] Geladé K, Janssen T, Bink M, et al. A 6-month follow-up of an RCT on behavioral and neurocognitive effects of neurofeedback in children with ADHD[J]. Eur Child Adolesc Psychiatry, 2018, 27: 581-593.
- [29] Debarpan G, Anirban D. Computational pipeline for NIRS-EEG joint imaging of TDCS-evoked cerebral responses—an application in ischemic stroke[J]. Front Neurosci, 2016, 10: 261.
- [30] Gordon S, Todder D, Deutsch I, et al. Effects of neurofeedback and working memory-combined training on executive functions in healthy young adults[J]. Psychol Res, 2020, 84(6): 1586-1609.
- [31] Kober SE, Schweiger D, Witte M, et al. Specific effects of EEG based neurofeedback training on memory functions in post-stroke victims [J]. J Neuroeng Rehabil, 2015, 12(1): 1-13.
- [32] Birbaumer N, Ramos MA, Weber C, et al. Neurofeedback and brain-computer interface clinical applications[J]. Int Rev Neurobiol, 2009, 86: 107-117.

(编辑:陈丽霞)