

认知干预中任务难度对大脑血氧及功能网络的影响

杨睿¹ 刘磊² 周江杰¹ 谭佳¹ 王子洪¹

摘要 目的 探讨认知干预训练中任务难度因素对大脑血氧响应和功能网络的影响。方法 采用经典 Stroop 范式,任务设置为中性刺激(Neutral)与冲突刺激(Incongruent),通过多模态数据融合方法同步采集行为学指标(准确率、反应时间)和大脑皮层血氧(blood oxygen, HbO)信号。将左侧额叶(L_F)作为目标区域进行功能连接分析,比较集群系数(cluster coefficient, CP)、平均最短路径长度(average shortest path length, LP)、局部效率(local efficiency, Eloc)、全局效率(global efficiency, Eg)和小世界属性(small-world property, Sigma),分析两组任务中大脑网络效率差异。结果 与 Incongruent 组相比, Neutral 组具有较低的反应时间($P < 0.05$)和较高的准确率($P < 0.001$),且两个行为学指标间存在显著负相关关系($r = -0.683, P < 0.001$)。任务难度从 Neutral 任务增加至 Incongruent 任务时,大脑皮层 HbO 浓度显著增加($P = 0.001$),L_F 与右侧额叶 R_F 的连接减弱,与右侧顶叶 R_P 的连接加强。此外 CP($P < 0.001$)、LP ($P < 0.05$)、Eg($P < 0.001$)和 Sigma($P < 0.001$)等大脑网络评价指标均显著变化。结论 额叶是认知干预训练过程中的重点监测区域;任务难度变化改变跨半球间的信息流向;增加任务难度促使大脑功能网络效率提升。本研究促使调节任务难度水平精准调控大脑功能重塑成为可能,最终获得最佳的认知干预训练效果。

关键词 认知干预;任务难度;血氧响应;大脑网络连接

DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2026.04.002.

中图分类号 R318.04 **文献标志码** A **文章编号** 1002-3208(2026)04-0340-08

本文著录格式 杨睿,刘磊,周江杰,等. 认知干预中任务难度对大脑血氧及功能网络的影响[J]. 北京生物医学工程, 2026, 45(4): 340-347, 370. YANG Rui, LIU Lei, ZHOU Jiangjie, et al. The effect of task difficulty on cerebral blood oxygen and functional network in cognitive intervention [J]. Beijing Biomedical Engineering, 2026, 45(4): 340-347, 370.

The effect of task difficulty on cerebral blood oxygen and functional network in cognitive intervention

YANG Rui¹, LIU Lei², ZHOU Jiangjie¹, TAN Jia¹, WANG Zihong¹

¹ Medical Engineering Department, The First Hospital Affiliated of Army Medical University, Chongqing 400038;

² Department of Oncology, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016

Corresponding author: WANG Zihong (E-mail: wangzihong@tmmu.edu.cn)

【Abstract】 Objective To investigate the effect of task difficulty on cerebral blood oxygen response and functional network in cognitive intervention training. **Methods** The classic Stroop paradigm was adopted, with task settings divided into neutral stimuli (Neutral) and conflicting stimuli (Incongruent). Through multimodal data fusion methods, behavioral indicators (accuracy rate, reaction time) and cortical blood oxygen (HbO) signals were synchronously collected. The left frontal lobe (L_F) was selected as the target region for functional connectivity analysis. The cluster coefficient (CP), average shortest path length (LP), local

efficiency (Eloc), global efficiency (Eg), and small-world property (Sigma) were compared to analyze the differences in brain network efficiency between the two task groups. **Results** Compared with the abnormal group, the Neutral group had lower reaction time ($P < 0.05$) and higher accuracy rate ($P < 0.001$), and there was a significant negative correlation between the two behavioral indicators ($r = -0.683$, $P < 0.001$). When the task difficulty increased from Neutral task to variable task, the HbO concentration in cerebral cortex increased significantly ($P = 0.001$), the connection between L_F and right frontal lobe (R_F) weakened, and the connection between L_F and right parietal lobe (R_P) strengthened. In addition, CP ($P < 0.001$), LP ($P < 0.05$), Eg ($P < 0.001$) and Sigma ($P < 0.001$) were significantly changed. **Conclusions** The frontal lobe is a key monitoring area during cognitive intervention training; changes in task difficulty alter the information flow between hemispheres; increasing task difficulty promotes the efficiency of brain functional networks. This research makes it possible to precisely regulate the difficulty level of the task to accurately control the brain's functional remodeling, ultimately achieving the best cognitive intervention training effect.

【Keywords】 cognitive intervention; task difficulty; blood oxygen response; brain network connectivity

0 引言

脑卒中是我国常见的脑血管疾病,在过去的30年里,中国脑卒中发病率呈现逐年上升和年轻化趋势^[1]。脑卒中后认知障碍(post-stroke cognitive impairment, PSCI)^[2]被认为是脑卒中后最常见的并发症,发病率高达88.1%,表现为高级皮层功能紊乱,主要涉及记忆、注意、执行等方面障碍^[3]。PSCI如不及时有效干预,不仅增加患者发展为痴呆的风险,还对其生活质量、社会关系造成不同程度的影响。因此脑卒中后认知干预的康复治疗对患者及家庭具有极其重要的意义^[4]。

近年来,随着大脑成像技术的快速发展,极大地推动了认知康复领域的探索进程。功能性近红外光谱成像技术^[5-6](functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是近30年内发展的一项新兴技术,该技术主要利用血液中含氧血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO)和脱氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, Hb)对600~900 nm近红外光的较好吸收特性来检测脑皮质各区域的血流动力学响应。因其具有较好的空间分辨率、抗运动伪影能

力、便携性好等优势广泛应用于高级认知^[7-9]、心理学^[10]和脑功能疾病诊断与康复^[11]等多个领域的研究。

最新研究显示,认知干预通过形成新的神经传导通路,达到改善PSCI患者认知功能的作用。张雅芝等^[12]通过比较5种认知干预措施对PSCI患者认知能力的改善作用,发现注意力、记忆力等认知域提升的训练最有效。Stroop任务作为一种常用认知训练测试,用来衡量抑制认知干扰能力的方法,主要包括注意力、处理速度和工作记忆等认知能力。一项fNIRS研究^[13]表明,与健康个体相比,抑郁症个体在Stroop测试中表现出较长的反应时间和不同的额叶皮层激活模式。Chen等^[14]利用Stroop测试仅发现左侧额叶在处理冲突任务中起主导作用,但大脑内部的信息流和网络连接效率等信息未得到相应分析,同时,任务难度因素与大脑网络连接模式之间的联系未明确。对此,本研究基于中国医学科学院中国协和医科大学生物医学工程研究所提供的公共数据集^[15],分析Stroop测试过程中的行为学和神经影像数据,利用神经网络分析工具,探讨不同脑区之间的连接强度和功能协同性,深入分析认知训练负荷水平与大脑网络传输效率之间的关系,以为PSCI患者的认知干预训练模式优化提供一定参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源介绍

该公共数据集由21名健康志愿者(9名女性和

基金项目:重庆市科卫联合医学科研面上项目(2022MSXM060)、重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2019jscx-msxmX0183)资助

作者单位:1 陆军军医大学第一附属医院医学工程科(重庆 400038)

2 重庆医科大学附属第一医院肿瘤科(重庆 400016)

通信作者:王子洪,硕士,高级工程师。E-mail: wangzihong@tmmu.edu.cn

12名男性,年龄 23.0 ± 2.3 岁)在完成 Stroop 任务时的行为学和影像学数据组成,所有参与者均为右利手,色觉均正常,实验前签署知情同意书并通过浙江大学医学院附属第一医院临床研究伦理委员会批准(IIT20210036C-R1)。

1.1.2 范式

采用经典言语 Stroop 颜色词任务(图1),训练任务为中性刺激(Neutral)和冲突刺激(Incongruent),各重复两组,每组重复16次,并且“匹配”和“不匹配”数量一致,随机出现。

1.1.3 数据采集

设备为研究人员自主研发的光纤式 fNIRS 检测系统。双波长为 785 nm 和 850 nm,图 2A 展示了 4 个近红外光源发射探头(红色圆圈)和其周围 16 个接收探头(绿色方块),组成的采集通道分布在大脑额叶和顶叶区域,间隔 3 cm,信号采样率为 100 Hz。图 2B 为探头在 10-20 坐标系统中的具体位置,将 20 个采集通道进行统一编号。根据 Broadmann 分区,划分感兴趣区域(region of interest, ROI)^[16]。ROI 包括:左侧额叶皮质(L_F,通道 1,2,3,6,10)、右侧额叶皮质(R_F,通道 11,12,13,16,20)、左侧顶叶皮质(L_P,通道 4,5,7,8,9)和右侧顶叶皮质(R_P,通道 14,15,17,18,19)。

1.2 数据处理

1.2.1 行为学数据

利用 SPSS 2024 进行统计分析,所有数据均由均数 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。同时,采用 Pearson 相关系数检验分析两种任务难度下行为学指标之间的相关性,显著水平设为 $P < 0.05$ 。

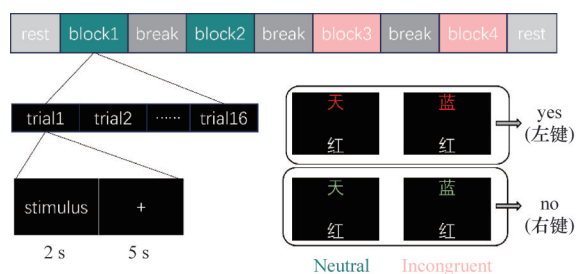
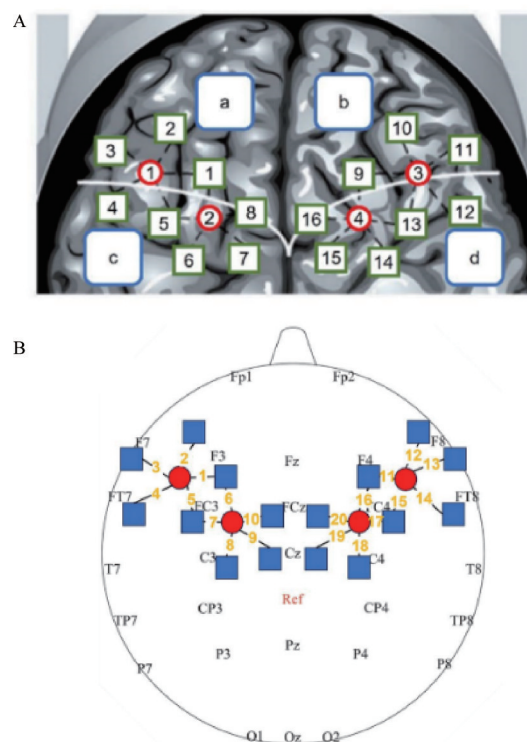


图1 范式

Figure 1 Experimental paradigm

1.2.2 fNIRS数据预处理

首先对原始光强信号数据进行质量评估,利用通道特异性变异系数(coefficient of variation, CV)评



A 为 fNIRS 探头设备和脑区分布;B 为 10-20 体系的探头坐标布置

图2 fNIRS 采集通道设置

Figure 2 fNIRS collection channel Settings

价通道质量,即通道时间序列数据的标准差与均值的比值。当 CV 值大于 15% 时,剔除该通道。运用 Homer2 工具箱对数据进一步处理,依次进行光信号转换、伪迹矫正、带通滤波、血氧信号转换、组平均等处理步骤。因含氧血红蛋白浓度是 fNIRS 信号中反映区域脑血流变化最敏感的标志物,因此本研究主要分析 HbO 信号。

1.2.3 大脑网络分析

大脑功能连接(functional connectivity, FC)是指大脑皮质各区域之间神经活动在时间上的关联性 or 依赖关系,用于衡量大脑功能耦合程度的方法。本研究选用 Pearson 相关系数对 HbO 时序信号进行相关分析,相关系数 r 值范围为 $[0, 1]$,绝对值越大代表连接越紧密。为增加数据的分析效率,利用 Fisher-Z 变换得到 Z 值矩阵。

(1) 基于种子点的网络分析。

选取几个通道或某一个脑区为种子点,然后计算该种子点与其他所有脑区(通道)之间的血氧信号相关系数,得到脑区间的功能连接强度。相关研究指出,左侧额叶皮质(L_F)是 Stroop 测试中的关键

区域,因此本研究将L_F区域作为种子区。

(2) 基于图论的网络分析。

将具有显著性的FC网络视为复杂网络模型的基础,计算网络拓扑特征以揭示训练对被试大脑网络结构的影响。选用集群系数(CP)、平均最短路径长度(LP)、局部效率(Eloc)、全局效率(Eg)和小世界属性(Sigma)表征大脑网络组织特征。CP由网络各个节点的聚类系数 C_i 的平均值计算得到,值越大,代表节点之间越紧密。

路径长度指网络中节点 i 和节点 j 最短路径上的边数。而网络中节点的平均长度是任意两点间路径长度的平均值,反映了网络中节点间的分离程度,可由式(1)得到:

$$LP = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{1 \leq i, j \leq N} s_{ij}, \forall i, j, i \neq j \quad (1)$$

局部效率度量了网络的局部信息传输能力,式(2)为任意节点 i 的局部效率,其中 G_i 指节点 i 的邻居所构成的子图, $l_{j,k}$ 表示节点 j, k 之间的最短路径长度。网络的局部效率是所有节点局部效率的平均值。局部效率越高,信息传输过程中资源和能量的消耗就越低。

$$E(i) = \frac{1}{N_{G_i}(N_{G_i}-1)} \sum_{j \neq k \in G_i} \frac{1}{l_{j,k}} \quad (2)$$

全局效率描述了网络对于信息并行处理的能力,定义为节点间最短路径长度的倒数调和平均值,反映了网络节点间信息传递的速率。全局效率越高,说明节点间最短路径越短,信息传输和交互效率越高。

小世界属性(σ)是由标准化的集群系数(γ)和标准化的最短路径长度(λ)的比值确定,当 $\sigma > 1$ 时,网络具有“小世界”属性,且 σ 越大表示网络的“小世界”属性越强。

1.3 统计分析

使用SPSS 2024软件进行统计分析,选用配对 t 检验分析方法,所有显著性结果均符合标准: $P < 0.05$ 表示数据差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 行为学结果

Neutral任务的正确率为 0.935 ± 0.051 ,显著高于Incongruent任务(0.897 ± 0.792),显著性为($t =$

$2.737, P < 0.001$),如图3A所示;Neutral任务的反应时间为 0.965 ± 0.984 ,低于Incongruent任务(1.024 ± 0.120),差异同样具有显著性($t = -4.282, P < 0.05$),如图3B所示。此外,统计分析发现,两种行为学指标的相关关系与任务难度有关。在Neutral任务中,正确率与反应时间具有显著的负相关关系($r = -0.683, P < 0.001$)(图3C),但在Incongruent任务中,两个行为学指标之间不具有相关关系($r = -0.426, P > 0.05$)(图3D)。

2.2 血氧特征分析

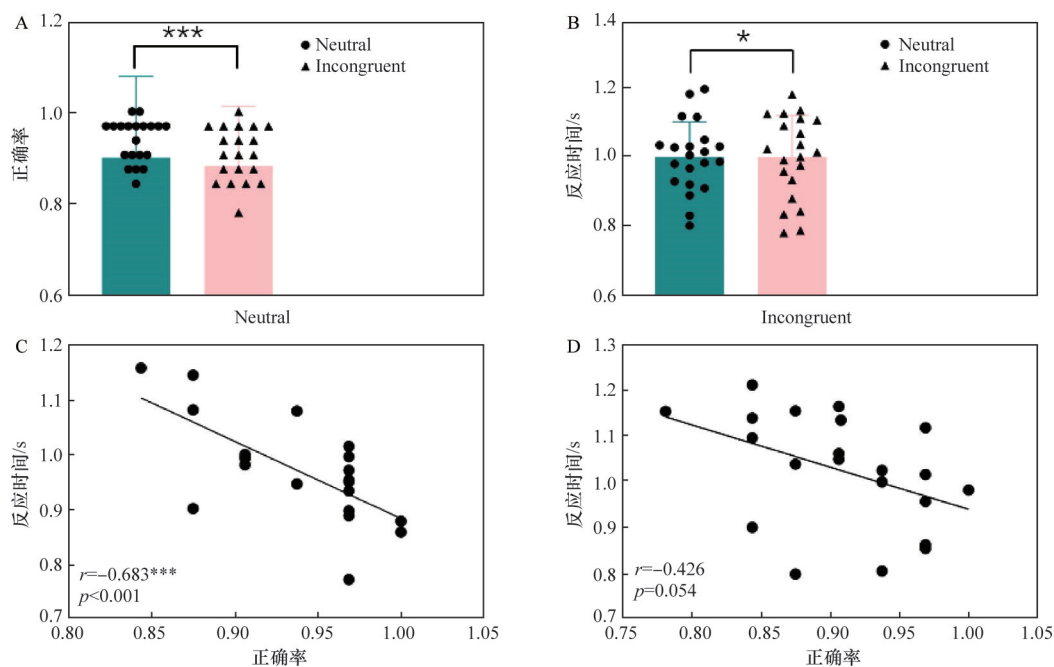
将所有被试者的HbO浓度进行block平均,对比Neutral任务和Incongruent任务中的平均全脑HbO浓度和各ROI血氧浓度差异,所有数据均符合正态分布,统计结果如表2所示,随着Stroop任务难度的提升,大脑全脑和各个ROI区域的血氧响应均得到不同程度的增加。在不同条件刺激下,全脑HbO浓度随着任务持续进行而发生相反的变化趋势(图4A),在任务前半段过程中,任务诱发的血氧响应水平相对一致,而任务后半段时HbO浓度走势完全相反。

展示一被试在完成两种任务时的大脑各个脑区HbO浓度变化情况(图4B),统计结果发现,任务难度增加促使全脑血氧浓度出现不同程度的增加。在Neutral任务中,L_P区域是全脑血氧响应最突出的区域,但在Incongruent任务中,R_F则成为血氧消耗最多的区域,表明大脑在处理冲突任务时,左侧额叶向右侧额叶的信息流发挥重要作用。

2.3 各个脑区血氧激活程度相关性分析

利用稀疏度(S)进一步处理 Z 值矩阵。图5为 $S = 0.2$ 时,大脑在静息态和两种刺激条件时的 Z -map。休息状态时各ROI之间的相互联系较弱且分散,但在测试时部分通道连接加强,跨脑区间联系减弱,冲突任务的复杂性增加,体现在额叶区域内部联系加强。

左侧额叶是冲突任务的主导脑区,计算该种子区域与其他ROI之间的相关性。如图6所示,研究发现右侧的额叶和顶叶与左侧额叶之间相关性较高,而与同侧脑区的相关联系则相对较低,此现象再次印证Stroop任务促使大脑左右半球之间的信息交流。



A 为正确率;B 为反应时间;C、D 为正确率和反应时间的相关性(C:Neutral 任务,D:Incongruent 任务)

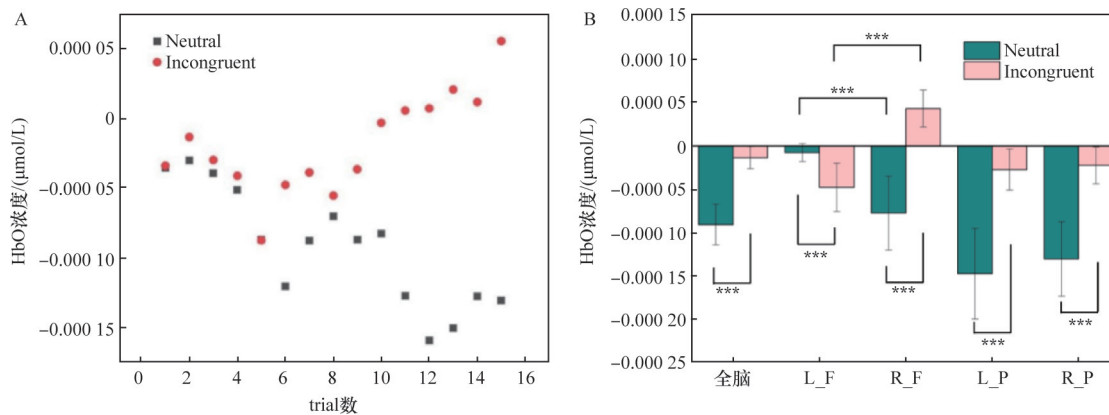
图 3 行为学结果

Figure 3 Behavioral outcome

表 2 血氧特征对比

Table 2 Comparison of blood oxygen characteristics

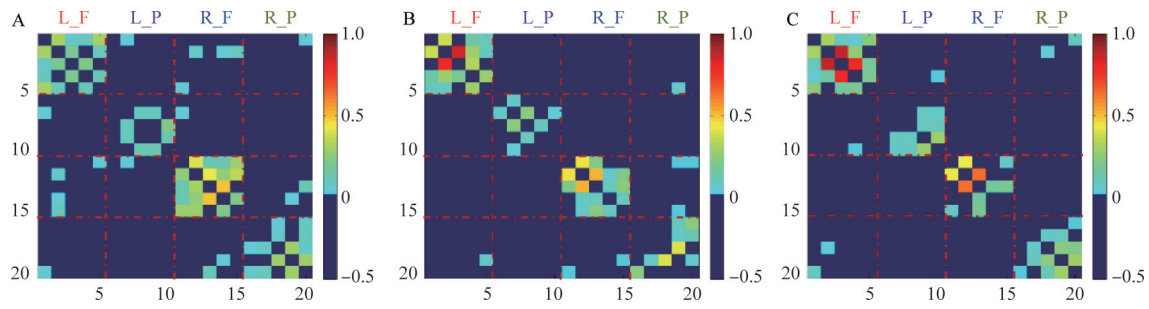
参数	HbO 浓度/($\mu\text{mol/L}$)				
	全脑	L_F	R_F	L_P	R_P
Neutral	$-9.124 \times 10^{-5} \pm 2.077 \times 10^{-5}$	$-3.928 \times 10^{-5} \pm 4.435 \times 10^{-5}$	$-9.572 \times 10^{-5} \pm 3.929 \times 10^{-5}$	$-1.841 \times 10^{-4} \pm 2.217 \times 10^{-5}$	$-4.593 \times 10^{-5} \pm 1.561 \times 10^{-5}$
Incongruent	$-1.984 \times 10^{-5} \pm 0.470 \times 10^{-5}$	$6.738 \times 10^{-5} \pm 0.998 \times 10^{-5}$	$-1.910 \times 10^{-5} \pm 0.128 \times 10^{-5}$	$-1.522 \times 10^{-4} \pm 1.356 \times 10^{-5}$	$2.452 \times 10^{-5} \pm 0.732 \times 10^{-5}$
t	-4.316	-3.881	-5.579	-1.596	-2.818
P	<0.001	<0.001	<0.001	0.131	0.013



A 为全脑浓度随着试验次数的走势图;B 为一被试各个 ROI 的 HbO 浓度图

图 4 两种任务的 HbO 浓度对比图

Figure 4 Comparison chart of HbO concentrations for the two tasks



A为rest状态;B为Neutral任务;C为Incongruent任务

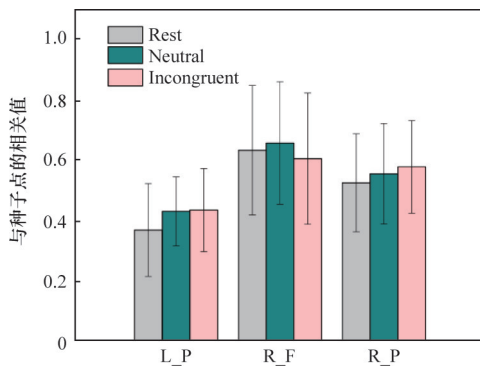
图5 $S=0.2$ 时的Z-map图Figure 5 Z-map for $S=0.2$ 

图6 各个脑区与种子点(L_F)之间的相关性

Figure 6 Correlation between brain regions and the seed point (L_F)

2.4 脑网络分析

由于稀疏度(S)小于50%时,才能保证网络的稀疏性,否则即为随机网络。因此本研究选用稀疏度范围在10%~50%之间,并以1%间隔取样,每个指标(CP、LP、Eloc、Eg、Sigma)均得到41个值,最终特征值由 $\bar{x} \pm s$ 呈现。统计结果如表3,Incongruent任务诱发较短的最小路径长度、全局效率和小世界属性,促使大脑产生更高效率的网络效率。

3 讨论

3.1 额叶是认知干预过程中的重点监测区域

本研究结果显示,与Neutral任务组相比,

Incongruent任务组的额叶血氧响应显著增加,印证L_F和R_F是PSCI患者认知干预及恢复的重要位置。前额叶与高级认知功能,如决策、工作记忆以及自上而下的注意力控制密切相关,并具有对潜在相互竞争的内外向任务的判断能力^[17-18]。此外,从表2可以看到,顶叶也出现一定程度的血氧激活,因此,本研究证实,在使用大脑成像技术监测大脑应对于干预训练任务时,额叶和顶叶是其重点关注的区域。这与Fan等^[19]的发现一致,轻度认知障碍患者在执行Stroop任务时,前额叶和顶叶区域的代偿性激活在部分行为水平上表现出对认知障碍的有效代偿。

3.2 任务难度变化改变跨半球间的信息流向

本研究结果显示,与休息组比较,任务组的L_F和R_F内部连接强度更加紧密。同时,图6可以发现,与Neutral任务相比,Incongruent任务中L_F与R_F的连接强度降低,与R_P的连接反而增强,这表明任务难度的增加促使额叶内部的连接转向跨半球顶叶的连接,证实认知任务学习能够促进大脑皮层发生迁移效应。相关研究^[20]表明,基于可塑性的听觉处理速度训练,可能促进默认网络与其他参与内部信息维持与处理、注意力的静息网络之间功能连接的变化。因此,从神经网络层面分析,跨脑区的连接性发生改变,反映了大脑内部适应和重组过

表3 大脑网络特征对比

Table 3 Comparison of brain network features

参数	CP	LP	Eloc	Eg	Sigma
Neutral	0.623 ± 0.098	2.802 ± 1.536	0.693 ± 0.125	0.457 ± 0.172	1.506 ± 0.229
Incongruent	0.603 ± 0.100	2.704 ± 1.581	0.691 ± 0.133	0.474 ± 0.175	1.587 ± 0.217
t	12.941	5.193	1.237	-9.366	-6.471
P	<0.001	<0.001	0.223	<0.001	<0.001

程,即大脑功能可塑性发生变化^[21-22]。此外亦发现,L_F与顶叶的连接性强弱与任务难度梯度存在正相关关系,尤其是与连接强度较高的R_P。因此,高难度任务促使大脑皮质发生跨半球间的相关连接,从而诱发大脑功能重组,提升认知处理能力。

3.3 任务难度增加促使大脑网络效率提升

为明确任务难度因素对大脑网络的影响,本研究选用多个图论参数进行评估(表3),结果显示Incongruent任务具有较高的全局效率和小世界属性,图7展示了评价网络传输效率的小世界属性在各个稀疏度下的对比图,结果表明较高难度的Stroop任务能够提升神经网络信息传递效率和更强的模块化处理能力。Cheng^[23]整理大量认知训练研究发现针对执行功能的训练可提高前额叶网络的效率,从而为面对认知衰退时的大脑功能提供支持。皮质结构层面,完成认知训练的健康大脑在结构成像中表现为灰质和皮质体积增加^[24]。大脑功能层面,认知干预通过诱导皮层下区域的激活增加,形成新的神经传导通路,尤其是默认模式网络内部的功能连接,诱导海马体的可塑性,达到改善患者认知功能的目的^[25]。

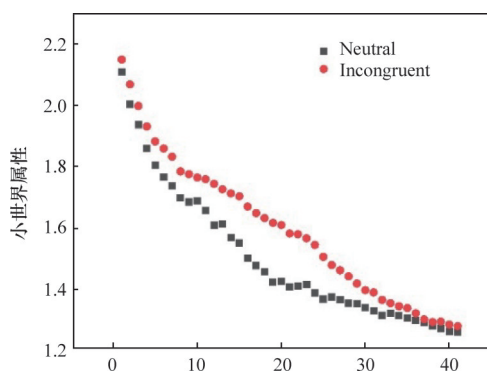


图7 小世界属性对比图

Figure 7 Small-world attribute comparison diagram

综上所述,本研究利用难度差异明显的两组Stroop任务,采集大脑皮层血氧浓度,分析发现额叶是认知干预训练中的重要脑区,任务难度提升改变跨半球间信息流向,增加内部连接,提升大脑网络效率。认知康复不仅依赖于个体区域的改变,更重要的是,需要重构大脑各区域之间的协调。越来越多的研究^[26]表明,默认模式网络和背侧注意力网络是认知训练的目标区域,两者之间的功能连接增加

证明了认知训练对大脑网络功能重组的积极作用。本研究结果表明,增加任务难度能够促进左侧额叶与右侧顶叶之间的连接强度,重建神经可塑性,最终提升大脑网络传输效率。

本研究仍存在一定局限性:(1)被试者未涉及PSCI患者,后期需要纳入,以对比Stroop任务对两类人群的干预影响;(2)未对比多难度等级的Stroop任务,无法确定诱发神经可塑性发生的最佳难度参数;(3)仅探究认知任务对大脑网络的影响,未比较认知与运动结合的双任务干预对大脑认知功能康复的不同。因此未来研究可进一步增加被试类型,设置更多难度梯度,引入双任务训练模型,以获得认知干预的最佳效果。

4 结论

本研究使用种子点、图论等网络分析工具对两组Stroop任务的fNIRS数据进行分析,通过比较由难度差异引发的大脑激活状态、功能网络连接和信息传输效率,探讨认知干预中训练难度因素对大脑活动的影响。本研究结果显示,额叶是认知干预过程中的重点监测区域;任务难度变化改变跨半球间的信息流向;任务难度增加促使大脑网络效率提升。本研究结果表明设置合理的训练难度对PSCI患者认知干预的康复效果具有重要意义,未来将扩充研究样本,设置多个难度梯度和自适应调节模式的训练任务,以期获得最佳的认知干预效果。

参考文献

- [1] 吴永亚,边红.脑卒中后认知功能障碍研究进展[J].神经病学与神经康复学杂志,2020,16(1):34-40.
Wu YY, Bian H. Progress in post-stroke cognitive impairment[J]. Journal of Neurology and Neurorehabilitation, 2020, 16(1): 34-40.
- [2] 朱金洲,皮强峰,梅炳银,等.老年脑卒中后认知障碍患者两侧海马和全脑静息状态功能连接模式分析[J].心脑血管病防治,2025,25(3):52-55.
- [3] 韩凯月,李江毅,陈宝迪,等.移动智能认知训练对社区卒中后认知功能障碍者康复效果的影响[J].中国康复医学杂志,2024,39(11):1651-1655.
Han KY, Li JY, Chen BD, et al. Effects of mobile intelligent cognitive training on the rehabilitation in patients with post-stroke cognitive impairment in the community [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2024, 39(11): 1651-1655.

- [4] 冉龙飞, 郭军辉, 栾玲芹, 等. 经颅直流电刺激联合认知-运动双任务训练对脑卒中后认知障碍患者记忆和执行功能的影响[J]. 天津医药, 2025, 53(6): 624-628.
- Ran LF, Guo JH, Luan LQ, et al. Effects of transcranial direct current stimulation combined with cognitive-motor dual task training on memory and executive function in patients with post-stroke cognitive impairment[J]. Tianjin Medical Journal, 2025, 53(6): 624-628.
- [5] 田一竹, 张晔, 覃天, 等. 基于近红外脑成像的认知评估脑连接特征研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2025, 44(1): 77-88.
- Tian YZ, Zhang Y, Qin T, et al. Cognitive assessment of brain connectivity features based on fNIRS [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2025, 44(1): 77-88.
- [6] Xiang MQ, Lin L, Song YT, et al. Reduced left dorsolateral prefrontal activation in problematic smartphone users during the Stroop task: an fNIRS study[J]. Frontiers in Psychiatry, 2023, 13: 1097375.
- [7] You YW, Liu JX, Li XT, et al. Relationship between accelerometer-measured sleep duration and Stroop performance: a functional near-infrared spectroscopy study among young adults[J]. PeerJ, 2024, 12: e17057.
- [8] Períñez JA, Lubrini G, García-Gutiérrez A, et al. Construct validity of the stroop color-word test: influence of speed of visual search, verbal fluency, working memory, cognitive flexibility, and conflict monitoring [J]. Archives of Clinical Neuropsychology, 2021, 36(1): 99-111.
- [9] 熊桃, 李阳, 崔丽君, 等. 功能性近红外光谱应用于脑认知领域的可视化分析[J]. 中国康复, 2024, 39(1): 46-51.
- Xiong T, Li Y, Cui LJ, et al. Visual analysis of brain cognition by functional near-infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2024, 39(1): 46-51.
- [10] Kikuchi S, Tsutsui N, Nishizawa Y, et al. Habituation of brain activity with repetition in color and picture-word stroop tests[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2024, 52(8): 2088-2100.
- [11] Park JH. Is virtual reality-based cognitive training in parallel with functional near-infrared spectroscopy-derived neurofeedback beneficial to improve cognitive function in older adults with mild cognitive impairment?[J]. Disability and Rehabilitation, 2025, 47(7): 1717-1724.
- [12] 张雅芝, 厉春林, 胡娜, 等. 认知干预对脑卒中后轻度认知障碍患者认知功能影响的网状 Meta 分析[J]. 中国循证医学杂志, 2023, 23(10): 1148-1155.
- Zhang YZ, Li CL, Hu N, et al. Efficacy of cognitive intervention on cognitive function in patients with mild cognitive impairment after stroke: a network meta-analysis [J]. Chinese Journal of Evidence-Based Medicine, 2023, 23(10): 1148-1155.
- [13] Verma R, Ganesh R, Narnoli S, et al. Evaluating prefrontal changes in depression using functional near-infrared spectroscopy utilizing Stroop test: a comparison with healthy controls [J]. Indian Journal of Psychiatry, 2024, 66(11): 1014-1023.
- [14] Chen Z, Ji X, Li T, et al. Lateralization difference in functional activity during Stroop tasks: a functional near-infrared spectroscopy and EEG simultaneous study [J]. Frontiers in Psychiatry, 2023, 14: 1221381.
- [15] Chen Z, Gao C, Li T, et al. Open access dataset integrating EEG and fNIRS during Stroop tasks[J]. Scientific Data, 2023, 10(1): 618.
- [16] Urquhart EL, Wanniarachchi HI, Wang X, et al. Mapping cortical network effects of fatigue during a handgrip task by functional near-infrared spectroscopy in physically active and inactive subjects[J]. Neurophotonics, 2019, 6(4): 045011.
- [17] 金涛, 李浩正, 鲍春蓉, 等. 脑卒中后认知功能障碍患者的功能性近红外脑网络特征分析[J]. 康复学报, 2024, 34(4): 341-348.
- Jin T, Li HZ, Bao CR, et al. Functional near-infrared brain network characteristics analysis in patients with cognitive impairment after stroke[J]. Rehabilitation Medicine, 2024, 34(4): 341-348.
- [18] Marek S, Dosenbach NUF. The frontoparietal network: function, electrophysiology, and importance of individual precision mapping [J]. Dialogues in Clinical Neuroscience, 2018, 20(2): 133-140.
- [19] Fan C, Li H, Chen K, et al. Brain compensatory activation during Stroop task in patients with mild cognitive impairment: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. Frontiers in Aging Neuroscience, 2025, 17: 1470747.
- [20] Lee HK, Basak C, Grant SJ, et al. The effects of computerized cognitive training in older adults' cognitive performance and biomarkers of structural brain aging[J]. Journals of Gerontology Series B-Psychological Sciences and Social Sciences, 2024, 79(7): gbae075.
- [21] 李锡君, 余成新, 赵长江, 等. fMRI 在脑卒中康复期脑网络重塑与脑可塑性中的研究进展[J]. 磁共振成像, 2025, 16(2): 135-141.
- Li XJ, Yu CX, Zhao CJ, et al. Research progress of fMRI in brain plasticity during the rehabilitation period of hemiplegia after stroke [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2025, 16(2): 135-141.
- [22] Qi Y, Xu Y, Wang H, et al. Network reorganization for neurophysiological and behavioral recovery following stroke[J]. Central Nervous System Agents in Medicinal Chemistry, 2024, 24(2): 117-128.