

功能性近红外光谱成像在精神分裂症中的应用

王永杰^{1, 2}, 杨小龙², 谯喜荣², 邓吉宝¹, 李亚菊¹, 徐寅清¹, 封俊², 郭康林², 霍小宁^{2*}

1. 甘肃中医药大学 第一临床医学院, 甘肃 兰州 730000

2. 兰州市第三人民医院 精神科, 甘肃 兰州 730050

摘 要： 功能性近红外光谱成像 (fNIRS) 技术作为一种新兴的无创神经成像手段, 在精神分裂症的研究领域展现出巨大潜力。本文综述了 fNIRS 在精神分裂症患者脑激活模式评估、治疗反应监测以及作为潜在生物标志物方面的应用。fNIRS 通过检测大脑中的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白浓度变化, 间接测量大脑活动, 为研究精神分裂症的神经生物学机制提供了新的视角。在评估脑激活模式方面, fNIRS 揭示了精神分裂症患者在执行特定认知任务时脑区活动的异常, 这些异常与疾病的临床症状紧密相关。在治疗反应监测方面, fNIRS 能够实时监测药物治疗对患者脑活动的影响, 为个性化医疗提供支持。此外, fNIRS 信号的特异性变化使其有望成为精神分裂症早期诊断和预后评估的生物标志物。尽管 fNIRS 技术存在一定的局限性, 如检测深度和信号解析度, 但随着技术的进步和研究的深入, fNIRS 有望在未来精神分裂症的诊治中发挥更加重要的作用。

关 键 词： 功能性近红外光谱成像; 精神分裂症; 脑激活; 生物标志物; 应用

The Application of Functional Near-Infrared Spectroscopy in Schizophrenia

Wang Yongjie^{1, 2}, Yang Xiaolong², Qiao Xirong², Deng Jibao¹, Li Yaju¹, Xu Yinqing¹, Feng Jun²,

Guo Kanglin², Huo Xiaoning^{2*}

1. First Clinical Medical College, Gansu University of Chinese Traditional Medicine, Lanzhou, Gansu 730000

2. Department of Psychiatry, The Third People's Hospital of Lanzhou, Lanzhou, Gansu 730050

Abstract： Functional Near-Infrared Spectroscopy Imaging (fNIRS), as an emerging non-invasive neuroimaging technique, has demonstrated great potential in the field of schizophrenia research. This paper reviews the applications of fNIRS in evaluating brain activation patterns in patients with schizophrenia, monitoring treatment responses, and serving as a potential biomarker. By detecting changes in the concentrations of cerebral oxyhemoglobin and deoxyhemoglobin, fNIRS indirectly measures brain activity, providing a new perspective for studying the neurobiological mechanisms of schizophrenia. In evaluating brain activation patterns, fNIRS has revealed abnormal regional brain activity in patients with schizophrenia during specific cognitive tasks, which are closely related to the clinical symptoms of the disease. In terms of treatment response monitoring, fNIRS can real-time monitor the effects of pharmacotherapy on patients' brain activity, supporting personalized medicine. Additionally, the specific changes in fNIRS signals make it a promising biomarker for early diagnosis and prognosis evaluation of schizophrenia. Despite certain limitations of fNIRS technology, such as detection depth and signal resolution, with technological advancements and further research, fNIRS is expected to play an increasingly important role in the future diagnosis and treatment of schizophrenia.

Keywords： Functional Near-Infrared Spectroscopy Imaging; schizophrenia; brain activation; biomarkers; application

精神分裂症是一种严重的慢性精神障碍, 影响全球约 1% 的人口^[1]。在中国, 据估计有超过 700 万的精神分裂症患者, 这一数字还在逐年上升^[2]。精神分裂症的临床特征包括阳性症状 (如幻觉和妄想)、阴性症状 (如情感平淡和社会退缩) 以及认知功能障碍^[3]。这些症状的复杂性和多样性使得精神分裂症的诊断和治疗充满挑战。

功能性近红外光谱成像 (functional Near-Infrared Spectroscopy Imaging, fNIRS) 技术是一种新兴的神经成像技术, 它通过检

基金项目

1. 兰州市卫生健康行业科研项目 “基于网络药理学和实验验证探讨益心舒胶囊的抗抑郁作用机制” (A2023016)

2. 兰州市科技计划项目 “兰州市老年人群心理健康状况及干预模式的探索研究” (2022-3-55)

3. 兰州市科技计划项目 “精神分裂症患者反应抑制训练的效果及其迁移效应研究” (2022-3-56)

作者简介: 王永杰 (1989-), 男, 甘肃兰州, 在读硕士, 主治医师, 主要从事精神分裂症方面的研究

通讯作者: 霍小宁, 兰州市第三人民医院, 邮编: 730050

测大脑中的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的浓度变化来间接测量大脑活动^[2]。与功能性磁共振成像（functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI）和正电子发射断层扫描（Positron Emission Tomography, PET）等其他神经成像技术相比，fNIRS具有无创、便携、成本低以及对运动伪影不敏感等优点，使其在精神疾病的研究中显示出巨大的潜力^[3]。

fNIRS技术在精神分裂症研究中的应用主要集中在以下几个方面：首先，fNIRS可以用来评估精神分裂症患者在执行特定认知任务时的脑激活模式，从而揭示疾病相关的神经生物学机制^[4]；其次，fNIRS可以用于监测精神分裂症患者的治疗反应，为个性化治疗提供依据^[5]；最后，fNIRS信号可能作为精神分裂症的生物标志物，有助于疾病的早期诊断和预后评估^[6]。

尽管fNIRS技术在精神分裂症研究中展现出广阔的应用前景，但也面临着一些挑战。例如，fNIRS的穿透深度有限，主要局限于大脑皮层，这限制了其在深部脑结构研究中的应用^[7]。此外，fNIRS信号的解析度相对较低，可能影响对细微脑功能变化的检测^[7]。因此，如何提高fNIRS技术的灵敏度和特异性，以及如何将fNIRS与其他神经成像技术相结合，是未来研究需要解决的关键问题^[4]。

本综述旨在综合分析fNIRS技术在精神分裂症研究中的应用现状，探讨其在精神分裂症诊断、治疗监测以及作为生物标志物的潜力，并讨论fNIRS技术在精神分裂症研究中面临的挑战和未来的发展方向。通过对现有文献的系统梳理，我们期望为精神分裂症的临床诊断和治疗提供新的视角，并为未来的研究提供指导^[8]。

一、fNIRS技术概述

fNIRS技术是一种基于血液动力学的神经成像技术，它利用近红外光（NIR）穿透颅骨和脑组织的特性，通过检测脑组织中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的浓度变化来间接测量大脑活动^[9]。fNIRS的工作原理基于光的传输和检测机制：当近红外光照射到大脑时，氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白对不同波长的光有不同的吸收率，通过测量这些吸收率的变化，可以推断出脑血流和代谢活动的变化^[2]。

fNIRS技术的时间分辨率较高，可以实时监测大脑活动的变化，这对于研究快速变化的认知过程非常有用^[3]。空间分辨率相对较低，但近年来的技术进步已经显著提高了其空间定位的准确性^[10]。fNIRS的无创性使其成为研究儿童和无法进行侵入性检查的患者的理想选择。此外，fNIRS设备的便携性和相对较低的成本使其在临床和现场研究中具有广泛的应用潜力^[11]。

与其他神经成像技术相比，fNIRS具有独特的优势。例如，与fMRI相比，fNIRS对运动伪影的敏感性较低，更适合于研究儿童和活动受限的患者^[12]。与PET相比，fNIRS更为便携和经济，尽管PET在分子层面上提供了更丰富的信息^[13]。然而，fNIRS的局限性在于其穿透深度有限，主要局限于大脑皮层，这限制了其在深部脑结构研究中的应用^[14]。

在精神分裂症研究中，fNIRS技术因其无创性和便携性而显示出巨大的适用性和潜力。它可以用于评估精神分裂症患者在执行特定认知任务时的脑激活模式，从而揭示疾病相关的神经生物学机制^[6]。此外，fNIRS还可以用于监测精神分裂症患者的治疗反应，为个性化治疗提供依据^[5]。

二、fNIRS在精神分裂症脑激活研究中的应用

fNIRS技术因其无创性和对运动伪影的低敏感性，在精神分裂症脑激活研究中得到了广泛应用。本节将综述fNIRS在精神分裂症患者执行言语流畅性任务和社会认知任务时的脑激活模

式，并探讨这些数据如何帮助我们理解精神分裂症的神经生物学机制。

（一）言语流畅性任务中的脑激活模式

在言语流畅性任务中，fNIRS已被用于研究精神分裂症患者的脑激活模式。研究表明，在执行言语流畅性任务时，精神分裂症患者的前额叶和颞叶区域表现出异常的脑激活模式^[15]。这些异常可能与认知控制和语言生成过程中的功能障碍有关^[16]。进一步的fNIRS研究揭示了这些脑区在信息处理速度和工作记忆维持方面的特定缺陷^[17]。

（二）社会认知任务中的脑激活模式

社会认知任务，如面部表情识别和心智化任务，对于理解精神分裂症患者的社交障碍至关重要。fNIRS研究发现，在这些任务中，精神分裂症患者的颞顶联合区和前额叶显示出异常的脑激活^[18]。这些异常可能与社会认知缺陷有关，这是精神分裂症患者社交功能受损的核心特征^[18]。

（三）神经生物学机制的理解

fNIRS数据为我们提供了理解精神分裂症神经生物学机制的重要线索。通过fNIRS，研究人员能够观察到精神分裂症患者在执行特定认知任务时脑血流动力学的变化，这有助于揭示与认知功能障碍相关的神经通路和网络^[6]。此外，fNIRS还可用于研究药物治疗对脑激活模式的影响，从而为理解药物作用机制提供直接证据^[6]。

综上所述，fNIRS技术在精神分裂症脑激活研究中的应用展示了其在揭示疾病相关神经生物学机制方面的潜力。通过进一步的研究，fNIRS有望为精神分裂症的早期诊断、治疗监测和预后评估提供更深入的见解。

三、fNIRS在精神分裂症治疗监测中的应用

功能性近红外光谱成像（fNIRS）技术因其无创性和实时监测能力，在精神分裂症的药物治疗监测中显示出独特的应用价值。本节将分析fNIRS在监测药物治疗反应中的应用，并讨论其在评

估症状改善程度和个性化医疗中的潜力。

（一）药物治疗反应监测

fNIRS已被用于监测精神分裂症患者对药物治疗的反应。通过比较治疗前后的脑激活模式，fNIRS能够提供关于药物效果的直接信息^[19]。研究表明，抗精神病药物能够改变精神分裂症患者的脑血流动力学，特别是在前额叶和颞叶区域^[20]。这些变化与临床症状的改善相关联，为药物治疗效果提供了生物学标志^[21-23]。

（二）症状改善程度评估

fNIRS在评估精神分裂症患者症状改善程度中的价值逐渐被认识。通过监测特定认知任务中的脑激活变化，fNIRS有助于评估患者的认知功能和社交能力的变化^[19]。这种评估对于指导治疗计划和预测长期预后具有重要意义^[4]。

（三）个性化医疗和治疗效果预测

fNIRS技术在个性化医疗和治疗效果预测中具有巨大潜力。通过识别治疗反应的生物标志物，fNIRS有助于实现个体化治疗，优化药物选择和剂量调整^[6]。此外，fNIRS还可以用于预测治疗效果，为早期干预提供依据。

综上所述，fNIRS技术在精神分裂症治疗监测中的应用强调了其在评估药物治疗效果和指导个体化治疗中的重要性。随着技术的进步和研究的深入，fNIRS有望在精神分裂症的临床治疗中发挥更大的作用。

四、fNIRS作为精神分裂症生物标志物的潜力

fNIRS作为一种新兴的神经成像技术，其在精神分裂症的生物标志物研究中显示出巨大的潜力。本节将探讨fNIRS信号在识别和辅助诊断精神分裂症的可能性，以及其在区分精神分裂症与其他精神疾病中的诊断价值，并分析fNIRS作为生物标志物的敏感性和特异性。

（一）识别和辅助诊断的生物标志物

fNIRS信号已被研究作为精神分裂症的潜在生物标志物。研究表明，精神分裂症患者在特定认知任务中的脑激活模式与健康对照组存在显著差异，这些差异可能作为识别精神分裂症的生物标志物^[6]。fNIRS能够检测到这些脑功能异常，为早期诊断和干预提供可能^[8]。

（二）区分精神分裂症与其他精神疾病

在精神疾病的鉴别诊断中，fNIRS显示出其独特的价值。通过比较精神分裂症患者与其他精神疾病患者（如双相情感障碍、抑郁症）在特定任务中的脑激活模式，fNIRS有助于提高诊断的准确性^[24]。这种区分对于制定正确的治疗计划和改善患者预后至关重要。

（三）生物标志物的敏感性和特异性

fNIRS作为生物标志物的敏感性和特异性是其在临床应用中的关键。最新的研究进展表明，通过优化算法和分析方法，fNIRS技术在检测精神分裂症方面的敏感性和特异性得到了显著提高^[15]。这为fNIRS作为可靠的生物标志物提供了科学依据。

综上所述，fNIRS技术在精神分裂症的诊断中扮演着越来越

重要的角色。随着技术的进一步发展和研究的深入，fNIRS有望成为精神分裂症早期诊断和精准医疗的重要工具。

五、fNIRS技术的限制与未来方向

fNIRS技术在精神分裂症研究中取得了显著进展，但仍存在一些限制和挑战。本节将分析fNIRS技术在精神分裂症研究中的限制，并展望其未来发展方向，同时讨论如何克服当前限制和未来研究可能采取的新方法和技术。

（一）技术限制分析

fNIRS技术的主要限制之一是其检测深度，主要局限于大脑皮层，这限制了其在深部脑结构研究中的应用^[7]。此外，fNIRS的信号解析度相对较低，可能影响对细微脑功能变化的检测^[2]。这些限制对于理解精神分裂症的复杂神经生物学机制构成了挑战。

（二）未来发展方向

未来fNIRS技术的发展可能会集中在提高检测深度和信号解析度上。通过技术改进，如使用更高功率的光源和更敏感的探测器，可以增强fNIRS对深部脑结构的探测能力^[25]。同时，结合机器学习和人工智能算法，可以提高fNIRS数据的分析精度和可靠性^[26]。

（三）克服限制的新方法和技术

为了克服当前限制，未来的研究可能会探索fNIRS与其他神经成像技术的联合使用，如fMRI和EEG，以获得更全面的大脑活动信息^[27]。此外，开发新的光源和探测器技术，以及改进光传播模型，也是提高fNIRS性能的重要方向^[28]。

综上所述，尽管fNIRS技术在精神分裂症研究中存在一些限制，但通过不断的技术创新和方法改进，fNIRS有望在未来的神经科学研究中发挥更大的作用。

六、结论

本文综述了fNIRS技术在精神分裂症研究中的主要发现和应用价值。fNIRS作为一种无创、便携的神经成像技术，已经在精神分裂症的脑激活模式研究、药物治疗监测、症状改善评估以及生物标志物的识别中显示出其独特的优势和潜力^[29]。

fNIRS技术使我们能够更深入地理解精神分裂症患者脑功能的变化，尤其是在言语流畅性和社会认知任务中^[30]。此外，fNIRS在监测药物治疗反应和评估症状改善程度方面提供了有价值的信息，有助于实现个体化治疗和治疗效果预测^[24]。fNIRS作为生物标志物的潜力也得到了初步验证，为精神分裂症的早期诊断和预后评估提供了新的可能性^[15]。

尽管fNIRS技术取得了显著进展，但仍存在一些限制，如检测深度和信号解析度^[2]。因此，进一步的研究是必要的，以充分挖掘fNIRS在精神分裂症诊治中的潜力。未来的研究需要集中于提高fNIRS技术的灵敏度和特异性，以及探索其与其他神经成像技术的联合使用^[8]。

综上所述，fNIRS技术在精神分裂症研究中的重要性不言而喻。随着技术的不断进步和研究的深入，fNIRS有望在未来的精神分裂症研究中发挥更大的作用，为临床诊断和治疗提供更有力的支持^[7]。

参考文献

- [1].Saha, S., et al., A systematic review of the prevalence of schizophrenia. *PLoS Med*, 2005. 2(5): p. e141.
- [2].Huppert, T.J., et al., HomER: a review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain. *Appl Opt*, 2009. 48(10): p. D280–98.
- [3].Scholkmann, F., et al., A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. *Neuroimage*, 2014. 85 Pt 1: p. 6–27.
- [4].Strangman, G., et al., A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *Neuroimage*, 2002. 17(2): p. 719–31.
- [5].Yanagi, M., et al., A decrease in spontaneous activity in medial prefrontal cortex is associated with sustained hallucinations in chronic schizophrenia: An NIRS study. *Sci Rep*, 2020. 10(1): p. 9569.
- [6].Koike, S., et al., Near-infrared spectroscopy in schizophrenia: a possible biomarker for predicting clinical outcome and treatment response. *Front Psychiatry*, 2013. 4: p. 145.
- [7].Ferrari, M. and V. Quaresima, A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage*, 2012. 63(2): p. 921–35.
- [8].Scholkmann, F., et al., How to detect and reduce movement artifacts in near-infrared imaging using moving standard deviation and spline interpolation. *Physiol Meas*, 2010. 31(5): p. 649–62.
- [9].Boas, D.A., et al., Twenty years of functional near-infrared spectroscopy: introduction for the special issue. *Neuroimage*, 2014. 85 Pt 1: p. 1–5.
- [10].Pinti, P., et al., Non-invasive optical imaging of brain function with fNIRS: Current status and way forward, in *Encyclopedia of the Human Brain* (Second Edition), J.H. Grafman, J.H. Grafman'Editors. 2025, Elsevier: Oxford. p. 96–120.
- [11].Zepeda, A., C. Arias and F. Sengpiel, Optical imaging of intrinsic signals: recent developments in the methodology and its applications. *J Neurosci Methods*, 2004. 136(1): p. 1–21.
- [12].Condy, E.E., et al., Characterizing the Action–Observation Network Through Functional Near-Infrared Spectroscopy: A Review. *Front Hum Neurosci*, 2021. 15: p. 627983.
- [13].Barker, J.W., A. Aarabi and T.J. Huppert, Autoregressive model based algorithm for correcting motion and serially correlated errors in fNIRS. *Biomed Opt Express*, 2013. 4(8): p. 1366–79.
- [14].Jahani, S., et al., fNIRS can robustly measure brain activity during memory encoding and retrieval in healthy subjects. *Sci Rep*, 2017. 7(1): p. 9533.
- [15].Kumar, V., et al., Functional near infra-red spectroscopy (fNIRS) in schizophrenia: A review. *Asian J Psychiatr*, 2017. 27: p. 18–31.
- [16].Rockstroh, B.S., et al., Abnormal oscillatory brain dynamics in schizophrenia: a sign of deviant communication in neural network? *BMC Psychiatry*, 2007.
- [17].Ye, X., et al., Hotspots and trends in fNIRS disease research: A bibliometric analysis. *Front Neurosci*, 2023. 17: p. 1097002.
- [18].Marwick, K. and J. Hall, Social cognition in schizophrenia: a review of face processing. *Br Med Bull*, 2008. 88(1): p. 43–58.
- [19].Takizawa, R., et al., Neuroimaging-aided differential diagnosis of the depressive state. *Neuroimage*, 2014. 85 Pt 1: p. 498–507.
- [20].Sharafi, M., Comparison of Classical and Clozapine Treatment on Schizophrenia Using Positive and Negative Syndrome Scale of Schizophrenia (PANSS) and SPECT Imaging. *Int J Med Sci*, 2005. 2(2): p. 79–86.
- [21].Legend, C.S., et al., Heritability of Cerebral Blood Flow and the Correlation to Schizophrenia Spectrum Disorders: A Pseudo-continuous Arterial Spin Labeling Twin Study. *Schizophr Bull*, 2019. 45(6): p. 1231–1241.
- [22].McIntyre, R.S., et al., Expert Consensus on Screening and Assessment of Cognition in Psychiatry. *CNS Spectr*, 2019. 24(1): p. 154–162.
- [23].Aguera-Ortiz, L., et al., Focus on Depression in Parkinson's Disease: A Delphi Consensus of Experts in Psychiatry, Neurology, and Geriatrics. *Parkinsons Dis*, 2021. 2021: p. 6621991.
- [24].Tran, B.X., et al., Differentiating people with schizophrenia from healthy controls in a developing Country: An evaluation of portable functional near infrared spectroscopy (fNIRS) as an adjunct diagnostic tool. *Front Psychiatry*, 2023. 14: p. 1061284.
- [25].Yucel, M.A., et al., Best practices for fNIRS publications. *Neurophotonics*, 2021. 8(1): p. 012101.
- [26].Cao, J., E.M. Garro and Y. Zhao, EEG/fNIRS Based Workload Classification Using Functional Brain Connectivity and Machine Learning. *Sensors (Basel)*, 2022. 22(19).
- [27].Doherty, E.J., et al., Interdisciplinary views of fNIRS: Current advancements, equity challenges, and an agenda for future needs of a diverse fNIRS research community. *Front Integr Neurosci*, 2023. 17: p. 1059679.
- [28].Y., W. and C. W., Systematic Analysis for fNIRS Measurement Combining Sensitivity and SNR Based on the Colin27 Brain Template. *IEEE Photonics Journal*, 2020. 12(4): p. 1–13.
- [29].Balconi, M., A. Frezza and M.E. Vanutelli, Emotion Regulation in Schizophrenia: A Pilot Clinical Intervention as Assessed by EEG and Optical Imaging (Functional Near-Infrared Spectroscopy). *Front Hum Neurosci*, 2018. 12: p. 395.
- [30].Li, R., et al., Current opinions on the present and future use of functional near-infrared spectroscopy in psychiatry. *Neurophotonics*, 2023. 10(1): p. 013505.