

事件相关电位评估电磁辐射环境对人脑认知功能影响的优势和不足

龚宇康 谢 杭 程 聪 文佳鹏 李 响 宋 健 徐国政

【摘要】随着生活水平的提高及现代科技的发展,各种电磁设备广泛的应用使人们越来越多的暴露在电磁辐射中。目前,关于电磁辐射对人脑认知功能有无影响,存在不同观点,并且传统评价人脑认知功能的方法,如评估量表、行为学测试,受主观因素及外界影响误差较大,难以发现微小的认知功能改变。事件相关电位技术是一种更为客观、灵敏、经济、全面地评估认知功能的方法。本文对事件相关电位技术评估电磁辐射环境对人脑认知功能影响的优势和不足进行综述,为预防和治疗电磁辐射环境引起的相关疾病提供参考。

【关键词】电磁辐射;事件相关电位技术;认知功能

【文章编号】1009-153X(2024)12-0747-04 【文献标志码】A 【中国图书资料分类号】R 651

Advantages and disadvantages of event-related potential in assessing the influence of the electromagnetic radiation environment on human brain cognitive function

GONG YU-kang^{1,2}, XIE Hang^{1,2}, CHENG Cong^{1,2}, WEN Jia-peng^{1,2}, LI Xiang^{1,3}, SONG Jian², XU Guo-zheng². 1. Medical College, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Department of Neurosurgery, General Hospital of Central Theater Command, PLA, Wuhan 430070, China; 3. Hubei University of Medicine, Shiyan 442000, China

【Abstract】With the advancement of living standards and the development of modern science and technology, the extensive application of various electromagnetic devices has exposed people to electromagnetic radiation to an increasing extent. At present, there exist diverse opinions regarding whether electromagnetic radiation has any influence on human brain cognitive functions. Additionally, traditional methods for evaluating human brain cognitive functions, such as assessment scales and behavioral tests, are prone to considerable errors due to subjective factors and external influences, making it challenging to detect subtle changes in cognitive functions. Event-related potential technology is a more objective, sensitive, economical, and comprehensive approach for assessing cognitive functions. This paper reviews the strengths and weaknesses of using event-related potential technology to assess the impact of electromagnetic radiation environments on human brain cognitive functions, providing references for the prevention and treatment of related diseases caused by electromagnetic radiation environments.

【Key words】Cognitive function; Electromagnetic radiation; Event-related potentials

随着生活水平的提高、现代科技的发展,各种电磁设备广泛应用,小到 WIFI 热点、手机、家用电器及设备,大至军事领域的新型高科技武器,这些电磁设备早已成为了人类生活中不可或缺的一部分,但这些设备运作时产生的电磁辐射环境通常难以避免。长期处于电磁辐射环境对人脑功能的影响的关注度越来越高。在不同国家的城市地区,包括射频电磁场在内的多源电磁辐射量均处于高水平^[1]。这使得

人们越来越多的暴露在电磁辐射中。世卫组织/国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)于 2011 年 5 月将射频电磁场列为可能导致人类罹患癌症的物质(2B 类),同时 IARC 网站列出的 314 种 2B 类致癌物中也包含极低频电磁场^[2-3]。研究显示,长期暴露于高功率辐射环境下会增加皮肤癌患病风险^[4],使用连接 wifi 的笔记本电脑会降低精子活性并且会增加精子 DNA 的断裂^[5]。2017 年,一项荟萃分析显示,长期使用手机(超过 10 年)与胶质瘤风险呈显著正相关,其中低级别胶质瘤发生概率将增加 2.22 倍^[6]。中枢神经系统被认为最易受到电磁辐射的影响^[7]。目前,关于电磁辐射对人脑认知功能有无影响存在不同观点。2009 年, Rongen 等^[8]在射频电磁场对人体神经系统的影响一文中指出,暴露于全球移动通信系统型信号可能会

doi:10.13798/j.issn.1009-153X.2024.12.010
作者单位:430065 武汉,武汉科技大学医学部医学院(龚宇康、谢杭、程 聪、文佳鹏);430070 武汉,中国人民解放军中部战区总医院神经外科(龚宇康、谢 杭、程 聪、文佳鹏、宋 健、徐国政);442000 十堰,湖北医药学院(李 响)
通信作者:徐国政,Email: xu-gz@163.com

对大脑活动产生轻微影响,但尚未观察到对成人认知能力产生与之相应且显著的影响,并且尚未证实头痛和偏头痛、疲劳和皮肤瘙痒等各种主观症状与家庭和工作中的各种射频源暴露之间存在因果关系。2011 年,Sauter 等^[9]认为手机发射的电磁场对认知功能可能产生影响。有研究表明受微波辐射照射大鼠的空间学习和记忆表现显著下降^[10],微波辐射的急性暴露会激活小胶质细胞炎症来损害小鼠注意力过程^[11]。由于电磁辐射导致的人脑认知功能损害通常是隐匿和细微的,往往容易被忽视,并且传统评价人脑认知功能手段通常采用评估量表、行为学测试以及 MRI 等,受主观因素或外界影响较大,并且 MRI 所反映的大脑功能往往只有在大脑产生器质性病变时才容易被发现。事件相关电位(event-related potentials, ERPs)技术是一种更为客观、灵敏、经济、全面地评估认知功能的方法。本文对 ERPs 技术评估电磁辐射环境对人脑认知功能影响的优势和不足进行综述,为预防和治疗电磁辐射环境引起的相关疾病提供参考。

1 电磁辐射环境

辐射主要分为电离辐射和非电离辐射。电磁辐射是以波的形式传播的能量^[12]。雷电、宇宙射线、太阳热辐射、地球热辐射、静电辐射、电磁设备等均可以产生电磁辐射^[13]。生活中常见设备的辐射频率:电脑为 300 Hz~10 MHz;移动基站为 80~900 MHz;电视为 54~700 MHz;手机为 0.9~2.45 GHz;移动路由器为 2.4 GHz;蓝牙为 2.45 GHz;雷达为 1~100 GHz。目前认为电磁辐射对人体影响主要形式是:热效应、非热效应及累计效应^[14]。其产生的生物学效应强弱可能取决于设备的工作频率、微波强度以及暴露时间^[15],一般而言频率越高、强度越大,电磁波携带的能量越高,从而产生的生物学效应越强,暴露时间越长其影响越大。

2 ERPs

ERPs 技术是在脑电的基础上针对特定事件提纯的脑电信号,一般是指外部刺激作用于感觉系统或脑的某一特定部位,在给予刺激任务或撤除刺激任务时,在对应脑区引起的相应电位变化^[16]。根据外部刺激范式的类型去反映相应认知功能改变。

2.1 GO/NOGO 范式 其流程:屏幕中央每隔 750 ms 会出现一次 maker 刺激,每次刺激持续约 50 ms;当出现双三角(GO 刺激)时,被试需做出按键反映,单

三角(NOGO 刺激)时不反应。GO/NOGO 范式主要用来反映人脑认知功能中的执行控制功能。

GO/NOGO 范式通过引出 N2、P3 成分来反映执行控制功能,N2 主要出现在刺激后 200~300 ms,主要由重复出现的非靶向刺激所诱发,其主要分布在额中央区位置,与反映抑制相关;P3 主要出现在刺激后 300~500 ms,主要分布于前额叶及前扣带回,作为资源分配的常用指标。被试在任务中投入的努力越多,P3 振幅就越大。Candrian 等^[17]采用 GO/NOGO 范式记录轻型颅脑损伤后 1 周、3 个月及 1 年时 P3 波幅的变化,结果显示伤后 1 周 P3 振幅明显降低,伤后 3 个月及伤后 1 年 P3 振幅无明显变化。这表明轻型颅脑损伤后 1 周,执行控制功能下降;伤后 3 个月及伤后 1 年,执行控制功能恢复。有学者采用 GO/NOGO 范式对长期暴露在高海拔地区人员的相关研究表明长期暴露在高海拔地区人员,其 alpha 和 beta 频段的事件相关去同步化电位降低,而 theta 的事件相关同步化电位不受海拔高度影响^[18]。这表明高海拔地区的缺氧条件可能会导致大脑皮层参与减少,从而损伤认知加工过程。

2.2 ANT 范式 其流程:被试者要求注视屏幕中央的“+”,400~1 600 ms 后会出现约 100 ms 的提示刺激,且提示刺激分为四种情况:提示出现在标记“+”的上方或下方(空间提示);同时出现在上方和下方(双重提示);出现在中间位置(中央提示);无提示出现(无提示),400 ms 后出现目标刺激,目标刺激由出现在标记“+”上下的五个水平指向箭头或直线组成,被试对中间箭头的方向进行判断并点击鼠标对应左右键,每次持续时间为 3600 ms。

ANT 范式结合了时间和空间提示来评估人脑警觉和定向注意网络功能,通过侧翼一致性范式来评估执行控制功能。其中与双提示相比,无提示后对目标刺激的 RT 差异表示警觉网络的处理效率。与空间提示相比,中心提示后目标刺激的 RT 差异表示定向网络的处理效率,目标不一致与一致的 RT 差异表示执行控制网络的处理效率,P3 振幅用来评估警觉和定向网络,正确和错误反应产生的差异波幅用来评估执行控制功能。研究表明,无论环境如何,低强度的漫步均能增强警觉功能,但是在让人感觉轻松愉悦的大自然环境中漫步 40 min 与在城市中漫步 40 min 相比,其执行控制功能会有所改善^[19]。

2.3 n-back 范式 其流程:屏幕中央约每隔 2 500 ms 随机出现一个持续约 500 ms 的字母或数字,要求被试将刚刚出现过的刺激与前面第 n 个刺激进行对

比,若相同则点击鼠标左键,若不同则点击右键,每个模块约 5 min。

n-back 范式主要用来反映人脑工作记忆功能,最早由 Kirchner 于 1958 年提出。P1 和 N1 成分受注意力调节,与刺激的早期处理有关,其中 P1 反映感官选择,N1 索引注意力的方向。P2 与工作记忆过程相关,其反映了工作记忆上下更新的启动。P3 则反映了工作记忆更新过程中的响应选择和维护。一项采用 n-back 范式关于长期压力环境下人脑工作记忆的研究表示,长期压力会影响人脑工作记忆功能中注意力和上下更新的启动^[20]。

2.4 emotion 范式 流程:屏幕中央会随机出现三种类型图片,分别为积极、中性、消极,每个图片呈现 500 ms,间隔时间为 1 000 ms,共 45 张图片,被试要求认真观看每一张图片,并心中将三种图片归类。

emotion 范式主要反映人脑情绪识别功能,会引出 P1、N1/N170、N2 和 P3 等相关 ERPs 成分。目前,较为受关注的主要有两个成分:一是早期后部负波,主要出现在枕叶皮层 N2 潜伏期范围内,与情绪诱导刺激相关,尤其是正性刺激,反映情绪诱导刺激所需要调用的额外感知觉处理;另一个是晚期正电位,主要反映情绪相关刺激的内在任务关联效应。有项基于 ERPs 技术和 emotion 的研究显示,合并抑郁的阻塞性睡眠呼吸暂停-低通气综合征的 N170 潜伏期增加,表示其面部情绪识别能力受损,N170 潜伏期增加可能是一个潜在的生物标志物,表明存在面部识别缺陷以及其他认知障碍^[21]。

3 ERPs 的优势与不足

3.1 优势 第一,也是其最具优势的点在于,ERPs 具有高度的时间分辨率,能提供一种始于刺激之前(反应大脑状态的信息)并延伸至反应之后(体现了决定大脑如何处理后续试次的执行过程)的连续性测量手段,能无创性连续同步记录神经元群的电活动,其时间精度可达到毫秒级,能发现细微和隐匿的人脑功能改变。第二,锁时性,既特定刺激后能够产生相应的 ERPs 成分,从而去推断特定实验调控对认知过程的影响。第三,ERPs 记录提供的数据信息十分丰富,能识别多个认知神经过程,能够清楚地表明某个给定的实验调控实际上影响了多个不同的过程(既多个不同的 ERPs 成分)。第四,认知过程的内隐性测量,当被试由于某些情况无法做出反应时,例如婴儿由于太小而无法根据指令做出反应或因神经疾病而无法做出行为学反应的病人,ERPs 技术仍然能够

继续记录人脑信息。

3.2 不足 第一,叠加问题,也是最常见的一点,即头皮上记录的波形代表了诸多潜在成分的总和,同时很难判断这些潜在成分的神经源活动位置。第二,有些心理和神经过程可能并不存在相对应的 ERPs 成分,只有在满足特定生物物理条件时,ERPs 才会出现,大脑活动中仅有一小部分满足这些条件。第三,为了精确测量到特定的 ERPs,通常需要多个试次,因此需要增加被试数量(样本量通常 10~20 个)和试次(通常需要 10~500 试次)。第四,需要锁时且可测量的刺激信息,例如刺激的起始时刻点是渐变的,通常无法使用,但常规的认知或者情感类实验允许存在 10 ms 的误差。第五,由于非神经因素(例如皮肤电位)会导致头皮电位出现大幅度的缓慢飘逸,这些飘逸在刺激点之后随时间推移,会在波形中引入越来越多的变化,因此 ERPs 通常很难测量延伸至几秒钟之外的大脑活动,例如长程记忆巩固。同时头部、嘴巴及眼球或者肌肉运动、噪音、心电、被试疲劳情况均会影响实验结果,因此需要在采集前被试需休息良好,采集时通常需要选取安静且舒适的环境,嘱咐被试尽量避免眨眼、频繁晃动等肢体动作。但是对于事件相关电位的局限性,大多数局限之处都存在很多方法去克服或回避。

目前,电磁辐射环境对人脑认知功能损伤,大部分症状隐匿或仅有头晕、恶心、头痛等轻微症状,相关影像学检查例如 CT、MR 结果通常为阴性,不能发现细微的认知功能障碍,从而被忽视,而传统的神经心理测试评估认知损伤程度受外界及主观因素影响太大,敏感性和有效性太低。ERPs 技术能发现这一类“亚健康”的认知功能改变,从而去明确电磁辐射环境对人脑功能的潜在影响,为预防和治疗电磁辐射环境引起的相关疾病提供科学依据。

【利益冲突声明】:本文不存在任何利益冲突

【作者贡献声明】:龚宇康负责文章构思、撰写及修改;谢杭、程聪、文佳鹏、李响负责文献查阅;宋健、徐国政负责文章审阅。

【参考文献】

[1] SAGAR S, ADEM SM, STRUCHEN B, *et al.* Comparison of radiofrequency electromagnetic field exposure levels in different everyday microenvironments in an international context [J]. *Environ Int*, 2018, 114: 297-306.

[2] BELPOMME D, HARDELL L, BELYAEV I, *et al.* Thermal and non-thermal health effects of low intensity non-ionizing radiation: an international perspective [J]. *Environ Pollut*, 2018, 242: 643-658.

[3] HARDELL L. World health organization, radiofrequency radiation and health--a hard nut to crack (review) [J]. *Int J Oncol*, 2017, 51 (2): 405-413.

[4] MUMTAZ S, BHARTIYA P, KAUSHIK N, *et al.* Pulsed high-power microwaves do not impair the functions of skin normal and cancer cells in vitro: a short-term biological evaluation [J]. *J Adv Res*, 2020, 22: 47-55.

[5] AVENDAEO C, MATA A, SANCHEZ-SARMIENTO CA, *et al.* Use of laptop computers connected to internet through wi-fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation [J]. *Fertil Steril*, 2012, 97(1): 39-45.e2.

[6] YANG M, GUO W, YANG C, *et al.* Mobile phone use and glioma risk: a systematic review and meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2017, 12 (5): e0175136.

[7] LIN JC. The microwave auditory effect [J]. *IEEE J Electromag RF Microwaves Med Biol*, 2022, 6(1): 16-28.

[8] VAN RONGEN E, CROFT R, JUUTILAINEN J, *et al.* Effects of radiofrequency electromagnetic fields on the human nervous system [J]. *J Toxicol Environ Health, Part B*, 2009, 12(8): 572-597.

[9] SAUTER C, DORN H, BAHR A, *et al.* Effects of exposure to electromagnetic fields emitted by GSM 900 and WCDMA mobile phones on cognitive function in young male subjects [J]. *Bioelectromagnetics*, 2011, 32(3): 179-190.

[10] LI M, WANG Y, ZHANG Y, *et al.* Elevation of plasma corticosterone levels and hippocampal glucocorticoid receptor translocation in rats: a potential mechanism for cognition impairment following chronic low-power-density microwave exposure [J]. *J Radiat Res*, 2008, 49(2): 163-170.

[11] JIANG S, MA Y, SHI Y, *et al.* Acute exposure of microwave impairs attention process by activating microglial inflammation [J]. *Cell Biosci*, 2024, 14(1): 2.

[12] TONNESSEN BH, POUNDS L. Radiation physics [J]. *J Vasc Surg*, 2011, 53(1): 6S-8S.

[13] KOCAMAN A, ALTUN G, KAPLAN AA, *et al.* Genotoxic and carcinogenic effects of non-ionizing electromagnetic fields [J]. *Environ Res*, 2018, 163: 71-79.

[14] LUO MX, ZHANG PX, MA XW, *et al.* Electromagnetic radiation and electromagnetic protection [J]. *China Person Protec Equip*, 2009, (5vo): 26-30.
罗穆夏, 张普选, 马晓薇, 等. 电磁辐射与电磁防护[J]. 中国个体防护装备, 2009, (5 vo): 26-30.

[15] MUMTAZ S, RANA JN, CHOI EH, *et al.* Microwave radiation and the brain: mechanisms, current status, and future prospects [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(16): 9288.

[16] DENG X, YANG C, XU J, *et al.* Bridging event-related potentials with behavioral studies in motor learning [J]. *Front Integr Neurosci*, 2023, 17: 1161918.

[17] CANDRIAN G, MELLER A, DALL'ACQUA P, *et al.* Longitudinal study of a NoGo-P3 event-related potential component following mild traumatic brain injury in adults [J]. *Ann Phys Rehabil Med*, 2018, 61(1): 18-26.

[18] HOU J, WANG C, JIA L, *et al.* Long-term exposure to high altitude reduces alpha and beta bands event-related desynchronization in a go/NoGo task [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 19719.

[19] MCDONNELL AS, STRAYER DL. Immersion in nature enhances neural indices of executive attention [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 1845.

[20] YUAN Y, LEUNG AWS, DUAN H, *et al.* The effects of long-term stress on neural dynamics of working memory processing: an investigation using ERP [J]. *Sci Rep*, 2016, 6(1): 23217.

[21] LI Z, CAI S, QIAO J, *et al.* Implications of depressive mood in OSAHS patients: insights from event-related potential [J]. *BMC Psychiatry*, 2024, 24(1): 307.

(2024-09-25 收稿, 2024-11-12 修回)