DOI:10.16016/j.2097-0927.202309031

非侵入性军事认知神经训练研究与展望

冯正直,许海燕 400038 重庆,陆军军医大学(第三军医大学)医学心理系医学心理实验中心

[摘要] 伴随认知神经科学进入技术应用时代,军事心理训练从传统的行为训练向基于神经成像、人工智能和虚拟现实等技术的认知神经训练发展。认知神经训练包括侵入性和非侵入性两类,既可用于军事职业相关神经精神障碍的辅助治疗,更可作为以脑为靶点的预防性训练以增强认知、调节情绪和塑造行为。本文聚焦于非侵入性认知神经训练,重点梳理以重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)、经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)和低强度聚焦超声(low-intensity focused ultrasound, LIFU)等为代表的非侵入性脑刺激(non-invasive brain stimulation, NIBS)以及由脑电图(electroencephalography, EEG)、功能磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)和功能近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)介导的神经反馈(neurofeedback, NF),展望其智能化、个性化、多模态、感官化和可穿戴发展趋势,并探讨我军开展认知神经训练研究和应用需要注意的问题。

[关键词] 军事认知神经训练;认知神经科学;非侵入性脑刺激;神经反馈
[中图法分类号] B849:E0; R395.1 [文献标志码] A

Progress and prospect of non-invasive military cognitive neural training

FENG Zhengzhi, XU Haiyan Experimental Research Center for Medical and Psychological Sciences, School of Medical Psychology, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400038, China

[**Abstract**] As cognitive neuroscience enters the era of technology application, military psychological training has evolved from traditional behavioral training to cognitive neural training based on neuroimaging, artificial intelligence, virtual reality, and other technologies. Cognitive neural training includes both invasive and non-invasive types, which can be used not only as an adjunct treatment for military occupation-related neuropsychiatric disorders, but also as preventive training that targets the brain to enhance cognitive ablity, regulate emotion, and shape behavior. In this article, we focused on non-invasive cognitive neural training, mainly sorting out the advanced literature concerning non-invasive brain stimulation represented by repetitive transcranial magnetic stimulation, transcranial direct current stimulation, and low-intensity focused ultrasound, as well as neurofeedback mediated by electroencephalography, functional magnetic resonance imaging, and functional near-infrared spectroscopy. We prospected the development trend of intelligent, personalized, multimodal, sensory and wearable neural training, and brought forward and discussed the problems that need our attention in the research and application of cognitive neural training in our army.

[**Key words**] military cognitive neural training; cognitive neuroscience; non-invasive brain stimulation; neurofeedback

Supported by the Youth Project for Military Sciences of National Social Science Foundation of China (22-SKJJ-B-019). Corresponding author: FENG Zhengzhi, E-mail: fzz@tmmu.edu.cn

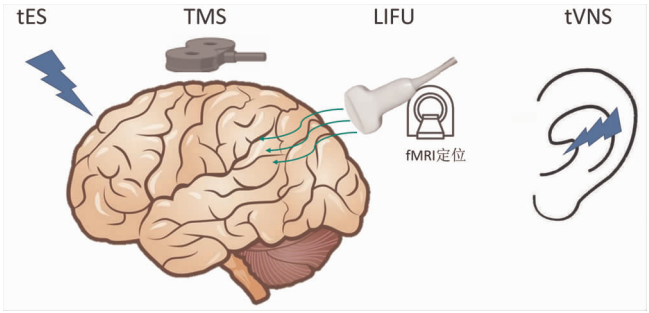
[基金项目] 国家社会科学基金军事学青年项目(22-SKJJ-B-019)
[通信作者] 冯正直,E-mail: fzz@tmmu.edu.cn

2097-0927/Copyright © 2024, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议( )

军事心理训练是以提高作战效能为出发点、以保障作战胜利为落脚点的主动心理干预过程[1]。伴随认知神经科学进入技术应用时代[2-3]以及军事认知神经科学的发展,军事心理训练也从传统的行为训练向基于神经成像、虚拟现实和人工智能等技术,以神经调控[4]和神经反馈(neurofeedback,NF)[2]方式进行的认知神经训练发展。认知神经训练包括侵入性和非侵入性两类;既可用于军事职业相关神经精神障碍的辅助治疗,更可作为以脑为靶点的预防性训练。本文聚焦于非侵入性训练,从非侵入性脑刺激(non-invasive brain stimulation, NIBS)和 NF 两方面梳理总结认知神经训练领域的最新研究和发展趋势,并探讨我军开展认知神经训练研究和应用需要注意的问题。

1 非侵入性脑刺激(NIBS)

NIBS 是不需要植入人体就能进行脑部刺激的神经调控技术[4],包括经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation,TMS)、经颅电刺激(transcranial electrical stimulation, tES)和经颅超声刺激(transcranial ultrasound stimulation,TUS)等[5](图 1)。NIBS 安全可控,被广泛用于患者和健康人,以治疗疾病或增强功能[4-7]。外军对 NIBS 具有浓厚的兴趣,不仅因其能用于治疗军事职业典型疾病和损伤,如创伤性脑损伤、抑郁症和创伤后应激障碍等神经心理疾病,而且具有广泛的认知神经增强潜力[5,8-9]。



LIFU:低强度聚焦超声;fMRI:功能磁共振;tVNS:经皮迷走神经刺激术

图 1 常见的非侵入性脑刺激

1.1 经颅磁刺激(TMS)

TMS 基于电磁感应与电磁转换原理,用刺激线圈瞬变电流产生的磁场穿透颅骨,引起皮层 2~3 cm 范围内神经元群去极化并引起神经网络活动性改变[4,10]。重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)是最常用的 TMS 方式,用于治疗抑郁症、卒中、强迫症、慢性神经性疼痛和尼古丁依赖等神经心理障碍,也用于提高健康人的注意力和警惕性、提升运动学习能力并改善认知等[10-11]。美军很早就对 rTMS 的认知增强功能产生了兴趣,并资助其用于军事环境睡眠剥夺后的认知修复和增强研究[5,8]。rTMS 具有体积较大、使用受限和定位不精确等缺点,未来还需借助导航定位系统(如神经成像技术、神经导航软件或机器人)精准放置线圈,并将该模式从实验室研究拓展到临床和军事应用中[4,11-12]。

1.2 经颅电刺激(tES)

tES 通过头皮电极形成电流通路向大脑皮层传递低强度电流以改变大脑功能[5-6],最常用的是经颅有流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)[5]。tDCS 以微弱直流电(通常 1~2 mA,最高不宜超过 4 mA)调节大脑皮质兴奋性,是抑郁症和尼古丁依赖的 A 级推荐治疗方法[13],并具有广泛的军事机能增强功能[14-15]。经颅交流电刺激(transcranial alternating current stimulation,tACS)是 tDCS 的特殊版本,以正弦、双相交流电刺激皮质神经元,调节内源性脑振荡和神经可塑性,帮助缓解抑郁、妄想和痴呆等症状[16]。相比 TMS,tES 更为小巧方便,军事应用潜力巨大。未来还需开展研究以明确其神经机制,检验与其他措施联合干预的疗效以及如何与其他技术相结合以精准定位等[13, 16]。

1.3 新兴 NIBS 技术

TMS 和 tES 普遍空间分辨率较低且难以刺激深部脑组织。低强度聚焦超声(low-intensity focused ultrasound, LIFU)有望弥补这些不足[4]。借助功能磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)进行定位,LIFU 的空间分辨率可达到 1.5 mm 并无创刺激深部脑组织,诱导靶点神经元的可逆性兴奋或抑制[9, 17]。目前,LIFU 的研究刚起步,未来还需更多研究以推动其从实验室走向临床和社会应用。经皮迷走神经刺激术(transcutaneous vagus nerve stimulation, tVNS)以耳部迷走神经分布、耳针治疗和迷走神经刺激为基础,有望调节脑干、丘脑和大脑皮层等相关区域活动[18-19]。目前聚焦于评估临床治疗效果、安全性与转化研究,未来还需统一命名、明确刺激方法并探索个性化刺激等[18]。

2 神经反馈(NF)

NF 是以神经成像技术反馈大脑活动信号的生物反馈,以自主调节脑功能[2]。NF 可广泛改善神经精神障碍症状(特别是创伤后应激障碍和中风),也可提升健康个体的认知、运动功能以及医生的手术表

现等[20]。目前研究应用较多的是基于脑电图(electroencephalography, EEG)、fMRI 和 fNIRS 的 EEG-NF、fMRI-NF 和 fNIRS-NF(图 2)。

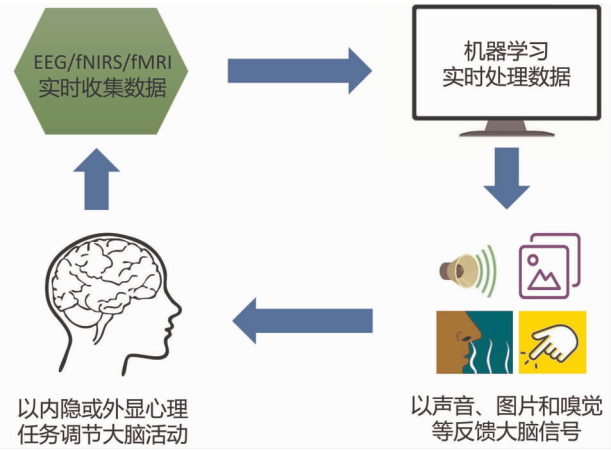


图 2 神经反馈示意图

2.1 脑电图神经反馈(EEG-NF)

EEG-NF 是研究最早的 NF,包括频率训练、慢皮层电位反馈训练和不同区域功能连接的连贯训练等不同类型[21-23]。近年来,无线 EEG 和移动脑成像解决方案(由无线 EEG 帽或耳机、开源软件平台和智能手机或平板电脑综合构成)推动 EEG-NF 日趋便携,从实验室走向日常应用[24]。最近,研究者用机器学习算法分析同时记录的杏仁核 fMRI 和头皮 EEG 数据,形成一个可反映杏仁核活动峰值和低谷的 EEG 模型(即电子指纹)[25-26]。这样无需借助 fMRI 就能以 EEG 调节杏仁核功能,即杏仁核电指纹神经反馈。该训练的出现有助于开发靶向杏仁核的预防性 NF,对提升军人抗压能力具有重要意义[27]。

2.2 功能磁共振神经反馈(fMRI-NF)

fMRI-NF 采用实时 fMRI(real-time fMRI,rt-fMRI)在线获取、预处理和分析数据,并实时反馈给受试者以形成闭环回路,即 rt-fMRI-NF[28-30]。相比 EEG 和 fNIRS,rt-fMRI 具有较高的空间分辨率(毫米级)和较好的时间分辨率(毫秒级),并能显示深部脑组织,因此可精细靶向深部脑区[30]。rt-fMRI-NF 主要靶向感兴趣区域,多集中于与情绪、运动和认知等相关的脑区,尤其是杏仁核、前脑岛和前扣带回等情绪处理与调节脑区[31]。近年来,靶向神经环路甚至脑网络的 rt-fMRI-NF 已被证明可行且有效,但研究还很初步[29,32]。鉴于 fMRI 价格昂贵且操作不方便,研究者尝试将其与 EEG 的优势进行互补,以便同时驱动两种反馈或借助二者的相关性开发更为便捷的反馈方式[28](如杏仁核电指纹神经反馈[25-26])。

2.3 功能近红外光谱神经反馈(fNIRS-NF)

fNIRS-NF 是近年来的新兴技术手段,也是 NF 领域发展最快的应用[33]。fNIRS 具有时间分辨率和空间分辨率较高、运动耐受良好和轻巧便携等优点[34]。这一方面使 fNIRS 可轻松地与生理测量(如心率、心率变异性、皮电和肌电)、神经成像(如 EEG 和脑磁图)、感官反馈设备(如 VR、振动反馈设备触觉手套、虚拟现实气味模拟器、听觉反馈设备)结合,以实现多模态发展。另一方面也使 fNIRS 特别适用于社会互动神经机制的超扫描研究(如临床心理治疗互动机制研究[35]),甚至开发出脑对脑的 NF 以实现脑对脑的直接影响[36]。由于 fNIRS 也只能反映大脑皮层,未来还需将其优势与 fMRI 或脑磁图进行互补,以开发更多用途的 NF。

3 非侵入性军事认知神经训练的发展趋势

预计到 2040 年,很多神经科学技术将从实验室走向应用,成为认知神经训练的常规手段[9]。随着认知神经科学的迅速发展以及更广泛的跨学科技术参与,基于 NIBS 和 NF 的非侵入性军事认知神经训练将在上述发展基础上呈现如下趋势。

3.1 智能化

人工智能、机器学习和深度学习等技术推动军事认知神经训练迎来智能化时代。一方面,机器学习和深度学习驱动的神经成像数据在线预处理、特征提取和数据分析是 NF 的基本步骤,也是某些技术突破的关键(如杏仁核电指纹神经反馈)[25-26]。另一方面,人工智能被加速用于医疗卫生(包括军人群体)研究与应用[37-38]。在军事领域,人工智能辅助作战人员增强能力,其应用范围涉及从增强现实设备以帮助学习和改善训练,到植入脑机接口(brain-computer interface, BCI)以创建仿生“超级战士”的广泛领域[39]。

3.2 个性化

个性化的本质是闭环干预,即根据个体当前的状态(如表现指标、自主反应、大脑活动模式等)调整任务难度和奖励水平,从而实时地为个体定制反馈调节而非提供“千人一面”的应对措施[2,7]。现有研究已经有可能准确识别大脑结构和功能的个性特征[5],并且个性化所需的部分技术已经准备就绪,如远程记录大脑活动和调整治疗的便携式 EEG 耳机、能跟踪生理参数(例如心率、呼吸频率)的可穿戴设备以及用于创建考虑解剖和功能差异的特定目标分析方法(即算法)等[5]。

3.3 多模态

伴随整合神经科学时代的来临[40],认知神经科学

可利用多学科方法从多水平收集丰富信息,使跨学科、跨技术、跨系统或跨感官的多模态联合成为研究和应用的发展趋势。目前,EEG 和 fNIRS 价格便宜、操作简便且携带方便,往往能融入到各类训练任务中[28,41];VR、运动捕捉器、互动游戏和全向跑步机等多感官设备可提供更为自然的训练环境[42];人工智能、机器学习和深度学习等技术有助于分析复杂的数据[7,43],共同推动认知神经训练的多模态发展。

3.4 感官化

以虚拟现实技术为核心,结合运动捕捉器、传感器、互动游戏和跑步机等工具的多感官刺激是军事认知神经训练发展的一个方向。虚拟现实是计算机生成的一种三维模拟,通过呈现富含图像和声音等信息的场景,使人们能以看似真实的方式与该场景互动[44]。虚拟现实能提升参与者的兴奋性、积极性和注意力,并提高实验的生态效度[45]。最近,虚拟现实与动作捕捉器、传感器和全向跑步机相结合被用于认知增强、身心协同以及相关评估[7,42],与眼动脱敏和再加工疗法、虚拟现实暴露疗法、心理治疗和跑步机相结合被用于治疗创伤后应激障碍[46],对军事认知神经训练的感官化提供了重要参考。

3.5 可穿戴

训练设备日益便携甚至可穿戴是军事认知神经训练的另一个发展方向。在 NIBS 中,tVNS 较易可穿戴[47];tES 相对便携,但离可穿戴还有距离[13];rTMS 体积较大,LIFU 需要 fMRI 进行定位,短期内都较难可穿戴[4,17]。在 NF 中,移动神经成像是可穿戴的技术基础[24]。目前,无线 EEG 耳机(帽)技术日益成熟[24,48],自然环境中的 fNIRS 便携设备亦不少[49-50],而 fMRI 体积庞大,因此 EEG-NF 和 fNIRS-NF 较易实现可穿戴,而多模态研究的深入可能会间接推动基于 fMRI 甚至脑磁图的认知神经训练的可穿戴发展[51]。未来,可穿戴将有望推动军事认知神经训练的远程化和规模化发展。

4 我军开展非侵入性军事认知神经训练研究和应用的思考

伴随认知神经科学、计算机和材料等科学技术的飞速发展,认知神经训练日益从实验室走向社会大众,其中非侵入性途径因其安全无创而备受关注。无论是目前临床常用的 rTMS 和 tDCS、新兴的 LIFU 和 tVNS,以及因神经成像技术而各有所长的 EEG-NF、fMRI-NF 和 fNIRS-NF,还是其智能化、个性化、多模态、感官化和可穿戴发展趋势,非侵入性认知神经训练都给我军开展相应的军事心理训练提供了前所未有的发展契机。一方面,可根据我军需求积极开展成熟技术的应用研究,直接服务战场和官兵需要。另一方面,立足前沿,将新兴实验技术与军事环境和作业任务相结合,积极拓展军事认知神经训练的新技术和新方法,并引领军事心理训练发展。

在拥抱机会的同时,我们尚需看到如下问题。首先,非侵入性途径普遍存在便携与定位受限的矛盾(表 1):要么便携但定位不精确或定位浅,要么定位精确、定位深但不便携[52]。要突破这一限制,一方面有赖于神经成像、机器学习和多模态联合研究的发展;另一方面也需要积极探索更为安全、可靠和方便的侵入性途径,如深部脑刺激。其次,目前还没有充分的证据表明“人-机”互动的认知神经训练一定优于“人-人”互动的行为训练。认知神经训练多借助仪器设备直接靶向特定脑组织,可能给受试者“机械”的感觉,甚至诱发其“机器焦虑”(因为不熟悉而担心自己操作不好仪器设备)。最后,未来还需考虑受试者的心理感受,并将行为训练和认知神经训练相结合以实现优势互补。

整体来看,军事认知神经训练的机遇与挑战并存。我们需要积极把握时机,让非侵入性军事认知神经训练更好地为部队战斗力和官兵福祉服务。

表 1 主要非侵入性军事认知神经训练方式对比分析

名称	作用位点	发展	优势	不足
TMS	大脑皮层	相对成熟		不便携;定位不精确;难调控深部脑组织
tDCS	大脑皮层	相对成熟	便携	定位不精确;难调控深部脑组织
LIFU	深部脑组织	新兴技术	定位精确;能调控深部脑组织	不便携
tVNS	脑内迷走神经	新兴技术	便携;低成本;操作简便	定位不精确;定位特定脑区
EEG-NF	大脑皮层	相对成熟	便携;便宜	定位不精确;难调控深部脑组织
fMRI-NF	深部脑组织	相对成熟	定位精确;能调控深部脑组织	不便携;价格昂贵;操作不方便
fNIRS-NF	大脑皮层	新兴技术	便携;便宜;运动耐受好	定位不精确;难调控深部脑组织

非侵入性军事认知神经训练的共同优势为安全、可控和非侵入;共同不足为机制不明确

参考文献:

[1] 苗丹民,严进,冯正直. 军事心理学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2020.
MIAO D M, YAN J, FENG Z Z. Military psychology[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2020.

[2] 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. DOI: 10.1038/nrn.2016.164.

[3] ALTIMUS C M, MARLIN B J, CHARALAMBAKIS N E, *et al*. The next 50 years of neuroscience[J]. J Neurosci, 2020, 40(1): 101-106. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0744-19.2019.

[4] 张迪, 于猛, 刘霞. 神经调控技术简述[J]. 山东大学学报(医学版), 2020, 58(8): 50-60. DOI: 10.6040/j.issn.1671-7554.0.2020.0602.
ZHANG D, YU M, LIU X. A general overview of neuromodulation[J]. J Shandong Univ Health Sci, 2020, 58(8): 50-60. DOI: 10.6040/j.issn.1671-7554.0.2020.0602.

[5] ANTAL A, LUBER B, BREM A K, *et al*. Non-invasive brain stimulation and neuroenhancement[J]. Clin Neurophysiol Pract, 2022, 7: 146-165. DOI: 10.1016/j.cnp.2022.05.002.

[6] GUIDETTI M, BERTINI A, PIRONE F, *et al*. Neuroprotection and non-invasive brain stimulation: facts or fiction?[J]. Int J Mol Sci, 2022, 23(22): 13775. DOI: 10.3390/ijms232213775.

[7] ZIEGLER D A, ANGUERA J A, GALLEN C L, *et al*. Leveraging technology to personalize cognitive enhancement methods in aging[J]. Nat Aging, 2022, 2(6): 475-483. DOI: 10.1038/s43587-022-00237-5.

[8] NELSON J T, TEPE V. Neuromodulation research and application in the U.S. Department of Defense[J]. Brain Stimul, 2015, 8(2): 247-252. DOI: 10.1016/j.brs.2014.10.014.

[9] JANGWAN N S, ASHRAF G M, RAM V, *et al*. Brain augmentation and neuroscience technologies: current applications, challenges, ethics and future prospects[J]. Front Syst Neurosci, 2022, 16: 1000495. DOI: 10.3389/fnsys.2022.1000495.

[10] 唐莺莹, 吴毅, 王继军. 重复经颅磁刺激的临床应用与操作规范上海专家共识[J]. 上海医学, 2022, 45(2): 65-70. DOI: 10.19842/j.cnki.issn.0253-9934.2022.02.001.
TANG Y Y, W Y, WANG J J. Shanghai expert consensus on the clinical application and operation of repetitive transcranial magnetic stimulation[J]. Shanghai Med J, 2022, 45(2): 65-70. DOI: 10.19842/j.cnki.issn.0253-9934.2022.02.001.

[11] ROSSI S, ANTAL A, BESTMANN S, *et al*. Safety and recommendations for TMS use in healthy subjects and patient populations, with updates on training, ethical and regulatory issues: expert guidelines[J]. Clin Neurophysiol, 2021, 132(1): 269-306. DOI: 10.1016/j.clinph.2020.10.003.

[12] KASPRZYCKA W, NAURECKA M, SIERAKOWSKI B, *et al*. Recognition and processing of visual information after neuronavigated transcranial magnetic stimulation session[J]. Brain Sci, 2022, 12(9): 1241. DOI: 10.3390/brainsci12091241.

[13] 唐睿, 宋洪文, 孔卓, 等. 经颅直流电刺激治疗常见神经精神疾病的临床应用专家共识[J]. 中华精神科杂志, 2022, 55(5): 327-382. DOI: 10.3760/cma.j.cn113661-20220527-00131.
TANG R, SONG H W, KONG Z, *et al*. Chinese experts' consensus on clinical application of transcranial direct current stimulation in the treatment of common neurological diseases and mental disorders[J]. Chin J Psychiatry 2022, 55(5): 327-382. DOI: 10.3760/cma.j.cn113661-20220527-00131.

[14] FELTMAN K A, HAYES A M, BERNHARDT K A, *et al*. Viability of tDCS in military environments for performance enhancement: a systematic review[J]. Mil Med, 2020, 185(1/2): e53-e60. DOI: 10.1093/milmed/usz189.

[15] DAVIS S E, SMITH G A. Transcranial direct current stimulation use in warfighting: benefits, risks, and future prospects[J]. Front Hum Neurosci, 2019, 13: 114. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00114.

[16] 汪晓, 张庆娥. 经颅交流电刺激在精神神经疾病中应用及作用机制的研究进展[J]. 神经疾病与精神卫生, 2022, 22(6): 444-447. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2022.06.012.
WANG X, ZHANG Q E. Research progress of application and mechanism of action of transcranial alternating current stimulation in neuropsychiatric diseases[J]. J Neurosci Ment Health, 2022, 22(6): 444-447. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2022.06.012.

[17] ARULPRAGASAM A R, VAN'T WOUT-FRANK M, BARREDO J, *et al*. Low intensity focused ultrasound for non-invasive and reversible deep brain neuromodulation—a paradigm shift in psychiatric research[J]. Front Psychiatry, 2022, 13: 825802. DOI: 10.3389/fpsyt.2022.825802.

[18] WANG Y, LI S Y, WANG D, *et al*. Transcutaneous auricular vagus nerve stimulation: from concept to application[J]. Neurosci Bull, 2021, 37(6): 853-862.

DOI: 10.1007/s12264-020-00619-y.

[19] 顾楠楠, 李春波. 经皮迷走神经刺激术研究进展[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2020, 40(4): 539-542. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8115.2020.04.021.
GU N N, LI C B. Research progresses in transcutaneous vagus nerve stimulation[J]. J Shanghai Jiaotong Univ Med Sci, 2020, 40(4): 539-542. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8115.2020.04.021.

[20] 杨文杰, 南文雅, 龚安民, 等. 神经反馈调节健康个体注意力的研究进展[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(3):351-359. DOI: 10.3969/j.issn.0258-8021.2022.03.011.
YANG W J, NAN W Y, GONG A M, *et al*. Research progresses on attentional modulation via neurofeedback in healthy individuals[J]. Chin J Biomed Eng, 2022, 41(3): 351-359. DOI: 10.3969/j.issn.0258-8021.2022.03.011.

[21] 陈枭宇, 随力, 李丽. 脑电神经反馈训练在提高工作记忆中应用的研究与挑战[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(8): 987-991. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2022.08.012.
CHEN X Y, SUI L, LI L. Advances and challenges of EEG neurofeedback training in improving working memory[J]. Chin J Med Phys, 2022, 39(8):987-991. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2022.08.012.

[22] VIVIANI G, VALLESI A. EEG-neurofeedback and executive function enhancement in healthy adults: a systematic review[J]. Psychophysiology, 2021, 58(9): e13874. DOI: 10.1111/psyp.13874.

[23] 裴广盈, 王书杰, 石忠焱, 等. 基于失匹配负波的神经反馈技术在认知功能改善中的应用[J]. 中华神经医学杂志, 2020, 19(4): 330-336. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20200216-00081.
PEI G Y, WANG S J, SHI Z Y, *et al*. Neurofeedback technique based on mismatched negativity in improvement of cognitive function[J]. Chin J Neuromed, 2020, 19(4): 330-336. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20200216-00081.

[24] STOPCZYNSKI A, STAHLHUT C, PETERSEN M K, *et al*. Smartphones as pocketable labs: visions for mobile brain imaging and neurofeedback[J]. Int J Psychophysiol, 2014, 91(1): 54-66. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2013.08.007.

[25] KEYNAN J N, COHEN A, JACKONT G, *et al*. Electrical fingerprint of the amygdala guides neurofeedback training for stress resilience[J]. Nat Hum Behav, 2019, 3(1): 63-73. DOI: 10.1038/s41562-018-0484-3.

[26] FRUCHTMAN-STEINBOK T, KEYNAN J N, COHEN A, *et al*. Amygdala electrical-finger-print (AmygEFP) NeuroFeedback guided by individually-tailored Trauma script for post-traumatic stress disorder: proof-of-concept[J]. Neuroimage Clin, 2021, 32: 102859. DOI: 10.1016/j.nicl.2021.102859.

[27] YOUNG K D. Neurofeedback for soldiers[J]. Nat Hum Behav, 2019, 3(1): 16-17. DOI: 10.1038/s41562-018-0493-2.

[28] CICCARELLI G, FEDERICO G, MELE G, *et al*. Simultaneous real-time EEG-fMRI neurofeedback: a systematic review[J]. Front Hum Neurosci, 2023, 17: 1123014. DOI: 10.3389/fnhum.2023.1123014.

[29] 邹智, 李中林, 周菁, 等. 实时功能磁共振成像神经反馈调节目标分析方法的研究进展[J]. 磁共振成像, 2020, 11(8): 684-687. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2020.08.022.
ZOU Z, LI Z L, ZHOU J, *et al*. Research progress on the regulation target of real-time functional magnetic resonance imaging neurofeedback[J]. Chin J Magn Reson Imaging, 2020, 11(8): 684-687. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2020.08.022.

[30] 管民, 史大鹏. 基于实时功能MRI的新型神经反馈技术研究进展[J]. 中华放射学杂志, 2015(2): 152-155. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.02.021.
GUAN M, SHI D P. Research progress of new neural feedback technology based on real-time functional MRI[J]. Chin J Radiol, 2015(2): 152-155. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.02.021.

[31] ZWEERINGS J, SARKHEIL P, KELLER M, *et al*. Rt-fMRI neurofeedback-guided cognitive reappraisal training modulates amygdala responsivity in posttraumatic stress disorder[J]. Neuroimage Clin, 2020, 28: 102483. DOI: 10.1016/j.nicl.2020.102483.

[32] 贺文颉, 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. DOI: 10.7507/1001-5515.201605037.
HE W J, BU H B, TONG L, *et al*. Research development of real-time functional magnetic resonance imaging neurofeedback technology based on brain network connectivity[J]. J Biomed Eng, 2017, 34(3): 456-460. DOI: 10.7507/1001-5515.201605037.

[33] SOEKADAR S R, KOHL S H, MIHARA M, *et al*. Optical brain imaging and its application to neurofeedback[J]. Neuroimage Clin, 2021, 30: 102577. DOI: 10.1016/j.nicl.2021.102577.

[34] SAKAI J. Functional near-infrared spectroscopy reveals brain activity on the move[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2022, 119(25): e2208729119. DOI: 10.1073/pnas.2208729119.

[35] CRUM J, ZHANG X, NOAH A, *et al*. An approach to

neuroimaging interpersonal interactions in mental health interventions [J]. Biol Psychiatry Cogn Neurosci Neuroimaging, 2022, 7(7): 669-679. DOI: 10.1016/j.bpsc.2022.01.008.

[36] GVIRTS H Z, PERLMUTTER R. What guides us to neurally and behaviorally align with anyone specific? A neurobiological model based on fNIRS hyperscanning studies [J]. Neuroscientist, 2020, 26(2): 108-116. DOI: 10.1177/1073858419861912.

[37] SHANDHI M M H, CHO P J, ROGHANIZAD A R, *et al*. A method for intelligent allocation of diagnostic testing by leveraging data from commercial wearable devices: a case study on COVID-19[J]. NPJ Digit Med, 2022,5(1):130. DOI: 10.1038/s41746-022-00672-z.

[38] CONROY B, SILVA I, MEHRAEI G, *et al*. Real-time infection prediction with wearable physiological monitoring and AI to aid military workforce readiness during COVID-19 [J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 3797. DOI: 10.1038/s41598-022-07764-6.

[39] MORENO J, GROSS M L, BECKER J, *et al*. The ethics of AI-assisted warfighter enhancement research and experimentation: historical perspectives and ethical challenges[J]. Front Big Data, 2022, 5: 978734. DOI: 10.3389/fdata.2022.978734.

[40] BUHUSI C V, OPRISAN S A, BUHUSI M. The future of integrative neuroscience: the big questions[J]. Front Integr Neurosci, 2023, 17: 1113238. DOI: 10.3389/fnint.2023.1113238.

[41] PINTI P L, 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.

[42] ALBERTS J L, MCGRATH M, MILLER KOOP M, *et al*. The immersive Cleveland clinic virtual reality shopping platform for the assessment of instrumental activities of daily living[J]. J Vis Exp, 2022(185): e63978. DOI: 10.3791/63978.

[43] EASTMOND C, SUBEDI A, DE S, *et al*. Deep learning in fNIRS: a review [J]. Neurophotonics, 2022, 9(4): 041411. DOI: 10.1117/1.NPh.9.4.041411.

[44] EMMELKAMP P M G, MEYERBRÖKER K. Virtual reality therapy in mental health [J]. Annu Rev Clin Psychol, 2021, 17: 495-519. DOI: 10.1146/annurev-clinpsy-081219-115923.

[45] PARSONS T D. Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences[J]. Front Hum Neurosci, 2015, 9: 660. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00660.

[46] JONES C, SMITH-MACDONALD L, VAN VEELEN N, *et al*. Therapist and operator experiences utilizing multi-modal motion-assisted memory desensitization and reconsolidation (3MDR) for treatment of combat related posttraumatic stress disorder amongst military and veteran populations [J]. Eur J Psychotraumatol, 2022, 13(1): 2062996. DOI: 10.1080/20008198.2022.2062996.

[47] GURTUBAY I G, PEREZ-RODRIGUEZ D R, FERNANDEZ E, *et al*. Immediate effects and duration of a short and single application of transcutaneous auricular vagus nerve stimulation on P300 event related potential[J]. Front Neurosci, 2023, 17: 1096865. DOI: 10.3389/fnins.2023.1096865.

[48] ELBOGEN E B, ALSOBROOKS A, BATTLES S, *et al*. Mobile neurofeedback for pain management in veterans with TBI and PTSD[J]. Pain Med, 2021, 22(2): 329-337. DOI: 10.1093/pm/pnz269.

[49] PINTI P L, AICHELBURG C, GILBERT S, *et al*. A review on the use of wearable functional near-infrared spectroscopy in naturalistic environments[J]. Jpn Psychol Res, 2018, 60(4): 347-373. DOI: 10.1111/jpr.12206.

[50] JI H W, XU Z, WANG M Y, *et al*. A flexible optoelectronic device for continuous cerebral blood flow monitoring[J]. Biosensors, 2022, 12(11): 944. DOI: 10.3390/bios12110944.

[51] RU X Y, HE K Y, LYU B J, *et al*. Multimodal neuroimaging with optically pumped magnetometers: a simultaneous MEG-EEG-fNIRS acquisition system [J]. NeuroImage, 2022, 259: 119420. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.119420.

[52] CINEL C, VALERIANI D, POLI R. Neurotechnologies for human cognitive augmentation: current state of the art and future prospects[J]. Front Hum Neurosci, 2019, 13: 13. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00013.

(收稿:2023-09-06;修回:2023-10-20)

(编辑 吴培红)