

使用功能性近红外光谱技术 (fNIRS) 评估健康年轻成年人在正念 音乐疗法的不同阶段的大脑功能连接

赵达燊^{1*}, 叶志刚², 叶智斌², 陈浩云⁵, 尹蕾惠⁴, 李文涛⁴, 郭志谦², 黄颖思³

¹ 中国香港盲人辅导会 香港

² 中国香港东华学院医疗及健康科学 (职业治疗) 学院 香港

³ 中国香港理工大学中文及双语学系 香港

⁴ 中国香港理工大学生物医学工程 香港

⁵ 英国布里斯托西英格兰大学健康与临床研究中心 英国

【摘要】背景 正念干预 (MBIs) 是改善情绪调节的重要身心疗法, 但其与音乐疗法结合的神经机制仍缺乏实证支持。现有研究多依赖主观量表, 而功能近红外光谱技术 (fNIRS) 作为一种便携式神经成像工具, 可实时监测前额叶皮层活动, 为探索正念音乐疗法 (MBMT) 的脑机制提供了新视角。**方法** 本研究采用方便取样招募 9 名健康年轻成年人受试者内实验设计, 研究纳入 9 名健康年轻人 (年龄 21.78 ± 3.74 岁; 教育年限 16.56 ± 2.40 年), 在单次 45 分正念音乐疗法 (MBMT) 干预中分为静息、启发、增强和正念四个阶段。使用 15 通道 fNIRS 设备 (NIRSIT LITE) 记录前额叶氧合血红蛋白 (HbO) 浓度, 并通过皮尔逊相关系数 (r) 和线性回归模型 ($p < 0.05$) 分析信道间功能连接。实验阶段包括正念呼吸、音乐引导反思及动作练习, 全程同步标记神经活动数据。数据分析本研究使用针对韩国 OBELAB Inc. NIRSIT LITE 专题设计的软件作数据收集。及后使用适用于 Windows 的 SPSS ver. 25.0 软件 (SPSS Inc., 美国伊利诺伊州芝加哥) 对数据进行统计分析, 从中得出平均值、标准偏差和相关性。结果显示这项研究的结果表明, 正念音乐疗法能够在大脑神经活动中引起特定的变化。在“正念”阶段展示出一组选择性的神经相关性, 特别是在背外侧前额叶皮层和前额叶皮层之间, 以及左侧背外侧前额叶皮层和左侧腹外侧前额叶皮层之间。在比较前额叶功能连接、各干预阶段差异及前额叶氧合血红蛋白 (HbO) 浓度等等参数。正念音乐疗法 (MBMT) 显著调节 1.) 前额叶功能连接: 正念阶段: 背外侧前额叶皮层 (DLPFC) 与前额叶皮层 (PFC) 间 ($r=0.884$)、左侧 DLPFC 与腹外侧前额叶皮层 (VLPFC) 间 ($r=0.809$) 呈现强相关 ($r > 0.8$), 表明选择性神经回路激活。2.) 干预阶段差异: 神经同步性从静息阶段 (平均 $r=0.507$) 逐步升高至增强阶段峰值 ($r=0.702$, 77.14% 通道对显著相关), 正念阶段略降 ($r=0.576$, 56.19% 显著相关)。零交叉率进一步支持动态变化: 静息阶段信号最不稳定 (0.0061Hz), 启发阶段最稳定 (0.0024Hz)。3.) 前额叶氧合血红蛋白 HbO 水平: 正念阶段前额叶氧合血红蛋白 HbO 浓度 (0.000228) 低于启发阶段 (0.000240), 但功能连接模式提示认知资源的高效整合。结论 本研究通过 fNIRS 揭示了正念音乐疗法 (MBMT) 各阶段对前额叶功能连接的差异化调控, 为理解正念干预的神经机制提供了直接证据。正念阶段的选择性连接增强可能反映注意力优化与情绪加工效率提升。未来需结合多模态成像技术 (如 fMRI) 并扩大样本量, 以验证长期干预效果及个体化应用潜力, 推动基于神经机制及脑接口口的个性化心理健康干预策略。这为正念干预在情绪调节中的作用提供了神经生理学上的证据。未来的研究可以进一步探讨正念音乐疗法对其他认知和情绪功能的影响, 以及其在心理健康干预中的潜在应用。

【关键词】 功能性近红外光谱技术; 正念干预; 正念音乐疗法; 前额叶皮质; 大脑连接

【收稿日期】 2025 年 2 月 16 日

【出刊日期】 2025 年 3 月 27 日

【DOI】 10.12208/j.ijcr.20250116

The effects of mindfulness-based music therapy (MBMT) on prefrontal functional connectivity in healthy young adults using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS)

Chiu ATS^{1*}, Yip CCK², Yip BCB², Chan SHW⁵, Yin CQH⁴, Li JWT⁴, Kuo MCC², Wong WWS³

*通讯作者: 赵达燊

¹Occupational Therapist, Residential Services, The Hong Kong Society for the Blind, Hong Kong

²School of Medical and Health Sciences (Occupational Therapy), Tung Wah College, Hong Kong

³Department of Chinese and Bilingual Studies, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

⁴Biomedical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

⁵Centre for Health and Clinical Research, University of the West of England, Bristol, UK

【Abstract】 Background Mindfulness-based interventions (MBIs) are well-established mind-body therapies for improving emotional regulation; however, the neurobiological mechanisms underlying their integration with music therapy remain underexplored. Existing studies predominantly rely on subjective scales, whereas functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), a portable neuroimaging tool, enables real-time monitoring of prefrontal cortical activity, offering novel insights into the neural substrates of mindfulness-based music therapy (MBMT). Methods Nine healthy young adults (age: 21.78 ± 3.74 years; education: 16.56 ± 2.40 years) underwent a single-session 45-minute MBMT protocol divided into four phases: resting, inspiration, enhancement, and mindfulness. A 15-channel fNIRS system (NIRSIT LITE) was employed to record prefrontal oxygenated hemoglobin (HbO) concentrations. Functional connectivity between channels was analyzed using Pearson correlation coefficients (r) and linear regression models ($p < 0.05$). The experimental protocol included mindful breathing, music-guided reflection, and movement exercises, with synchronized neural activity markers throughout the session. Data Analysis Results demonstrated that MBMT significantly modulated prefrontal functional connectivity: 1) Mindfulness Phase: Strong correlations ($r > 0.8$) were observed between the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and prefrontal cortex (PFC) ($r = 0.884$) and between the left DLPFC and ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC) ($r = 0.809$), indicative of selective neural circuit activation. 2) Phase-Dependent Dynamics: Neural synchrony progressively increased from resting (mean $r = 0.507$) to peak in the enhancement phase ($r = 0.702$; 77.14% of channel pairs significant), followed by a slight decline in mindfulness ($r = 0.576$; 56.19% significant). Zero-crossing rates further validated dynamic fluctuations, with resting phase signals showing the highest instability (0.0061 Hz) and inspiration phase the lowest (0.0024 Hz). 3) HbO Profiles: HbO concentrations during mindfulness (0.000228) were lower than in the inspiration phase (0.000240), yet enhanced functional connectivity patterns suggested efficient cognitive resource integration. Conclusion This study provides direct neurophysiological evidence that MBMT differentially regulates prefrontal functional connectivity across intervention phases. Selective connectivity strengthening during mindfulness may reflect optimized attentional control and enhanced emotional processing efficiency. Future research should integrate multimodal neuroimaging (e.g., fMRI) and expand sample sizes to validate long-term intervention efficacy and individual-specific applications, advancing personalized mental health strategies grounded in neural mechanisms.

【Keywords】 Functional near-infrared spectroscopy; Mindfulness intervention; Mindfulness-based music therapy; Prefrontal cortex; Brain connectivity

1 文献综述

1.1 什么是 Mindfulness-Based Music Therapy (MBMT)

“正念”这个思想最初是由佛陀在其教义中提出并强调的核心理念。后来，减压门诊的创办人卡巴-津 (Kabat-Zinn, 2003) [1] 将其定义为“一种通过将注意指向当下目标而产生的意识状态，不加评判地对待此时此刻所展开的各种经历或体验”。近年来，基于正念的干预措施 (MBIs) 在心理健康领域得到广泛应用。其中最具代表性的是 1979 年由 Jon Kabat-Zinn 提出的基于正念的减压训练 (MBSR) 和 Segal、Teasdale 及 Williams 基于 MBSR 发展的基于正念的认知疗法

(MBCT) (Zhang et al., 2021) [2]。这些正念干预方法旨在通过增强当下觉察和接纳的能力，提高个体的心理健康水平。它们已广泛应用于临床实践，并在临床研究中显示出良好的治疗效果。

音乐作为一种独特的艺术形式，能够有效激发个体内心情感体验，可以唤起人们积极向上的情绪，同时也为负面情感的宣泄提供渠道。越来越多的研究表明，将 MBIs 与音乐相结合，能够显著改善机体的睡眠结构，缓解焦虑抑郁等症状，提升睡眠质量 (Liu et al., 2019) [3]。布里顿 (Britton) 开发的正念音乐 (MBM) 干预包含四个环节 (Lesiuk, 2016) [4]。第一部分为正念聆听，要求参与者以开放接纳的态度专注于正念音乐，

管理外界干扰。第二部分为正念呼吸,通过引导注意力到鼻孔呼吸感受来培养正念。第三部分为身体扫描,将注意力集中于身体感受。第四部分为正念表达动作,练习将正念融入日常活动,如放慢动作节奏,觉察此时此刻的感受。综上所述,音乐疗法和正念干预相结合,通过音乐、呼吸、身体感知和动作表达等方式培养个体的正念能力。

正念练习 (MBP) 和音乐疗法是一种综合干预措施,有助于思想、身体、情绪和精神的和谐,并促进压力管理和健康 (Hwang, 2017) [5]。然而,正念音乐疗法 (MBMT) 的研究仍处于初级阶段,需要进一步探究其对改善健康成人情绪调节的影响,为临床实践提供依据。

1.2 什么是 fNIRS, 原理是什么

功能近红外光谱 (fNIRS) 是一种新型的基于神经血管耦合的非侵入性脑功能成像技术,可以实时检测大脑特定区域的氧供给变化。当大脑某一区域活跃时,该区域的氧消耗量会增加,促使血液流向该区域,因而氧合血红蛋白浓度上升,脱氧血红蛋白浓度下降 (Yang, 2021) [6]。氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白在近红外光照射下具有有吸收低、散射高的特性,可以反射特定的波长。它们之间也有不同的吸收特性,氧合血红蛋白吸收较低,而脱氧血红蛋白吸收较高 (Jöbsis, 1977) [7]。fNIRS 设备发射长在 650 在 650-950 纳米之间的近红外光照射头皮和头骨,并检测反射回的光。通过反射光的波长和强弱,研究人员可以分析出血液中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白浓度的变化,从而推断出大脑活动的变化 (Villringer & Dirnagl, 1995) [8]。

1.3 为什么选择 fNIRS 研究 MBMT

fNIRS 在研究 MBMT 对心理健康的影响方面具有独特优势。相比于传统功能成像技术,如脑电图 (EEG)、脑磁波仪 (MEG) 和功能磁共振成像 (fMRI), fNIRS 具有较好的便携性和佩戴舒适性,能够将实验室研究转化为更加贴近现实环境的临床和日常情境 (Irani et al., 2007) [9]。尽管 fNIRS 受近红外光散射的限制无法探测大脑皮层下的深层活动,包括情绪的边缘系统活动,但这正好符合 MBMT 研究主要关注大脑皮层功能的需求 (Hunt & Legge, 2015) [10]。MBMT 通常通过调节大脑皮层的功能活动来影响情绪和心理健康,因此 fNIRS 技术能够有效地捕捉其作用机制。

2 研究设计与程序

本研究采用方便取样招募 9 名健康年轻成年人受

试者内实验设计来调查在正念音乐疗法 MBMT 四个预定义阶段中前额叶氧合血红蛋白 (HbO) 的变化。所有受试者具备相同的纳入实验条件,作为自己的控制,以尽量减少受试者间的差异。

表 1 参与者统计信息

性别	年龄	教育程度 (年)
女	18	13
女	21	16
男	21	14
女	21	16
女	21	16
女	22	16
女	26	20
女	28	20
男	28	18

该研究共纳入 9 名参与者 (2 名男性和 7 名女性), 年龄在 18 至 28 岁之间 ($\bar{x}=21.78$; $Sd=3.74$)。参与者的受教育年限从 13 岁到 20 岁, ($\bar{x}=16.56$; $Sd=2.40$)。

纳入标准: 没有正念干预的经历。自愿练习以正念为基础的音乐疗法。有足够的粤语能力,以确保准确理解和参与干预材料。

排除标准包括: 有可能影响干预效果的精神疾病或认知障碍病史。不稳定疾病的临床证据,如影响脑血流的药物滥用、肺部疾病、代谢性疾病、未控制的高血压或认知缺陷。在研究前参加三个月以上的运动员水平的体能训练。

参与者没有获得任何补偿。资格是通过电话访谈确定的,符合条件的个人在参与之前被告知了研究的程序,并提供了书面知情同意。

2.1 实验的设计和程序

在实验开始前,参与者会了解实验性质和具体方案,签署知情同意书,提供基本的个人信息用于人口统计。每个参与者单独在实验场地进行测试。本实验共有静息、启发、增强、正念四个阶段。在实验正式开始之前,实验场地保持昏暗,参与者以自己放松的姿势坐在有头部支撑的躺椅上。研究助理为参与者佩戴 fNIRS 及 NIRSIT LITE 设备校正过程 (见图 1)。软件默认运行在连接模式下,用于设定串行埠并连接 BLE dongle 测量。所有参与者到经历下列设备调教以便获得相同的底线基准作参数 (见图 2) 实验正式开始,共行 43 分 40 秒。

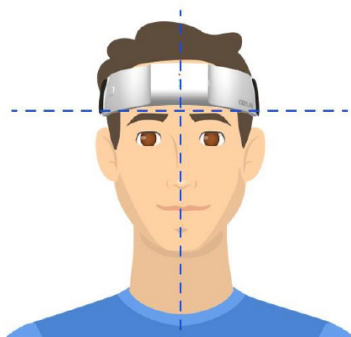


图 1 设备佩戴照片由 OBELAB, Inc 于 NIRSIT 手册 1.2.4 版授权使用



图 2 NIRSIT LITE 设备校正过程及专用软件 授权使用

阶段	视频内容
启发 (8 分 30 秒)	邀请参与者回忆或想象一个与幸福生活经历相关的场景，并提供示例供参考。
增强 (14 分钟)	播放一首与幸福相关的歌曲。在歌曲播放后，邀请参与者通过内心感受（包括质量、运动、温度和流畅性）来进行自我反思。 参与者被要求进行两项正念练习：
正念练习 (19 分 10 秒)	1) 交替用手拍大腿 2) 用手按摩肩膀

fNIRS 开始测量数据，实验助理会在数据中标记出每个阶段的开始和结束，以区分各个阶段。第一阶段为“静息”阶段，参与者被要求闭着眼睛在椅子上休息 2 分钟。休息结束后，研究助理在距离座位 1 米的 40 英寸显示器上播放以幸福为主题的视频。视频分为“启发”（8 分 30 秒）、“增强”（14 分钟）、“正念练习”（19 分 10 秒）三个阶段，共 41 分 40 秒。视频环节的干预过程由经过培训的志愿者主导，视频内容如上表。

2.2 数据收集

本实验用 OBELAB 的 NIRSIT LITE 来收集数据。它是 15 通道连续波成像系统，由五个双波长 LED 二极管作为 780nm 和 850nm 波长的光源和七个光电二极管作为探测器。光源和探测器之间相距 3cm。LED 光源发射近红外光，前额叶大脑皮层的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白吸收特定波长的光线后，由探测器检测

反射光并转换成数字信号并发送到笔记本电脑。该设备的采样率为 8.138 Hz。信噪比 (SNR) 阈值设置为 30 dB，用于对每个检测通道在 0.1 Hz 至 0.005 Hz 范围内进行带通滤波后的噪声处理。基线值定义为各阶段开始前五秒 (-5s-0s) 的平均值。收集到的数据通过高散射光的修正比尔-朗伯定律 (MBLL) 进行转换，氧合血红蛋白的浓度增加和脱氧血红蛋白的浓度减少代表着功能性大脑激活的迹象。

以下通道被指定用于特定的皮层区域（见表 2），通道 3、6、9 和 12 对应于背外侧前额叶皮质；通道 5、8 和 11 对应于前额叶前部皮质；通道 4、7、10 和 13 对应于额叶眶上皮质。通道 1 与右侧腹外侧前额叶皮质相关，而通道 15 对应于左侧腹外侧前额叶皮质。通道 2 与右侧背外侧前额叶皮质相关，通道 14 涉及左侧背外侧前额叶皮质 (Kim et al., 2023) [11]。（见图 3）。

表 2 NIRSIT LITE 的信道配置 (OBELAB Inc, 2022)

前额叶皮质区域	通道
背外侧前额叶皮质	3, 6, 9, 12
前额叶前部皮质	5, 8, 11
额叶眶上皮质	4, 7, 10, 13
右侧腹外侧前额叶皮质	1
左侧腹外侧前额叶皮质	15
右侧背外侧前额叶皮质	2
左侧背外侧前额叶皮质	14

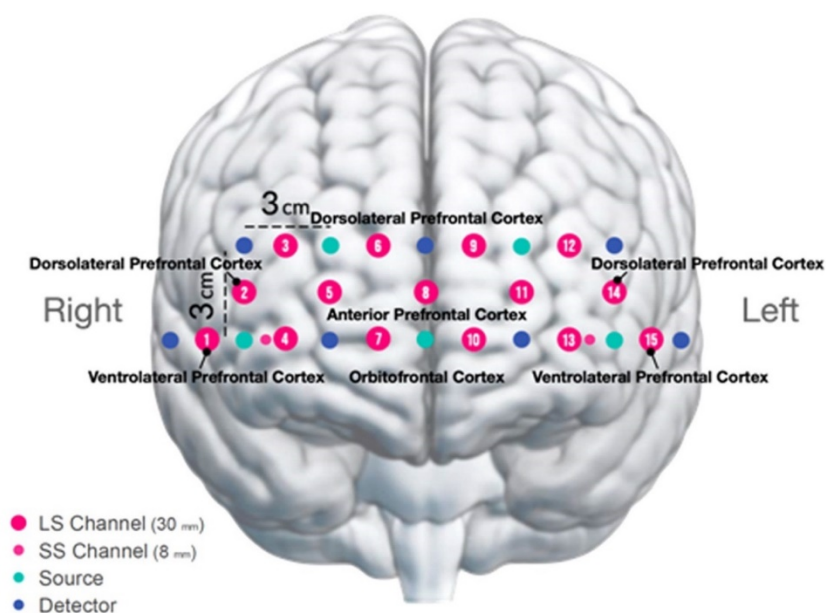


图 3 15 通道及前皮层区域相关图-照片由 OBELAB, Inc 于 NIRSIT 手册 1.2.4 版授权使用

2.3 数据分析

本研究使用针对韩国 OBELAB Inc NIRSIT LITE 专题开发设计的软件作数据收集。本实验采用 Python 3.11.5 处理数据，对数据进行平均和可视化表示。数据集根据特定的实验阶段进行分割，每个阶段都有预定义的标记。及后使用适用于 Windows 的 SPSS ver. 25.0 软件 (SPSS Inc., 美国伊利诺伊州芝加哥) 对数据进行统计分析，从中得出平均值、标准偏差和相关性。

多通道图被绘制出来，以显示每个通道和整体平均值在四个阶段的趋势，并计算每个阶段整体平均值的零交叉点，以确定每个阶段前额叶氧合血红蛋白 (HbO) 水平的稳定性。对于每个时间段，使用皮尔逊相关系数计算了一个相关性矩阵。该矩阵量化了时间段内每对通道之间的线性关系。相关值的范围从-1 (完全负相关) 到+1 (完全正相关)，0 表示没有线性关系 (Temizel et al., 2011) [12]。为了识别显着的相关性，应

用了 $|r| > 0.6$ 的阈值。超过这个绝对值的相关性被认为足够强大，可能表明通道对之间存在有意义的生理或实验联系。0.6-0.8 之间的相关性被视为中度强，而高于 0.8 的相关性被视为非常强 (CHAN, 2003) [13]。为了提供一个总结每个时间段通道整体互联性的单一指标，计算了每个时间段的平均相关性。这是通过计算相关性矩阵的上三角部分的绝对值的平均值来完成的。对于每个实验阶段，显着的相关性以两种方式进行视觉突出：一个通道连接网络，其中每个节点代表一个通道，节点之间的边代表显着的相关性。边的粗细和透明度按照相关性的强度进行缩放，提供了网络结构的直观视觉。生成了相关性矩阵的热图，单元格根据相关性的强度和符号进行了编码。热图单元格内的标注显示了确切的相关系数，便于对通道间关系进行详细检查。

对不同阶段的每对通道应用简单线性回归模型，以确定与每对通道相关联的 p 值。该分析涉及在每个

阶段内对所有通道进行成对检查, 利用 `scipy.stats.linregress` 函数为每个可能的通道对拟合一个线性回归模型。

p 值用于指示在假设零假设成立的情况下, 观察到的结果与记录结果一样极端的概率。 $p \leq 0.05$ 将被视为两个通道之间存在统计显著关系, 这意味着观察到的线性关系不太可能是由于随机机会造成的。相反, $p >$

0.05 表明没有足够的证据表明两个通道之间存在显著的线性关系。对于异常小的 p 值 ($< 1e-16$), 结果将显示为“ $p < 1e-16$ ”, 以防止呈现误导性的小值。

3 结果

以下是正念音乐疗法 (MBMT) 四个阶段的前额叶氧合血红蛋白 (HbO) 浓度、脑功能连接性及脑区映像的对比表格: (见表 3)。

表 3 MBMT 正念音乐疗法各阶段关键神经活动指标对比

阶段	前额叶氧合血红蛋白 HbO 浓度 (均值 $\pm$ SD)	平均相关系数 (r) $\pm$ SD	显著相关通道对比例 ($ r > 0.6$)	关键通道对 (示例)	零交叉率 (Hz)	主要激活脑区
静息阶段	0.000155 $\pm$ 0.00002	0.507 $\pm$ 0.086	39.05%	ch5-ch11 ($r=0.899$)	0.0061	右侧 DLPFC (通道 2)、前额叶前部 (通道 5)
启发阶段	0.000240 $\pm$ 0.00003	0.637 $\pm$ 0.074	65.71%	ch4-ch7 ($r=0.932$)	0.0024	右侧 VLPFC (信道 1)、DLPFC (信道 2)、OFC (信道 4)
增强阶段	0.000224 $\pm$ 0.00002	0.702 $\pm$ 0.069	77.14%	ch14-ch15 ($r=0.855$)	0.0047	全前额叶、左侧 DLPFC (信道 14) -VLPFC (信道 15)
正念阶段	0.000228 $\pm$ 0.00002	0.576 $\pm$ 0.073	56.19%	ch9-ch11 ($r=0.884$)	0.0046	左侧 DLPFC (信道 14)、VLPFC (信道 15)

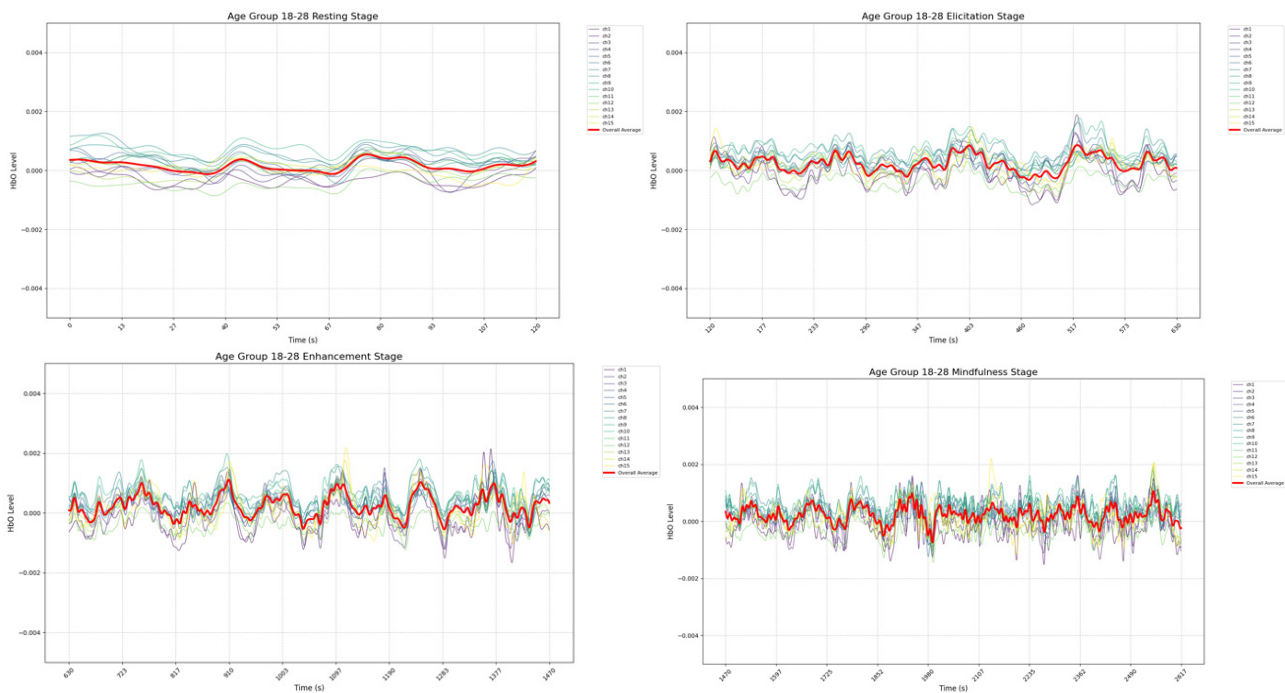


图 4 MBMT 四个阶段前额叶氧合血红蛋白 Δ HbO 的多通道图

零交叉率是一个指示信号从正向到负向或反之之间转换的频率的指标, 在 18-28 岁的个体在不同的实验阶段表现出变化。在休息阶段, 零交叉率观察到为 0.0061Hz, 是所有阶段中最高的, 表明信号更加变化。

相反, 唤起阶段呈现出明显较低的 0.0024 Hz 的速率, 表明在这段时间内信号更加稳定。增强和正念阶段分别显示出 0.0047 Hz 和 0.0046 Hz 的类似速率, 反映出适度的信号变异水平。相应地, 所有通道的平均值在这

些阶段之间有所不同。休息阶段记录的平均值最低, 为 0.000155, 而唤起阶段显示出最高的平均值为 0.000240。增强和正念阶段的平均值略低, 分别为 0.000224 和 0.000228。

在休息阶段, 进行了全面的统计分析, 发现平均 p 值为 $6.4472\text{e-}03$, 99.05% 的通道对的 p 值低于 0.05, 表明具有很高的统计显著性。线性回归模型观察到的平均方差非常低, 为 $3.8554\text{e-}08$, 辅信道对之间的平均绝对均差为 $3.8259\text{e-}04$ 和平均标准误差为 $7.6142\text{e-}06$ 。值得注意的是, 只有一个通道对, ch8 - ch13, 显示出超过 0.05 的 p 值, 具体为 $6.6305\text{e-}01$ 。在增强阶段, 类似的统计指标显示初始平均 p 值为 $6.8666\text{e-}03$, 具有相同百分比的显著通道对 (99.05%)。线性回归模型中的方差略微增加至 $5.9314\text{e-}08$, 而信道对的平均绝对均

差和标准误差分别降至 $3.2862\text{e-}04$ 和 $4.7006\text{e-}06$ 。

通道对 ch6 - ch15 被确定为 p 值明显高于 0.05, 记录为 $7.2099\text{e-}01$ 。在同一阶段的随后分析中, 记录了更加具有说服力的统计稳健性证据, 平均 p 值为 $3.3159\text{e-}63$, 表明几乎所有通道对都具有显著性。正念阶段延续了这种强大的统计显著性趋势, 其平均 p 值为 $2.4070\text{e-}11$ 。该阶段还展示了所有通道对的 p 值均低于 0.05, 强化了所观察数据的一致性和可靠性。线性回归模型中的方差略低于前一个增强阶段, 为 $9.3242\text{e-}08$, 平均绝对均差为 $3.3154\text{e-}04$, 平均标准误差为 $3.7032\text{e-}06$ 。所有阶段中持续较低的平均 p 值强调了数据在相关性模型内进一步分析的重要性。特别是在增强和正念阶段观察到的极低 p 值突显了这些时期研究结果的稳健性。

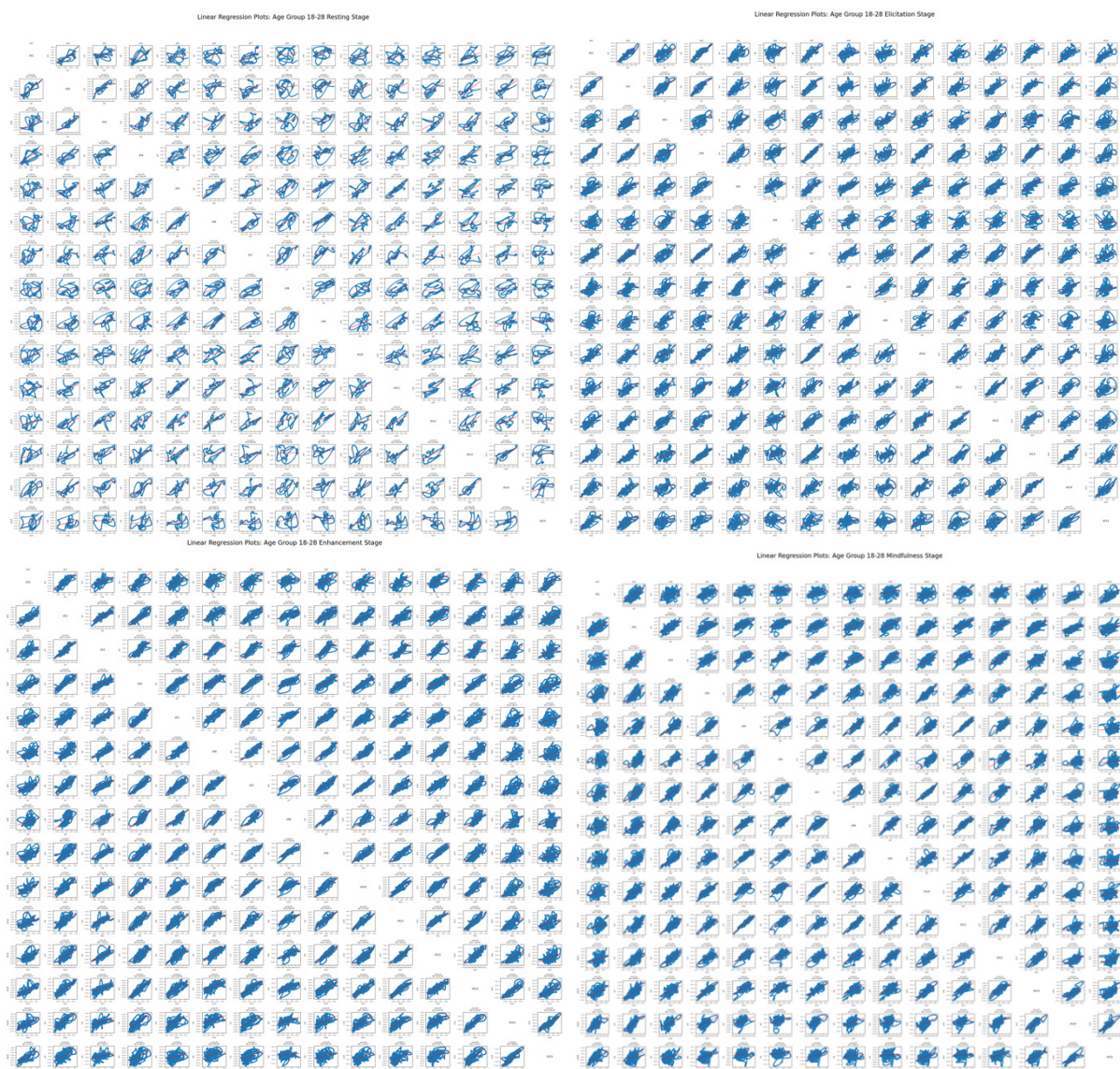
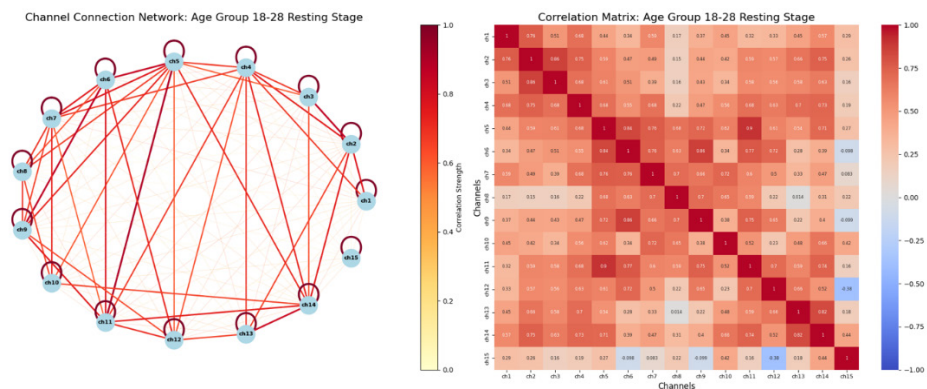


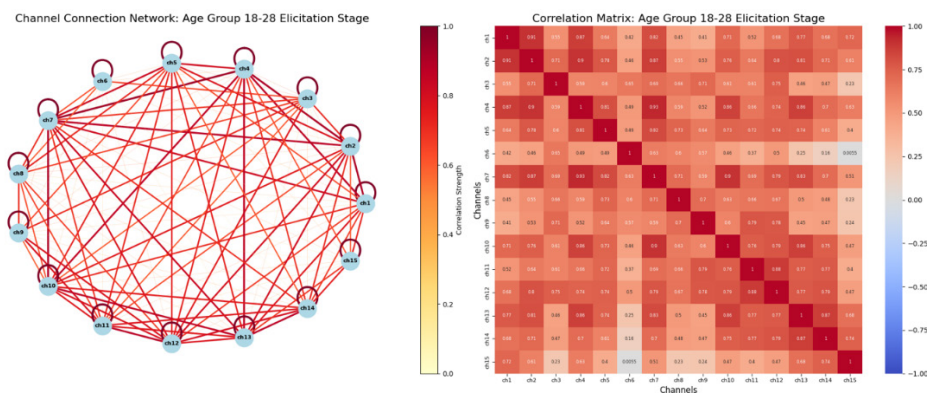
图5 MBMT 四个阶段中每个通道对的简单线性回归模型 (线性进展图)

表 4 分阶段脑区映射与连接性特征

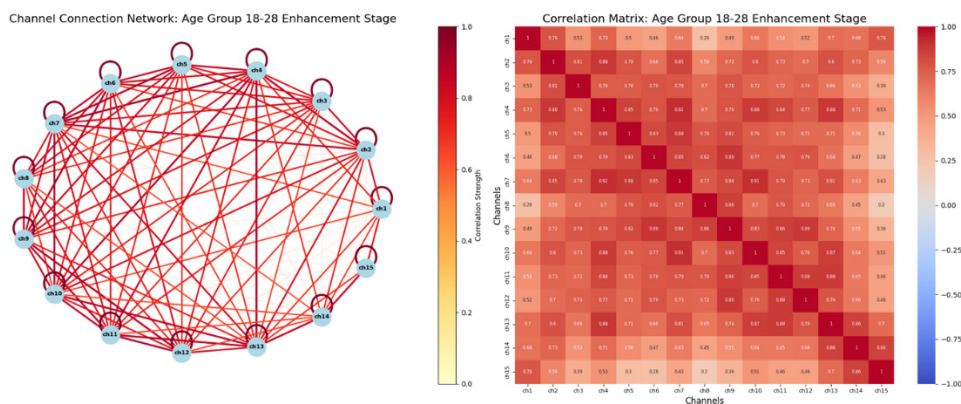
阶段	核心脑区激活	关键功能连接	显著性 (p 值范围)	神经同步性趋势
静息阶段	右侧 DLPFC、前额叶前部	ch5-ch11 (前额叶前部-DLPFC) ch6-ch9 (DLPFC-DLPFC)	$p=6.45e-03$ (平均)	低同步, 高信号波动
启发阶段	右侧 VLPFC、DLPFC、眶额叶	ch4-ch7 (OFC-前额叶前部) ch1-ch2 (VLPFC-DLPFC)	$p<1e-16$ (极显著)	同步性显著增强, 信号稳定
增强阶段	全前额叶、左侧 DLPFC-VLPFC	ch14-ch15 (左侧 DLPFC-VLPFC) ch5-ch6 (前额叶前部-DLPFC)	$p=3.32e-63$ (极显著)	全局同步性达峰值
正念阶段	左侧 DLPFC、VLPFC、前额叶前部	ch9-ch11 (DLPFC-前额叶前部) ch14-ch15 (左侧 DLPFC-VLPFC)	$p=2.41e-11$ (极显著)	局部回路优化, 同步性适度下降



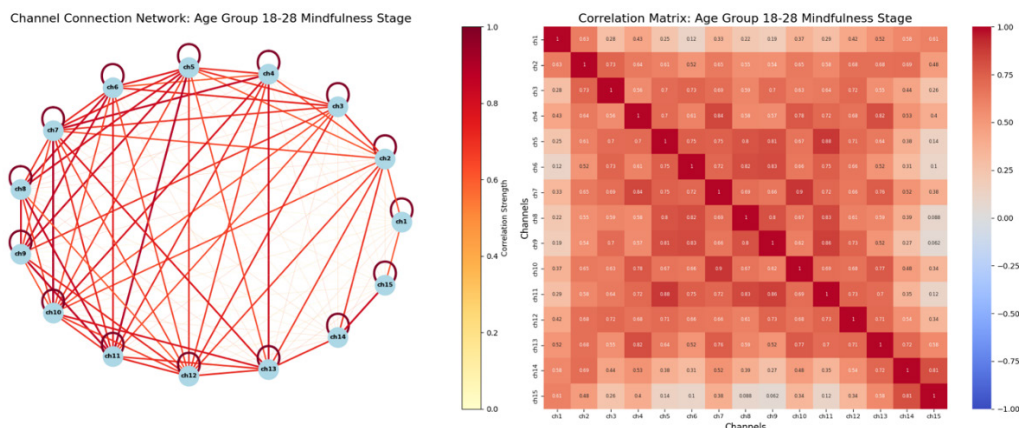
静息阶段



启发阶段



增强阶段



正念阶段

图 6 MBMT 四个阶段的皮尔逊相关系数网络图 (左) 和热力图 (右)

表 5 各阶段相关值均在 0.8 以上的通道对

静息		启发		增强		正念	
通道对	r 值	通道对	r 值	通道对	r 值	通道对	r 值
ch5 - ch11	0.899	ch4 - ch7	0.932	ch4 - ch7	0.919	ch7 - ch10	0.897
ch6 - ch9	0.864	ch1 - ch2	0.906	ch7 - ch10	0.91	ch5 - ch11	0.884
ch2 - ch3	0.859	ch2 - ch4	0.902	ch6 - ch9	0.892	ch9 - ch11	0.862
ch5 - ch6	0.84	ch7 - ch10	0.901	ch9 - ch12	0.886	ch4 - ch7	0.842
		ch11 - ch12	0.877	ch2 - ch4	0.885	ch6 - ch9	0.828
		ch2 - ch7	0.872	ch5 - ch7	0.884	ch8 - ch11	0.828
		ch1 - ch4	0.869	ch4 - ch13	0.884	ch4 - ch13	0.817
		ch13 - ch14	0.868	ch11 - ch12	0.882	ch6 - ch8	0.816
		ch10 - ch13	0.861	ch4 - ch10	0.878	ch5 - ch9	0.815
		ch4 - ch13	0.86	ch11 - ch13	0.878	ch14 - ch15	0.809
		ch4 - ch10	0.856	ch10 - ch13	0.87		
		ch7 - ch13	0.826	ch9 - ch11	0.863		
		ch5 - ch7	0.824	ch8 - ch9	0.861		
		ch1 - ch7	0.817	ch13 - ch14	0.859		
		ch4 - ch5	0.808	ch14 - ch15	0.855		
		ch2 - ch13	0.807	ch4 - ch5	0.852		
				ch2 - ch7	0.85		
				ch10 - ch11	0.85		
				ch6 - ch7	0.845		
				ch4 - ch11	0.837		
				ch7 - ch9	0.835		
				ch5 - ch6	0.83		
				ch9 - ch10	0.827		
				ch5 - ch9	0.824		
				ch6 - ch8	0.82		
				ch2 - ch3	0.815		
				ch7 - ch13	0.81		
				ch2 - ch13	0.802		

表 6 各阶段相关值均在 0.6 到 0.8 之间的通道对

静息		启发		增强		正念	
通道对	r 值	通道对	r 值	通道对	r 值	通道对	r 值
ch6 - ch11	0.774	ch2 - ch12	0.798	ch2 - ch10	0.796	ch8 - ch9	0.798
ch1 - ch2	0.765	ch12 - ch14	0.795	ch1 - ch2	0.794	ch5 - ch8	0.797
ch5 - ch7	0.761	ch7 - ch12	0.789	ch4 - ch9	0.794	ch4 - ch10	0.781
ch6 - ch7	0.756	ch9 - ch11	0.789	ch6 - ch12	0.794	ch10 - ch13	0.77
ch9 - ch11	0.75	ch10 - ch12	0.785	ch4 - ch6	0.793	ch7 - ch13	0.765
ch2 - ch4	0.748	ch2 - ch5	0.779	ch12 - ch13	0.793	ch5 - ch6	0.754
ch2 - ch14	0.747	ch9 - ch12	0.779	ch3 - ch6	0.792	ch6 - ch11	0.753
ch11 - ch14	0.737	ch12 - ch13	0.773	ch2 - ch5	0.792	ch5 - ch7	0.749
ch4 - ch14	0.726	ch11 - ch14	0.768	ch7 - ch11	0.792	ch2 - ch3	0.73
ch5 - ch9	0.725	ch1 - ch13	0.766	ch8 - ch11	0.787	ch9 - ch12	0.73
ch7 - ch10	0.725	ch11 - ch13	0.765	ch5 - ch8	0.786	ch11 - ch12	0.729
ch6 - ch12	0.721	ch10 - ch11	0.76	ch3 - ch9	0.784	ch3 - ch6	0.728
ch5 - ch14	0.711	ch2 - ch10	0.756	ch6 - ch11	0.78	ch7 - ch11	0.722
ch11 - ch12	0.703	ch3 - ch12	0.754	ch1 - ch15	0.775	ch6 - ch7	0.721
ch7 - ch8	0.697	ch10 - ch14	0.75	ch3 - ch7	0.775	ch13 - ch14	0.72
ch8 - ch9	0.696	ch5 - ch12	0.745	ch7 - ch8	0.769	ch3 - ch12	0.718
ch4 - ch13	0.695	ch14 - ch15	0.745	ch4 - ch12	0.767	ch4 - ch11	0.715
ch1 - ch4	0.684	ch4 - ch12	0.741	ch6 - ch10	0.766	ch12 - ch13	0.713
ch3 - ch4	0.684	ch5 - ch13	0.737	ch3 - ch4	0.763	ch5 - ch12	0.709
ch4 - ch5	0.681	ch5 - ch10	0.734	ch3 - ch5	0.761	ch4 - ch5	0.703
ch4 - ch11	0.681	ch5 - ch8	0.728	ch5 - ch10	0.76	ch11 - ch13	0.703
ch4 - ch7	0.679	ch1 - ch15	0.725	ch10 - ch12	0.76	ch3 - ch5	0.701
ch5 - ch8	0.678	ch5 - ch11	0.722	ch3 - ch12	0.745	ch3 - ch9	0.696
ch2 - ch13	0.664	ch3 - ch9	0.714	ch9 - ch13	0.737	ch2 - ch14	0.695
ch7 - ch9	0.664	ch2 - ch14	0.714	ch3 - ch10	0.734	ch10 - ch11	0.695
ch12 - ch13	0.662	ch2 - ch3	0.712	ch5 - ch11	0.734	ch7 - ch8	0.692
ch10 - ch14	0.659	ch1 - ch10	0.712	ch2 - ch11	0.733	ch3 - ch7	0.692
ch8 - ch10	0.653	ch7 - ch8	0.708	ch2 - ch14	0.731	ch2 - ch13	0.682
ch9 - ch12	0.648	ch7 - ch14	0.703	ch7 - ch12	0.731	ch2 - ch12	0.681
ch3 - ch14	0.634	ch4 - ch14	0.702	ch1 - ch4	0.727	ch4 - ch12	0.677
ch4 - ch12	0.634	ch8 - ch9	0.699	ch2 - ch9	0.724	ch10 - ch12	0.675
ch6 - ch8	0.628	ch7 - ch11	0.695	ch8 - ch12	0.723	ch5 - ch10	0.666
ch5 - ch10	0.62	ch3 - ch7	0.688	ch3 - ch11	0.716	ch8 - ch10	0.666
ch5 - ch12	0.607	ch13 - ch15	0.684	ch5 - ch13	0.708	ch6 - ch12	0.658
ch3 - ch5	0.606	ch1 - ch12	0.677	ch5 - ch12	0.707	ch7 - ch9	0.658
ch7 - ch11	0.6	ch1 - ch14	0.677	ch4 - ch14	0.705	ch6 - ch10	0.656
		ch8 - ch12	0.669	ch4 - ch8	0.702	ch7 - ch12	0.656
		ch4 - ch11	0.661	ch2 - ch12	0.7	ch2 - ch7	0.645
		ch3 - ch8	0.661	ch13 - ch15	0.699	ch2 - ch10	0.645
		ch8 - ch11	0.659	ch3 - ch8	0.697	ch2 - ch4	0.643
		ch3 - ch6	0.654	ch8 - ch10	0.697	ch5 - ch13	0.643

续表 6

静息		启发		增强		正念	
ch5 - ch9	0.645	ch1 - ch13	0.695	ch3 - ch11	0.642		
ch2 - ch11	0.642	ch2 - ch6	0.685	ch3 - ch10	0.633		
ch1 - ch5	0.639	ch1 - ch14	0.677	ch1 - ch2	0.629		
ch8 - ch10	0.634	ch6 - ch13	0.677	ch9 - ch10	0.621		
ch6 - ch7	0.629	ch3 - ch13	0.665	ch1 - ch15	0.613		
ch4 - ch15	0.625	ch12 - ch14	0.658	ch2 - ch5	0.61		
ch2 - ch15	0.612	ch1 - ch10	0.655	ch8 - ch12	0.61		
ch3 - ch10	0.609	ch8 - ch13	0.651	ch4 - ch6	0.607		
ch5 - ch14	0.608	ch11 - ch14	0.646				
ch3 - ch11	0.607	ch10 - ch14	0.645				
ch6 - ch8	0.603	ch1 - ch7	0.638				
ch9 - ch10	0.601	ch7 - ch14	0.631				

3.1 每个阶段所有通道对的皮尔逊相关系数

在图 6 中的相关性热力图呈现了涉及通道对的所有阶段的相关性趋势的综合分析。在休息阶段,平均相关系数为 0.507,有 39.05%的相关性被认为是显著的,表明神经活动之间的同步程度较低。随着参与者进入唤起阶段,平均相关性显著增加至 0.637,显著相关性的百分比升至 65.71%。这种趋势延续到增强阶段,平均相关性达到 0.702,77.14%的相关性显著,表明在这个阶段神经同步度最高。然而,在正念阶段,平均相关性和显著相关性的百分比分别降至 0.576 和 56.19%。具有“非常强”相关性的通道对数量遵循类似的模式,从休息到增强阶段增加,然后在正念阶段急剧减少。

此外,在每个阶段观察到的最高个体相关性 - 从休息阶段的 0.899 到唤起阶段的 0.932 - 进一步说明了在不同认知状态下神经连接的变化性。大于 0.6 的相关性的标准差还提供了对跨阶段更强相关性的变化性的洞见,唤起阶段显示出最高的变化性 ($SD=0.086$),而正念阶段相比增强阶段 ($SD=0.074$) 反映出变化性略有减少 ($SD=0.073$)。这种变化性模式与观察到的平均相关性变化一致,表明在增强阶段存在更一致的强相关性,随后在正念阶段略微降低一致性。

4 讨论

前面的分析部分勾画了观察到的各种通道对之间的相关性模式。进一步的审查集中在对应于前额叶皮质的通道上,揭示出更为显著的趋势。这项调查包括对区域间相关性的详细计算,利用皮尔逊相关系数来量化横跨不同前额叶区域的所有可能通道对之间的关系。对于每对区域,分析计算了所有信道对的平均相关系

数。

4.1 前额叶皮层区域间连接

值得注意的是,在休息阶段,两个具体的区域间对展现出负相关。这些对包括右侧背外侧前额叶皮层和左侧腹外侧前额叶皮层之间的通道,以及背外侧前额叶皮层和左侧腹外侧前额叶皮层之间的通道。这些对的相关系数范围从 $r = -0.012$ 到 -0.057 ,表明在这个阶段存在轻微但一致的负线性关系。相比之下,在研究的其他大脑活动阶段,所有区域间通道对都表现出正相关,这表明在不同认知负荷下存在不同的交互动态。

在所有阶段观察到了几对显著相关的通道对,比如右侧背外侧前额叶皮层 - 背外侧前额叶皮层、右侧背外侧前额叶皮层 - 左侧背外侧前额叶皮层以及背外侧前额叶皮层 - 前额叶皮层,每对通道对都展现出强大的相关系数大于 0.6。这种一致性暗示着一个稳定的基础功能连接,可能支撑着所有阶段共同的基本认知过程。然而,像额前额叶皮层 - 左侧背外侧前额叶皮层和右侧腹外侧前额叶皮层 - 左侧背外侧前额叶皮层这样的区域对只在前三阶段保持了这种显著相关,在正念阶段显著下降。这种变化暗示了在正念阶段特定的认知策略或神经资源分配的转变。

根据关于不同阶段 HbO 水平的图表结果显示,大脑氧合血红蛋白水平在前两个阶段持续增加,但在增强阶段下降,最终在正念阶段略微增加了 0.000004。假设是通过正念阶段,受试者应该能够更好地集中注意力,因为认知功能增强,这得到了增加的 alpha 波活动的支持 (Do 等, 2023) [14]。因此,预计在这个阶段会出现最同步的神经活动,可能导致最高的 HbO 水平。

然而, 正念阶段的观察数据与我们的假设相矛盾, 显示出相对较高的 HbO 在所有四个阶段, 但低于唤起阶段。基于这一观察结果, 我们决定深入研究唤起阶段和正念阶段之间前额区域的区域比较。

对身心正念训练 (Mind-Body Mindfulness Training, MBMT) 的唤起阶段和正念阶段之间神经相关性的比较分析揭示了神经连接的复杂相互作用。

这两个阶段都显示出显著的神经相关性, 但唤起

阶段在各种前额叶皮层区域之间展示出更广泛的显著连接, 包括:

- (1) 右侧腹外侧前额叶皮层和右侧背外侧前额叶皮层;
- (2) 右侧腹外侧前额叶皮层和轨前额叶皮层;
- (3) 右侧腹外侧前额叶皮层和前额叶皮层;
- (4) 右侧腹外侧前额叶皮层和左侧背外侧前额叶皮层。

表 7 跨阶段前额叶氧合血红蛋白 (HbO) 浓度与功能连接动态

指标	静息→启发阶段	启发→增强阶段	增强→正念阶段
前额叶氧合血红蛋白 HbO 浓度变化	↑45.8%	↓6.7%	↑1.8%
平均相关系数变化	↑25.6%	↑10.2%	↓17.9%
显著相关通道对变化	↑68.2%	↑17.5%	↓27.1%
关键脑区转移	右侧→全脑	全脑→左侧	左侧聚焦

相比之下, 正念阶段展示出一组更为选择性的显著相关性, 特别是在背外侧前额叶皮层和前额叶皮层之间, 以及左侧背外侧前额叶皮层和左侧腹外侧前额叶皮层之间。这种模式表明, 正念实践可能会特别增强某些神经回路内部的连接性, 聚焦神经活动并优化涉及认知和情绪加工的神经基质。

这些发现突显了在每个 MBMT 阶段激活的独特神经机制, 表明对训练相关的生理和心理结果具有独特的贡献。需要进一步研究来更清晰地勾画这些机制, 这可能会导致个性化的基于正念的干预方法的发展。这样量身定制的方法将利用个体神经连接配置文件来最大化认知和情绪益处, 潜在地革新治疗策略, 以更好地满足寻求心理健康干预的人们多样化的需求。

4.2 局限性

本研究存在以下几点局限性, 有待进一步改进。首先, 在以往的研究中, 正念音乐疗法 (MBMT) 帮助乳腺癌患者提高注意力、减少负面情绪和疲劳的实验周期为 4 周 (Lesiuk, 2016) [4]。然而, 本研究采用了单次 MBMT 干预, 治疗时间相对较短, 可能难以完全反映 MBMT 的长期效果。未来研究可考虑采用更长时间的 MBMT 干预, 以更全面地评估其疗效。其次, 本研究采用功能近红外光谱成像 (fNIRS) 技术监测大脑活动, 该技术易受到生理活动和被试者运动等因素的干扰, 分别称为生理干扰和运动伪迹, 给数据处理带来一定挑战 (崔旻, 2021) [15]。今后可尝试结合多种神经成像技术, 如 fMRI 和 EEG, 提高测量结果的可靠性。此外, 本研究样本量相对较小, 且只涉及了 18 至 28 岁的年

轻人, 可能存在一定的偶然性。后续研究需扩大样本规模, 纳入不同年龄段的被试, 进一步验证实验发现。

5 总结

该研究对前额叶皮质中 HbO 水平在多个通道上进行了全面分析, 并对这些通道在 MBMT 的四个不同阶段中的连接性进行了调查。此外, 研究还深入探讨了不同脑区之间的连接性, 展示了在 MBMT 期间发生的微妙的神经相互作用。尽管有这些见解, 但研究并非没有局限性。小样本量和干预的连续性可能会影响结果的泛化性和长期影响。此外, 研究仅关注前额叶皮质, 忽视其他脑区域, 如感觉皮质、脑岛、海马体和前扣带皮质 (ACC), 这些区域也被认为在正念实践中起着重要作用 (Siew&Yu, 2023) [16]。

参考文献

- [1] KabatZinn J. Mindfulness-based interventions in context: Past, present, and future[J]. Clinical Psychology Science and Practice, 2003, 10(2):144-156.
- [2] Zhang D, Lee EKP, Mak ECW, et al. Mindfulness-based interventions: an overall review[J]. British Medical Bulletin, 2021, 138(1):41-57.
- [3] Liu H, Gao X, Hou Y. Effects of mindfulness-based stress reduction combined with music therapy on pain, anxiety, and sleep quality in patients with osteosarcoma[J]. Brazilian Journal of Psychiatry, 2019, 41(6):540-545.
- [4] Lesiuk T. The Development of a Mindfulness-Based Music Therapy (MBMT) Program for Women Receiving Adjuvant

- Chemotherapy for Breast Cancer[J]. Healthcare, 2016, 4(3):53.
- [5] Hwang M H. Health Practitioners' Understanding and Use of Relaxation Techniques (RTs), Mindfulness Meditation (MM) and Relaxation Music (RM) in the UK and South Korea: a Qualitative Case Study Approach[D]. Faculty of Health and Social Sciences University of the West of England, Bristol, 2017.
- [6] 崔旸. 功能性近红外光谱技术研究综述[J]. 中国心理学前沿, 2021, 3(11):1300 - 1306.
- [7] Jöbsis F F. Noninvasive, Infrared Monitoring of Cerebral and Myocardial Oxygen Sufficiency and Circulatory Parameters [J]. Science, 1977, 198(4323):1264-1267.
- [8] Villringer A, Dirnagl U. Coupling of brain activity and cerebral blood flow: basis of functional neuroimaging[J]. PubMed, 1995, 7(3):240-276.
- [9] Irani F, Platek S M, Bunce S, et. al. Functional Near Infrared Spectroscopy (fNIRS): An Emerging Neuroimaging Technology with Important Applications for the Study of Brain Disorders[J]. The Clinical Neuropsychologist, 2007, 21(1):9-37.
- [10] Hunt M A, Legge. Neurological Research on Music Therapy for Mental Health: A Summary of Imaging and Research Methods[J]. Music Therapy Perspectives, 2015, 33(2): 142-161.
- [11] Kim H J, Jung J H, Lee S W. Prefrontal Cortex Activation during Diaphragmatic Breathing in Women with Fibromyalgia: An fNIRS Case Report[J]. Physical Therapy Rehabilitation Science, 2023, 12(3):334-339.
- [12] Temizel A, Halici T, Logoglu B, et. al. Chapter 34 - Experiences on Image and Video Processing with CUDA and OpenCL[M]. Elsevier Inc, 2011 :547-567.
- [13] CHAN Y H. Biostatistics 104: Correlational analysis[J]. Singapore Medical Journal, 2003, 44(12):614-619.
- [14] Do H, Hoang H, Nguyen N, et. al. Intermediate effects of mindfulness practice on the brain activity of college students: An EEG study[J]. BRO Neuroscience Reports, 2023(14): 308-319.
- [15] 崔旸. 功能性近红外光谱技术研究综述[J]. 中国心理学前沿, 2021, 3(11):1300 - 1306.
- [16] Siew S, Yu J. Mindfulness-based randomized controlled trials led to brain structural changes: an anatomical likelihood meta-analysis[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):1-10.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS

附录:

Table 4 Correlation Values of Inter-Regional Pairs During the Resting Stage

Resting Stage	
Inter-regional pair	r
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Right Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.596
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.554
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.57
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.523
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.655
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.223
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.617
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.543
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.391
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.632
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	-0.057
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.472
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.608
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.473
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	-0.012
Orbitofrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.522
Orbitofrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.668
Orbitofrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.217
Anterior Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.511
Anterior Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.244
Left Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.444

Table 5 Correlation Values of Inter-Regional Pairs During the Elicitation Stage

Elicitation Stage	
Inter-regional pair	r
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Right Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.775
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.522
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.756
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.617
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.722
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.563
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.621
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.803
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.686
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.754
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.542
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.528
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.615
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.366
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.158
Orbitofrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.691
Orbitofrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.756
Orbitofrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.573
Anterior Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.544
Anterior Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.316
Left Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.745

Table 6 Correlation Values of Inter-Regional Pairs During the Enhancement Stage

Enhancement Stage	
Inter-regional pair	r
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Right Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.731
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.639
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.759
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.577
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.662
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.617
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.774
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.798
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.703
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.694
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.527
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.768
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.799
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.521
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.344
Orbitofrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.753
Orbitofrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.71
Orbitofrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.543
Anterior Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.507
Anterior Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.246
Left Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.855

Table 7 Correlation Values of Inter-Regional Pairs During the Mindfulness Stage

Mindfulness Stage	
Inter-regional pair	r
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Right Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.592
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.475
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.561
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.545
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.466
Right Ventrolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.364
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.65
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.667
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.62
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.619
Right Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.408
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Orbitofrontal Cortex	0.609
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.746
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.339
Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.14
Orbitofrontal Cortex - Anterior Prefrontal Cortex	0.661
Orbitofrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.562
Orbitofrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.425
Anterior Prefrontal Cortex - Left Dorsolateral Prefrontal Cortex	0.386
Anterior Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.113
Left Dorsolateral Prefrontal Cortex - Left Ventrolateral Prefrontal Cortex	0.809