

# 基于虚拟现实技术记忆相关训练的脑功能激活变化研究

罗红,徐丽

**【摘要】** 目的:通过功能性近红外光谱技术(fNIRS)观察多模块3D-虚拟现实技术(VR)记忆相关训练对大脑功能激活状态的影响。方法:本研究共招募26例健康受试者,每人进行一次15min的多模块3D-VR记忆相关训练,26例受试者在训练前后分别接受53通道静息态fNIRS功能成像设备监测10min,对2次测试中所有通道采集到的额叶血氧信号及额叶功能评价指标HbO血氧浓度beat值及血氧信号均值进行对比,分析额叶功能变化及对皮层激活的影响。结果:与训练前比较,Oxy-Hb beta值在通道14、22、24、43有显著下降( $P<0.01$ ),Oxy-Hb血氧均值在左侧额叶通道14、22、24、43有显著下降( $P<0.01$ )。结论:多模块3D-VR记忆相关训练,对大脑左侧额回、左内侧额上回、左额叶背外侧、右侧额中回(通道14、22、24、43),以上注意力、记忆力等认知相关脑区有显著激活。

**【关键词】** 多模块3D虚拟现实技术;功能性近红外光谱技术;血氧浓度;皮层兴奋性

**【中图分类号】** R49; R742    **【DOI】** 10.3870/zgkf.2024.09.003

**Changes of brain function activation based on VR memory-related training: a functional near infrared spectroscopy study** *Luo Hong, Xu Li. Department of Rehabilitation Medicine, Sichuan Academy of Medical Sciences, Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu 610072, China*

**【Abstract】** **Objective:** To observe the effect of multi-module 3D-VR memory-related training on brain function activation by functional near infrared spectroscopy (fNIRS). **Methods:** A total of 26 healthy subjects were recruited in this experiment, and each of them tried a 15-min multi-module 3D-VR memory-related training. All subjects were monitored by resting fNIRS for 10 min before and after the training. The frontal lobe blood oxygen signals were collected from all channels in the two tests, the beat value of frontal lobe blood oxygen concentration and the average value of blood oxygen signals were recorded, and the changes of frontal lobe function and its influence on cortical activation were compared and analyzed. **Results:** Compared with those before the test, the beta values of OXY-HB in frontal lobe in channels (14, 22, 24, 43) were significantly different ( $P<0.05$ ), and the mean values of blood oxygen signals in frontal lobe in channels (14, 22, 24, 43) were significantly different ( $P<0.05$ ). **Conclusion:** Multi-module 3D-VR memory-related training can significantly activate the left middle frontal gyrus, the left medial frontal gyrus, the left dorsolateral frontal gyrus and the right middle frontal gyrus (channels 14, 22, 24 and 43), and the above cognitive related brain regions such as attention and memory.

**【Key words】** multi-module 3D virtual reality technology; functional near infrared spectroscopy; blood oxygen concentration; cortical excitability

虚拟现实技术(virtual reality, VR)是利用计算机技术和感知器技术模拟虚拟环境的交互手段<sup>[1]</sup>,应用计算机生成特殊的虚拟环境,配合各种装置使用户将自己投射到该环境中,并对该环境进行操作和控制。近年来,随着VR技术的不断进展以及VR在认知康复中的应用,VR技术已与其他康复方式结合应用于各认知域<sup>[2-3]</sup>。目前,虽然已有的多数研究都表明患者能很好地接受VR认知康复并取得更好的治疗效果,但没有一致认可的VR治疗效果的客观评估方式,

需要更多的临床研究来验证。

功能近红外光谱(functional near-infrared spectroscopy,fNIRS)是一种可佩戴的光学光谱系统,最初开发用于通过测量血氧浓度来连续、无创地监测大脑功能。当大脑接受特定刺激引起血液动力学的反应,氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO)和脱氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, HbR)会以增加或减少的形式来表现。fNIRS利用近红外光对组织良好的穿透能力,通过检测血流动力学的区域变化导致的光吸收和吸收光谱的变化,从而允许对HbO、HbR、总血红蛋白浓度进行定量<sup>[4]</sup>,推测大脑潜在的神经活动。同时,fNIRS具有受体位改变影响较小、安全性高、时间分辨率足等优势。基于此,本研究拟通过fNIRS技术来记录多模块3D-VR记忆相关训练对大脑皮层功能近红

基金项目:四川省科技部重点研发课题(2020YFS0415);四川省干部保健科研项目(川干研2022-201);四川省卫健委普及应用课题(21PJ079)  
收稿日期:2024-03-04

作者单位:四川省医学科学院·四川省人民医院康复科,成都610072  
作者简介:罗红(1988-),女,技师,主要从事神经康复方面的研究。  
通讯作者:徐丽,xuli\_0125@163.com

外信号的变化情况,初步探讨其对大脑功能激活状态的影响。

## 1 资料和方法

**1.1 一般资料** 本研究招募了 26 例健康受试者,男 14 例,女 12 例;年龄 (23.20 ± 7.13) 岁;体质量 (58.0 ± 12.83) Kg;受教育年限 (14.16 ± 2.37) 年;均为右利手,视力或矫正视力正常,无色盲、色弱等眼疾,无不良事件。在接受训练之前,所有受试者均已充分了解本研究目的,且每位受试者均签署书面知情同意书。本研究已取得四川省人民医院伦理审查委员会的批准(2021-053)。

**1.2 方法** 26 例受试者均接受多模块 3D-VR 相关训练,选择在 Steam VR 平台上运行记忆力康复训练系统。治疗前告知受试者注意事项,解释训练的目的及意义,详细解释训练动作及流程,并给受试者逐个演示,让受试者充分理解动作要义。检测时选择一处安静的环境,受试者佩戴 3D 头盔,选择由耳机和屏幕向其传达需要抓取的物品,见图 1,如台灯、手机、筷子等,待指令中出现的物品出现后受试者使用手柄抓取相应物品并放入前面的篮子中,见图 2。

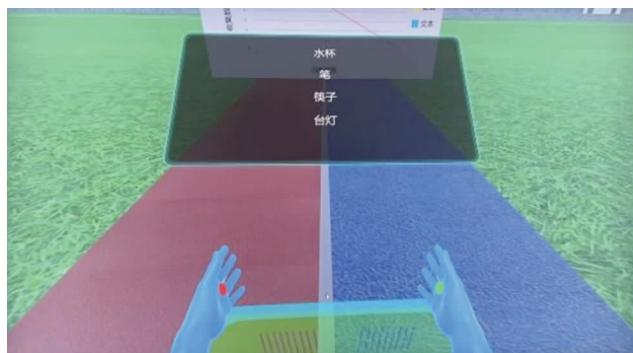


图 1 屏幕显示需要抓取的物品

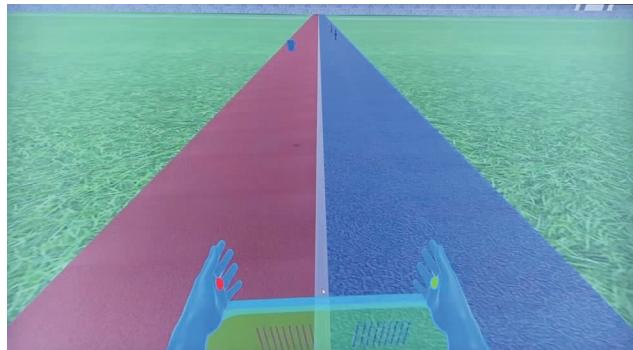


图 2 等待指令物品出现后抓取

**1.3 评定标准** 26 例受试者分别在多模块 3D-VR 记忆相关训练前后接受 fNIRS 监测,监测前为受试者佩戴光极帽(在前额叶以光极 9 为 FPz 参考点,左右大脑半球沿 T3~T4 线对称分布,紧贴头皮,后脑固定)。训练

前受试者在评定室坐位安静休息 5min 后佩戴头帽,闭上眼睛,避免有规律思考、肢体活动及头部晃动,采集 10min 静息态数据,如图 3 所示;训练后立即使用 fNIRS 再次采集 10min 静息态数据。**①fNIRS 数据采集:**采用 BS-3000 型 53 通道近红外光谱成像系统,使用波长为 730nm 和 850nm 的连续波发光二极管以 20Hz 的采样率记录受试者静息态下的大脑 HbO 的浓度变化,相邻光源头和接收器距离为 3cm,覆盖面积为 6cm × 12cm,检测时间分辨率为 0.13s,探测深度为皮质下 0.5cm。在这项研究中,将 26 个 NIRS 光电二极管(14 个光源和 12 个检测器)以矩形左右对称排布,该设备由 16 个发射探头和 16 个接收探头组成 53 个有效通道,通道坐标参考标准国际 10-20 电极系统覆盖双侧额叶脑区,见图 4。由于 HbO 浓度变化值信号对皮质血流变化反应更为敏感,并且有更高的信噪比<sup>[5]</sup>,因此选择 HbO 浓度变化值作为测试主要采集数据。**②fNIRS 数据处理:** 使用 NirSpark 软件进行数据预处理,通过质量控制模块检测运动伪影和滤波,剔除不合格数据;采用样条插值法按通道进行运动伪迹修正;将采集到的信号先进行 0.01~0.10Hz 的带通滤波,以去掉高频噪声和缓慢漂移的干扰,根据修正的 Beer-Lambert 定律将滤波后的光密度数据转换成 HbO 浓度变化值,并对(-5s,110s)期间 HbO 浓度均值进行叠加以提高信噪比及观察总体激活程度,见图 5<sup>[6]</sup>,通过广义线性模型(generalized linear models, GLM)提取额叶各通道 HbO 的 beta 值,并计算(0s,90s)条件下的血氧均值为主要结局指标。

**1.4 统计学方法** 应用 spss19.0 统计学软件进行数据分析,计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,选用配对样本 *t* 检验,  $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。



图 3 受试者接受 fNIRS 监测情况

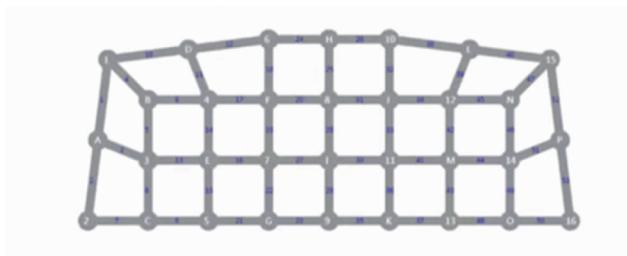


图4 光纤排布图

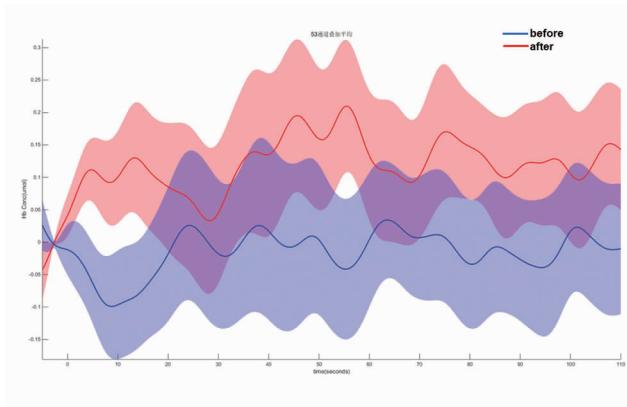


图5 所有通道训练前后 HbO 叠加平均

## 2 结果

本次研究结果显示各通道 Oxy-Hb beta 值范围为 $-8.00\sim10.00(\text{mmmol/L}\cdot\text{mm})$ , Oxy-Hb 血氧均值范围为 $-8.00\sim7.50(\text{mmmol/L}\cdot\text{mm})$ , HbO beta 值及血氧均值越大代表该通道神经功能激活度越高。26 例受试者在接受多模块 3D-VR 记忆相关训练前, fNIRS 监测到 Oxy-Hb beta 值在额叶通道 29、30、33、35、37、41、42、43、44、48 有显著激活, 见图 6, 训练后 Oxy-Hb beta 值在额叶通道 14、24、33 有显著激活, 见图 7, Oxy-Hb 血氧均值在额叶通道 14、21、29、30、37、41、44、48 有显著激活见图 8, 图 9;与训练前相比较, Oxy-Hb beta 值在通道 14、22、24、43 有显著激活 ( $P<0.01$ ), 见表 1、图 10, Oxy-Hb 血氧均值在左侧额叶通道 14、22、24、43 有激活 ( $P<0.01$ ), 见表 2、图 11。参考光极通道在蒙特利尔神经研究所(montreal neurological institute, MNI)脑模版上的坐标, 通道 14、22、24、43MNI 坐标相应解剖位置为大脑左侧额中回、左内侧额上回、左额叶背外侧、右侧额中回。

表1 26例受试者训练前后 Oxy-Hb beta 值比较

通道	训练前	训练后	t 值	P 值
14	$-0.633\pm0.212$	$0.964\pm0.059$	3.158	0.001
22	$-0.962\pm0.922$	$1.038\pm0.422$	5.745	0.003
24	$-0.761\pm0.469$	$1.078\pm0.102$	7.137	0.001
43	$-0.114\pm0.646$	$0.686\pm0.189$	4.864	0.002

表2 26例受试者训练前后的 Oxy-Hb 血氧均值比较

mmmol/L·mm,  $\bar{x}\pm s$ 

通道	训练前	训练后	t 值	P 值
14	$-0.907\pm0.467$	$1.356\pm0.329$	6.767	0.001
22	$-0.754\pm0.722$	$0.866\pm0.417$	7.945	0.001
24	$-0.877\pm0.177$	$1.028\pm0.168$	5.839	0.003
43	$-0.660\pm0.914$	$0.955\pm0.533$	8.866	0.002

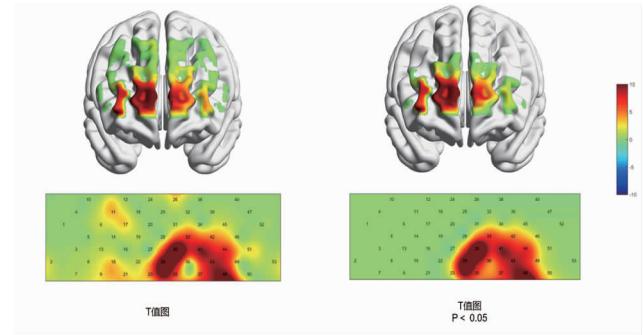


图6 受试者训练前 Oxy-Hb Beta 值激活脑区

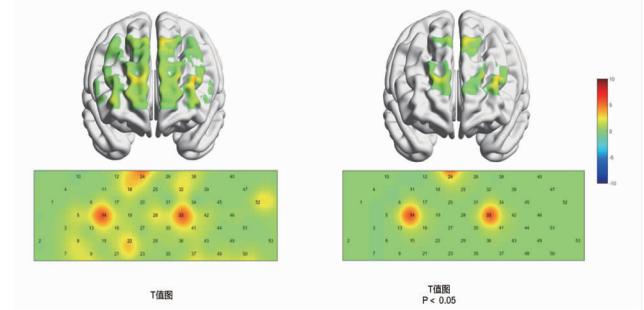


图7 受试者训练后 Oxy-Hb Beta 值激活脑区

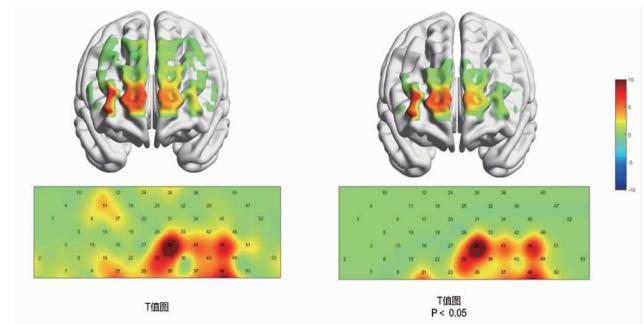


图8 受试者训练前 Oxy-Hb 血氧均值激活脑区

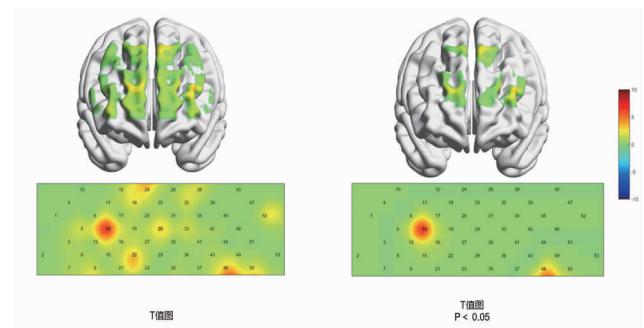


图9 受试者训练后 Oxy-Hb 血氧均值激活脑区

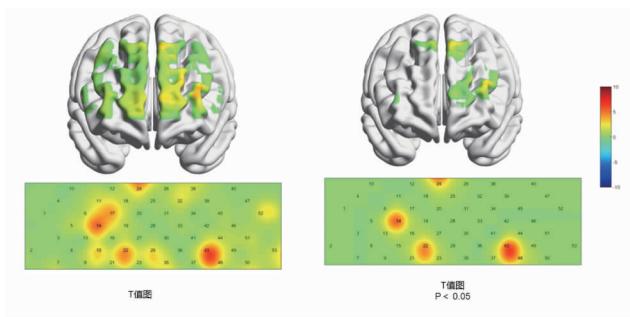


图 10 与训练前相比 Oxy-Hb Beta 值激活脑区

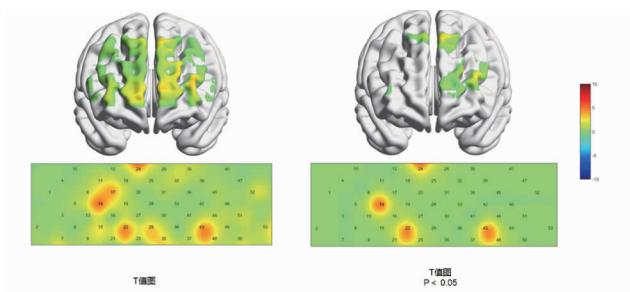


图 11 与训练前相比 Oxy-Hb 血氧均值激活脑区

### 3 讨论

fNIRS 作为一种神经反馈工具,目前已应用于脑卒中后康复评估、治疗等临床研究,但尚处于初级阶段,需要在更多的临床试验中,用于监测康复过程中脑功能的恢复与结构的重组<sup>[7]</sup>。已有研究表明 fNIRS 在运动想象中具有可行性和潜在有效性<sup>[8-9]</sup>,将其拓展至与全脑检测、多模态刺激、VR 以及视听刺激相结合后,显著增强了脑区激活效果。Maggio<sup>[10]</sup> 的研究显示基于 VR 的认知训练通过其复杂性和多样性,可以刺激患者多个脑区,达到显著改善神经系统疾病患者的执行、注意力、记忆力、视空间和言语等多领域的目的;另一项通过功能性核磁共振观察 VR 训练后患者大脑区域激活改变的实验<sup>[11]</sup>,结果发现患者的空间记忆能力得到提高,海马及海马旁回区域有明显激活。因此,鉴于 VR 训练对改善认知功能的有效性,通过 fNIRS 来观察多模块 3D-VR 记忆相关训练对大脑功能激活状态具有临床意义。

研究表明,大脑相关区域血红蛋白浓度变化与认知表现也具有显著相关性<sup>[12]</sup>。因此,本次研究结果,与训练前相比较,Oxy-Hb beta 值及 Oxy-Hb 血氧均值在通道 14、22、24、43,即大脑左侧额中回、左内侧额上回、左额叶背外侧、右侧额中回显著增加,激活通道的改变说明了从训练前的普遍激活到训练后局部大脑区域的显著激活。黄慧等<sup>[13]</sup>提出 VR 技术改善认知功能的机制是通过 VR 的沉浸感激活大脑的感觉运动整合,并调节注意力的相关脑网络,其中包括额叶、眶

额、左颞区;另一项通过脑机接口脑电信号特征观察 VR 工作记忆训练效果的研究<sup>[14]</sup>,结果显示工作记忆任务能够激活大脑前额叶皮层和顶叶皮层神经活动;这与本次研究结果一致,提示 VR 记忆训练改善认知功能的机制可能是通过额叶脑区的激活,并且在已有研究的基础上,本次研究观察到 VR 记忆相关训练对额叶具体脑回的激活转变。

普遍的解释认为左额中回(left middle frontal gyrus, LMFG) 参与了汉字独特的复杂视觉空间分析<sup>[15]</sup>,而本研究 VR 训练中屏幕上显示患者需要抓取的物品名称,正是汉字的视觉空间分析的体现,通过 fNIRS 观察到的 LMFG 的激活再次验证了该脑区对汉字阅读的认知功能;Song 等<sup>[16]</sup>在注意模式下,用脑电图探测经颅磁刺激额中回对脑网络动态模块重构影响的一项研究中,表明额中回在调节注意力网络中起着至关重要的作用;而 Avola 等<sup>[17]</sup> 在 3D 沉浸式全身康复框架研究中发现左侧额中回与选择性注意任务相关,提示了 VR 训练通过对额中回的激活以改善患者的注意力,减轻患者认知觉和感知觉障碍。已有的研究显示额上回参与调控工作记忆<sup>[18]</sup>,其损伤可致个体在执行认知任务过程中出现短期内维持、储存及处理信息以向目标行动的认知过程障碍,即说话/动作的启动和维持频率比正常人低,或者反映迟钝;本研究 VR 训练中动作的启动和维持对应了左内侧额上回功能的激活表现。背外侧前额叶皮层从黑质致密部和腹侧被盖区接收多巴胺投射,并且与工作记忆和注意力执行相关,而证据表明,语言的理解和产生需要左额叶背外侧(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC) 的认知控制和工作记忆资源来调控<sup>[19]</sup>;另外,DLPFC 调节自动动作趋势,刺激激活后能缩短自动行为的反应时间<sup>[20]</sup>;本研究结果显示左侧 DLPFC 的激活,这很好地反应了 VR 训练对记忆力和行为反应时间的作用。大脑额中回(middle frontal gyrus, MFG) 的功能包括了注意力、言语、情绪和觉醒,而右侧额中回(right middle frontal gyrus, RMFG) 对持续性注意力起着关键性作用<sup>[21]</sup>,这与 Song 等<sup>[16]</sup> 的研究结果一致,本研究 RMFG 的激活再次证明了 3D-VR 训练通过 RMFG 的激活对注意力产生影响。

综上所述,fNIRS 技术记录下,多模块 3D-VR 记忆相关训练对大脑左侧额中回、左内侧额上回、左额叶背外侧、右侧额中回,以上注意力、记忆力等认知相关脑区有显著激活,同时也再次有力地证实了 VR 技术对脑功能激活的有效性。不足地是,本研究样本量较小,因 3D-VR 设备限制未采用任务态 fNIRS 观察脑功能活动,并且没有对长时间多次使用 3D-VR 记忆相

关训练的累加效果做出对比。

## 【参考文献】

- [1] 王佳音,高蓓瑶,郑钧升,等.虚拟现实技术在认知障碍康复评定和治疗中的应用[J].中日友好医院学报,2023,37(6):354-357,360.
- [2] Liu Q, Song H, Yan M, et al. Virtual reality technology in the detection of mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis[J]. Ageing Res Rev. 2023,87:101889.
- [3] Park JH. Effects of virtual reality-based spatial cognitive training on hippocampal function of older adults with mild cognitive impairment. ? Int Psychogeriatr[J]. 2022,34(2):157-163.
- [4] Paulmurugan K, Vijayaragavan V, Ghosh S, et al. Brain-Computer Interfacing Using Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) [J]. ? Biosensors (Basel). 2021,11(10):389.
- [5] 王静,刘芸,黄浩宇,等.近红外脑功能成像在儿童康复科常见疾病研究中的应用综述[J].医疗卫生装备,2022,43(4):88-93,97.
- [6] 李玥.电子游戏相关实时脑功能活动的功能磁共振成像(fMRI)/功能近红外光谱(fNIRS)研究[D].华中科技大学,2019.
- [7] 闫思念,吴毅.近红外光谱技术在脑卒中康复领域的研究进展[J].中华物理医学与康复杂志,2021,43(3):285-288.
- [8] 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.
- [9] 王辉,吴吉生.虚拟现实训练对认知障碍的脑卒中偏瘫患者的影响[J].中国康复,2017,32(4):299-301.
- [10] Maggio MG, Maresca G, De Luca R, et al. The growing use of virtual Reality in cognitive rehabilitation: fact, fake or vision A scoping review[J]. J Natl Med Assoc. 2019,111(4):457-463.
- [11] 姜林鸿,刘晓丹,孙萍萍等.运动想象训练对卒中后患者上肢运动功能恢复的影响及静息态 fNIRS 脑网络特征研究[J].中国康复医学杂志,2023,38(11):1505-1513.
- [12] 李秀丽,李珊,冯梦晨,等.采用上肢运动游戏治疗卒中后轻度认知障碍并结合功能性近红外光谱技术进行疗效评估的研究[J].中国康复,2023,38(7):412-416.
- [13] 黄慧,贾艳滨,沈拾亦.虚拟现实技术在认知康复中的研究进展[J].中国康复医学杂志,2020,35(2):244-247.
- [14] 吴重琳.基于BCI-VR的工作记忆训练评估系统及其脑电信号分析[D].燕山大学,2023.
- [15] 陈发坤,陈甜,蔡文琦等.左侧额中回参与汉字视觉空间分析的fNIRS 证据[J].心理学报,2023,55(5):685-696.
- [16] Song P, Lin H, Liu C, et al. Transcranial magnetic stimulation to the middle frontal gyrus during attention modes induced dynamic module reconfiguration in brain networks[J]. Front Neuroinform. 2019,13:22.
- [17] Avola D, Cinque L, Foresti GL, et al. An interactive and low-cost full body rehabilitation framework based on 3D immersive serious games[J]. J Biomed Inform, 2019; 89(1) : 81-100.
- [18] Melrose RJ, Zahniser E, Wilkins SS, et al. Prefrontal working memory activity predicts episodic memory performance: A neuro-imaging study[J]. Behav Brain Res. 2020,379:112307.
- [19] Klaus J, Schutter DJLG. The role of left dorsolateral prefrontal cortex in language processing[J]. Neuroscience. 2018,377:197-205.
- [20] Xia X, Li Y, Wang Y, et al. Functional role of dorsolateral prefrontal cortex in the modulation of cognitive bias[J]. Psychophysiology. 2021,58(10):e13894.
- [21] Li B, Zhang L, Zhang Y, et al. Decreased functional connectivity between the right precuneus and middle frontal gyrus is related to attentional decline following acute sleep deprivation[J]. Front Neurosci. 2020,14:530257.

## • 外刊拾粹 •

### 迷走神经刺激治疗嗜睡症

迷走神经刺激(VNS)用于治疗癫痫患者,已被证明有副作用,包括提高警觉性和减少嗜睡。由于嗜睡症的特点是睡眠觉醒周期的异常调节,本研究评估了VNS治疗嗜睡症的疗效。患者年龄在18岁或以上,诊断为嗜睡症。所有患者均曾接受VNS治疗癫痫或重度抑郁症。曾因抑郁症或癫痫而接受VNS治疗的无嗜睡症患者作为对照。从VNS发作前1周、植入后3个月和6个月开始,使用Epstein嗜睡量表(ESS)评估嗜睡,使用贝克抑郁量表-2(BDI-2)对所有受试者进行抑郁评估。我们收集了18例嗜睡症患者和18例对照组的资料。与基线值相比,嗜睡症组的平均ESS评分在3个月( $P<0.05$ )和6个月( $P<0.01$ )时均有显著改善,而对照组无明显改善。多元回归分析显示,VNS对ESS的影响独立于BDI-2测量的抑郁改善无关。结论:本研究对嗜睡症患者进行研究,通过爱泼斯坦嗜睡量表发现迷走神经刺激可改善日间嗜睡情况。

(何宇译)

Winter Y, et al. Vagus Nerve Stimulation for the Treatment of Narcolepsy[J]. Brain Stimul. 2024, 17(1):83-88.

中文翻译由WHO康复培训与研究合作中心(武汉)组织

本期由中国医科大学附属盛京医院 张志强教授主译编