

• 研究构想(Conceptual Framework) •

持续性注意低频波动的机制与干预*

王一峰 唐雨竹 肖坤辰 荆秀娟

(四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都 610066)

摘要 持续性注意是个体在一段时间内将注意保持在某个客体或活动上的能力,是顺利完成日常活动和工作、学习的关键。然而,随着时间的推移,注意水平会不断波动,对正在进行的活动产生负面影响。持续性注意的正常发展及其在神经、精神类疾病患者中的异常波动发生在多个亚慢波频率。现有研究把持续性注意的波动简化为有限认知资源的权衡和分配,难以涵盖其多种认知成分、多个波动频率的复杂特征。本研究旨在探究持续性注意低频波动的认知神经机制,包括:(1)探究持续性注意核心认知成分波动的脑时空特征,建构持续性注意的认知成分波动假说;(2)通过亚慢波经颅电刺激,从频率(时间)和靶点(空间)两方面探索基于持续性注意成分低频波动特征的干预机制,并验证提出的持续性注意的认知成分波动假说;(3)考察持续性注意和注意网络之间的交互作用,探索持续性注意的成分波动假说的外延。本研究有助于深化对持续性注意认知结构和神经波动时空特征的理解,并为持续性注意波动的精准干预提供重要参考。

关键词 持续性注意,脑时空特征,低频脑活动,亚慢波经颅电刺激,注意网络

分类号 B842

1 问题提出

持续性注意(sustained attention)是个体长时间将注意保持在特定刺激或任务上,以完成目标导向行为的能力(Qiao et al., 2022)。Mackworth 最早使用“警觉”(vigilance)这一术语代表持续性注意(Mackworth, 1948)。目前仍有很多研究者将持续性注意等同于警觉(Neigel et al., 2019; Sarter et al., 2001)。然而,持续性注意过程中需要将注意集中在正在从事的任务上,同时抵抗环境中的干扰。这至少需要三种认知功能共同工作:监测和评价正在进行的认知过程、激活与任务相关的过程、抑制与任务无关的过程(Clayton et al., 2015)。从这个意义上讲,持续性注意是一种包含多种成分的复杂注意功能。人们在执行持续性注意任务

时,往往会出现警觉下降和心智游移等现象,具体表现为对手头任务的反应时延长和准确率下降以及产生与任务相关或无关的想法(Jin et al., 2019; Martínez-Pérez et al., 2023; Smallwood & Schooler, 2015)。执行控制能够通过常规反应倾向的抑制控制减少心智游移,维持任务目标(Thomson et al., 2015)。由此可见,除了警觉成分,持续性注意还包含抑制控制、心智游移等不同成分。

持续性注意会随时间的流逝不断波动。在生活中,即使是短暂的注意波动也可能产生广泛的负面影响,如学习成绩下降、工作失误,甚至造成安全隐患。在心理学实验中,注意波动不仅会影响抑制控制、知觉检测等多种认知过程,也会影响实验操作的稳定性,是心理学研究中可重复性危机的可能原因之一(Draheim et al., 2019)。近年来,一系列基于渐变式连续操作任务(gradual-onset continuous performance task, gradCPT)的研究表明,持续性注意中主要存在警觉下降和注意波动两种不同时间尺度的波动(Esterman & Rothlein, 2019)。也有人把持续性注意的波动划分为相对集中的“专注状态”和相对分心的“非专注状态”(Esterman

收稿日期: 2024-11-13

* 国家自然科学基金面上项目(32471101, 62177035)、四川省科技教育联合基金面上项目(2024NSFSC2086)资助。

通信作者: 王一峰, E-mail: wyf@sicnu.edu.cn;

荆秀娟, E-mail: jxjsicnu@163.com

et al., 2013)。此外,持续性注意在正常人群中的发展及其在多动症、孤独症等患者中的异常波动发生在多个亚慢波频率(Adamo et al., 2014)。奇怪的是,目前尚无研究把功能状态的波动和波动频率联系起来,似乎二者互不相干。

在真实场景中,持续性注意还参与到各种各样的认知任务中,其波动往往受到心智游移、情绪、唤醒水平、动机、努力等因素的影响,呈现出复杂而独特的时间尺度特征(Esterman & Rothlein, 2019; Fortenbaugh et al., 2017; Hasenkamp et al., 2012; Irrmischer et al., 2018)。例如,在一项探究奖惩预期对持续性注意影响的研究中,研究者发现奖励和适度的惩罚会通过影响持续性注意的不同成分而减少持续性注意的波动(张晓, 2022)。这说明,在不同的认知任务中,持续性注意的总体波动特征会因其各成分的权重不同而有所差异。因此,阐明持续性注意中的不同认知成分的波动特征以及它们与其他认知功能的交互作用机制对理解持续性注意的波动随情境变化的现象至关重要。

已有研究开发的稳态组块范式不仅实现了对单一认知任务的连续稳定操纵,还有效分离了不同注意成分及其相互作用(Wang et al., 2015; Wang et al., 2016),为探究不同认知任务场景下的持续性注意波动、解码持续性注意的成分提供了合适的工具。亚慢波脑活动与持续性注意波动的频率相吻合(Esterman & Rothlein, 2019; Qiao et al., 2022)。根据亚慢波段行为-生理-神经信号波动的相似性(Palva & Palva, 2012),本研究认为相同时间尺度上脑活动的效率与认知操作的效率相耦合可能是持续性注意波动的原因及底层机制。认知的频谱指纹假说(Siegel et al., 2012)认为,每种认知功能有其对应的神经回路,而每条神经回路有其最优工作频率,因而每种认知功能和其对应的神经活动会表现出相同而独特的宏观波动特征(Keitel & Gross, 2016)。据此,本研究提出“持续性注意中的不同认知成分主导不同波动特征”的观点。

综上所述,阐明持续性注意低频波动的认知神经机制十分重要。本研究认为,持续性注意中的不同认知成分既是可分离的,也是相互影响的。因此,本研究首先结合持续性注意研究的新范式与多模态数据,揭示持续性注意核心认知成分的低频波动特征;然后采用亚慢波无创脑刺激

为“不同认知成分有不同的波动特征”提供因果证据,优化持续性注意波动的干预方案;最后,根据持续性注意参与到其他认知任务中的实际情况,探讨其与其他注意功能交互作用的时空特征,阐明不同认知任务对持续性注意低频波动的影响,增进研究的生态效度与应用价值。

2 研究现状

2.1 持续性注意波动的理论解释

持续性注意水平随时间而下降和波动是持续性注意的重要特征。对此,主要有三类代表性的理论解释。资源消耗理论(resource-depletion/overload theory)认为,持续性注意水平下降是维持特定任务所需的认知资源枯竭的表现(Parasuraman & Mouloua, 1987)。个体完成任务时需要认知资源的参与,当资源恢复的速度跟不上消耗的速度时,认知资源就会耗尽,导致注意水平下降,任务表现变差(Warm et al., 2008)。然而,资源消耗理论无法解释资源消耗更少的简单任务比复杂任务的持续性注意水平下降更大的现象。对此,负荷不足理论(mindlessness/underload theory)强调任务的单调重复会导致个体的注意偏离任务,在完成任务时心智游移,从而导致注意水平下降(Smallwood, 2010)。两者从不同角度指出任务本身的复杂性影响个体投入到当前任务上的认知资源,但都没有有效分离个体所拥有的认知资源和投入到任务中的资源。资源控制理论(resource-control theory)进一步考虑了资源分配的灵活性,将持续性注意水平的变化解释为资源分配的结果,认为执行控制在其中起关键作用。注意资源总量是固定的,不会随着时间改变,但执行控制对任务目标的维持会随着时间的延长而减弱,导致分配到任务上的认知资源减少。此时,大脑会将任务释放的资源重新分配到任务无关的默认状态的加工上,产生更多心智游移(Thomson et al., 2015)。考虑到注意集中和心智游移之间的相互作用,资源控制理论认为,与执行注意网络相关的区域和默认网络区域会随着持续性注意水平的波动而波动(Fortenbaugh et al., 2017)。这一推论得到脑激活结果的支持:持续性注意波动与前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)为核心的额顶网络激活有关,ACC信号表现出先增强后缓慢下降达到基线的趋势。这既符合资源控制理论中“当持续性注意随着时间

推移而所需资源减少时,资源分配将有利于非任务的默认状态”的观点,也间接显示出持续性注意过程中的资源消耗存在波动。

上述理论在解释持续性注意的波动现象时,均将其简化为由于资源有限而不得不作出一些权衡和分配的过程,而没有讨论持续性注意不同成分在其中的作用。除了注意水平的整体变化,有研究者通过反应时变异性以及信号检测论的漏报、虚报等指标测量了注意波动、注意缺失、抑制控制等成分,但目前尚无研究揭示这些成分的低频波动特征(Jayakumar et al., 2023; Kucyi et al., 2017)。目前的持续性注意波动模型仅区分了警觉下降和注意波动这两类变化,并未将它们与上述认知成分联系起来(Esterman & Rothlein, 2019)。由此可见,研究者在理论和实证研究中均已关注到持续性注意存在多种波动特征、包含多种认知成分,但两部分研究彼此割裂。因此,将二者整合起来,考察持续性注意过程中不同认知成分的低频波动特征,有望系统阐明持续性注意低频波动的认知神经机制。

2.2 持续性注意波动的时间尺度

节律性是神经活动的基本特征之一。不同脑区之间主要通过节律性神经活动来进行信息交流以实现认知功能(Rosso et al., 2023)。注意的节律理论认为,不同的注意功能与不同的神经节律相联系(Fiebelkorn & Kastner, 2019)。比如, α 波与警觉、抑制控制等成分相关,而 β 波则与注意集中相关(Clayton et al., 2015)。传统的脑电节律虽然可以描述单一试次中的注意状态,但无法刻画注意状态在试次间随时间发生的变化。从试次间的波动看,持续性注意波动在小学阶段的发展主要表现为亚慢波降低,这与注意稳定性的增强有关(Lewis et al., 2017)。而多动症患者的持续性注意也在0.01~0.5 Hz的多个亚慢波频率上有异常波动(Karalunas et al., 2013)。有研究发现,亚慢波能够通过跨频率耦合(cross-frequency coupling, CFC)机制调节传统脑电节律(Monto et al., 2008; Thompson et al., 2014),但目前CFC的研究主要集中在传统脑电节律之间(Yakubov et al., 2022),亚慢波与高频振荡耦合的研究寥寥无几,这种耦合跟认知功能的关联还未得到有效揭示。因此,目前仍不清楚持续性注意在长时间尺度上缓慢波动的神经机制,以及这些波动如何调节每个试次的注意状态。

2.3 持续性注意波动的干预

持续性注意的波动不仅会对日常生活及工作、学习产生广泛的负面影响,其异常波动还常出现在多动症、孤独症以及情感障碍等神经、精神类疾病中(Hegerl & Hensch, 2014)。如何通过外部干预减少持续性注意的波动是心理康复、认知与脑调控等领域的重要问题之一。

通过无创的经颅刺激干预脑功能网络是解决该问题的重要研究方向。目前针对持续性注意的经颅刺激主要有两种类型。第一类干预强调空间靶点的重要性,但靶点与功能的关系并不明确。例如:有研究施加额叶经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)增加了心智游移,但未改善持续性注意的稳定性(Axelrod et al., 2015);左侧背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)的tDCS增加了心智游移,但未对注意焦点的元意识水平造成影响(Axelrod et al., 2018);右侧DLPFC和后顶叶的高精度tDCS调节了抑制控制功能,但没有减缓警觉水平的降低(Luna et al., 2020)。第二类则是通过夹带神经振荡来干预认知功能。研究者通常采用 θ 、 α 或 γ 波的经颅交流电刺激(transcranial alternating current stimulation, tACS)干预持续性注意的波动,但未得到一致的结果。Clayton等人发现,与伪刺激和 γ 刺激相比,顶枕区的 α -tACS促进了自上而下的控制,减弱了警觉随时间降低的趋势(Clayton et al., 2019)。其他研究者则发现, α 和 θ 频段的tACS均能提高唤醒水平,但只有 α 刺激提高了抑制控制水平(Martínez-Pérez et al., 2022)。Wei等人发现,通过tACS调节内侧和外侧PFC之间的 θ 同步可以因果性地降低警觉下降的幅度(Wei et al., 2021)。另一项研究在内侧PFC分别施加 α 和 θ 刺激,发现 α 刺激减少了警觉下降,但 θ 刺激加剧了警觉下降(van Schouwenburg et al., 2021)。虽然大部分研究认为 α -tACS能有效调节持续性注意,但其效应是阻止警觉下降还是增强抑制控制尚无定论。此外,基于传统脑电节律的干预有效调节了长时间的警觉下降,但没有探讨对持续性注意缓慢波动的影响。总体而言,这些结果暗示持续性注意包含多种成分,每种成分的神经回路、优势频段、脑区可能并不相同。因此,阐明不同成分的时间(频率)、空间(脑区和神经回路)特征对持续性注意的精准干预至关重要。

2.4 持续性注意和其他注意功能的交互作用

作为一种复杂注意功能,持续性注意需要通过基本注意功能的协作来实现。目前,对基本注意功能的一种主流分类方式是将其分为警觉、定向和执行控制三个注意网络(Posner & Petersen, 1990)。Posner 曾指出,持续性注意需要警觉的参与,可能会激活警觉网络(Posner & Petersen, 1990)。警觉网络可以分成紧张性(tonic)警觉和位相性(phasic)警觉,紧张性警觉是在没有线索和刺激提示下的一种持续稳定的警觉水平;位相性警觉一般由线索或刺激诱发,表现为瞬时警觉升高(Bast et al., 2018)。有研究者认为,由于紧张性警觉通常会贯穿整个任务,因此可以等同于持续性注意(Shalev et al., 2016)。Esterman 等人指出,在持续性注意任务中,个体需要长时间保持警觉,同时也需要执行控制来抑制分心,进而实现稳定的定向(Esterman & Rothlein, 2019)。此外,为了更好地研究不同成分之间的相互作用,有研究者把警觉分为唤醒成分和执行成分,执行成分的降低受到任务期间执行控制的调节(Luna et al., 2022)。可见,虽然有大量研究探讨了持续性注意与基本注意功能的关系,但他们并没有深入探讨持续性注意各成分与不同注意网络的相互作用及其波动特征。因此,探究持续性注意与注意网络的交互作用,考察持续性注意的波动如何因认知任务而异是解决持续性注意的独立性和生态效度必须解答的问题。

2.5 简要述评

综上所述,现有关于持续性注意波动的研究已初步揭示了持续性注意的持续时间与影响因素等,为本研究的顺利开展奠定了一定的基础。但是,目前仍然缺乏有效整合其多成分、多频率的波动特征的探究。

首先,持续性注意核心成分的波动特征及神经机制尚不明确。持续性注意是一种包含了警觉、抑制控制等多种成分的复合注意功能。然而,现有研究选择性地研究持续性注意的部分成分,甚至只研究总体表现,缺乏对其内部结构的系统研究;不同的研究在任务难度、反应概率、反应方式等方面的要求不同,造成了不同认知成分的权重在任务间的差异,导致不同研究的结果难以比较、实验结果难以重复。此外,持续性注意波动的发展及其在多动症中的异常多发生在亚慢波频

段,但目前的研究未对持续性注意中各核心认知成分的波动特征进行区分。对持续性注意核心认知成分低频波动特征的解码是阐明其内部结构的必由之路。

其次,目前暂无精准有效的方法减少持续性注意波动对认知任务的影响。基于传统脑电节律的干预虽然能够有效减缓长时间的警觉下降,但对持续性注意缓慢波动的影响仍不清楚。由于持续性注意波动的发展及其在多动症中的异常波动多发生在 0.05 Hz 附近,所以已有研究推断持续性注意核心成分的低频波动可能围绕在 0.05 Hz 附近,并在 0.05 Hz 施加振荡式 tDCS (Oscillatory-tDCS, O-tDCS),实现了对抑制控制和注意集中等成分波动的有效调节,其效应量远高于传统 tDCS (Qiao et al., 2022)。因此,根据脑功能活动的时空特征,在亚慢波段施加刺激进行精准干预或许能够有效提升干预效果。

最后,持续性注意与其他认知功能的交互作用对其波动性的影响尚不明确。持续性注意的研究通常采用连续操作范式,但日常生活中持续性注意的波动体现在执行各种认知任务的过程中,因此,要探究持续性注意的波动是否受到任务类型的影响,需使用稳态组块设计将这两种任务结合起来(Wang et al., 2016; Zhang et al., 2023)。由于不同认知功能之间既有独特的神经回路也有共享的神经回路,这导致认知功能之间存在广泛的关联(Sala & Gobet, 2019)。阐明持续性注意与其他认知功能的互动关系,将为理解不同脑网络之间的相互作用及其动态变化提供新启示。考虑到认知功能的种类繁多多样,考察持续性注意与基本注意功能的交互作用可能是解决这一问题的良好起点。

3 研究构想

本研究针对持续性注意低频波动的认知神经机制这一核心问题,结合行为、脑电、功能磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)等多模态技术和无创脑刺激方法,采用三个具体研究系统探索持续性注意核心认知成分的低频波动特征、干预机制以及与基本注意功能的交互作用。

研究一采用经典的 gradCPT 范式,结合行为-生理-神经波动特征,分离持续性注意中的不同认知成分,并根据不同成分的低频波动特征来建构持续性注意的成分波动理论。研究二则基于研

究一的结论,在持续性注意核心认知成分的优势频率、神经回路的关键靶点上施加亚慢波经颅电刺激(transcranial electric stimulation, TES),从频率(时间)和靶点(空间)两方面探索基于成分波动特征的干预机制、开发持续性注意的精准干预方案,并验证持续性注意成分波动理论。研究一与研究二相结合,为“不同认知成分有不同波动特征”的观点提供因果证据,建立和完善持续性注意的成分波动理论。研究三通过自主开发的高信度复合注意测验(High Reliability-Composite Attention Test, HR-CAT)考察持续性注意的波动在警觉、定向、执行控制和基线条件下的差异,探究持续性注意与注意网络之间的交互作用,探索持续性注意的成分波动理论的外延,提升研究的生态效度和实用价值。本研究的框架如图1所示。

3.1 研究一: 持续性注意核心认知成分的波动特征研究

以往研究发现持续性注意包含多个认知成分,

但并未将这些成分有效分离并揭示其波动特征。本研究操纵 gradCPT 的探针(不需反应的刺激),根据不同的行为-生理-神经波动特征,解码持续性注意的核心认知成分。

实验1旨在探究警觉和心智游移波动的神经生理特征。本研究通过两个单因素被试内实验建立警觉和心智游移低频波动的检测指标,同时揭示其波动特征。目前已知脑电的 θ 和 α 节律等指标与试次内的警觉水平直接关联(Fan et al., 2007),功能磁共振的全局信号(global signal, GS)与警觉波动相关(Falahpour et al., 2018),但没有公认的警觉低频波动的行为指标。由于持续性注意具有长时间尺度的特点,应该采用时间序列分析方法研究其低频波动特征;而要揭示不同时间尺度的脑活动特征,又需要同时涵盖时(频率)空(脑区)双维度的分析方法。已有研究已经基于认知频谱指纹假说提出了全局时空拓扑分析技术(如图2所示),适用于在时空双维度上衡量信号波动特征,

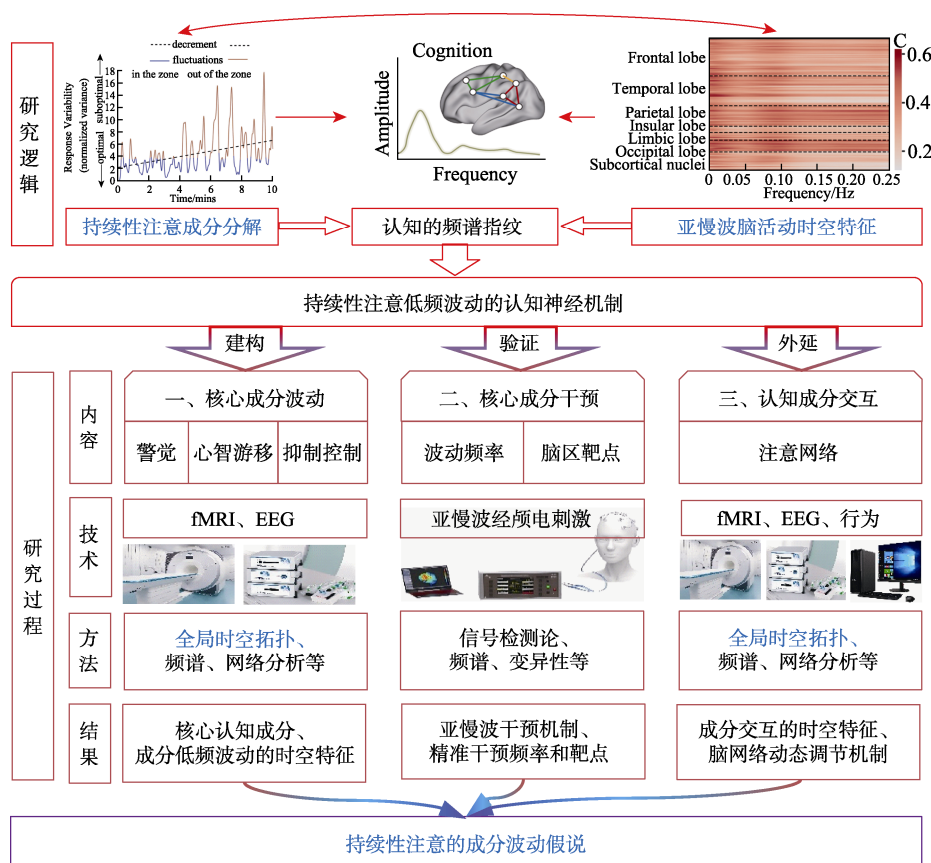


图1 研究框架图(蓝色部分为本研究创新之处。彩图见电子版,下同)

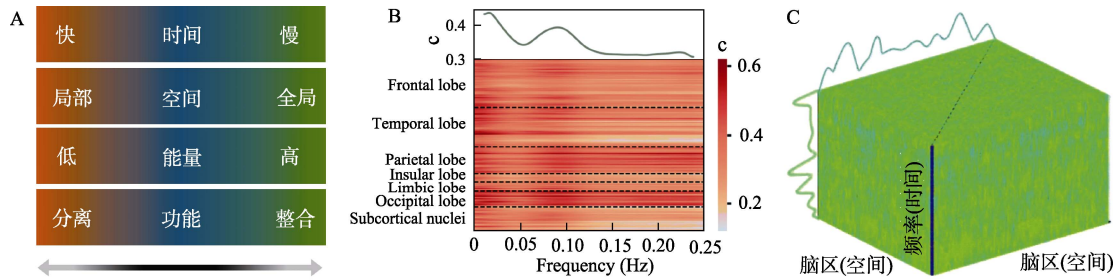


图2 基于认知频谱指纹假说的全局时空拓扑分析技术。(A) 脑功能的时空关系。越整合的认知功能消耗的能量越多, 对应的脑活动越具有低频、全局性质。(B) 根据认知的频谱指纹建立考察全局脑信号与局部信号之间同步性的全局相干拓扑图(Ao et al., 2023)。(C) 根据认知的频谱指纹建立考察全脑功能连接的全脑网络拓扑图。全局时空拓扑分析技术能够衡量特定认知功能对应的脑功能时空结构。频率(时间)和脑区(空间)特征共同构成特定认知成分波动的时空特征。

为本研究提供了刻画不同注意成分时空波动特征的有效指标(Ao et al., 2023; Yang et al., 2024)。

本实验通过融合行为测量和神经生理指标随时间变化的低频波动特征, 建立一个综合、可靠的警觉低频波动的测量体系, 刻画其在行为-生理-神经层面的时空波动特征。其中, 实验 1a 采用无探针的 gradCPT (如图 3 所示), 融合同步记录的行为和脑电数据, 刻画警觉水平的低频波动特征。实验 1b 同样采用无探针的 gradCPT, 融合行为和 fMRI 数据, 建立反应时和全局时空拓扑的关联, 进一步揭示警觉低频波动的时空特征。

在 gradCPT 中, 通常认为行为反应的异常或缺失与心智游移有关。心智游移与默认网络和额顶网络有关, 也跟脑电 α 节律有关(Rodriguez-Larios & Alaerts, 2021), 因此实验 1a 可通过行为与脑电数据融合, 以 α 节律的低频功率谱为因变量, 来

考察心智游移波动的频率特征。实验 1b 进一步以实验 1a 建立的行为效标与 fMRI 指标的耦合来考察心智游移波动的空间特征。两个实验共同揭示心智游移波动的时空特征。

具体来说, 在实验 1a 中, 任务态脑电数据经重参考、滤波、分段、去伪迹等预处理后, 对每个试次进行 θ 、 α 频段的功率分析, 以 1.25Hz 的采样率、以每个试次的功率值构成时间序列, 进行低频功率谱分析; 并对行为反应时、漏报率、虚报率等指标进行低频功率谱分析, 确定波动特征; 考察脑电指标的低频波动与行为低频波动的相关性, 找到警觉波动和心智游移的低频脑电特征, 为临床提供脑电效标。在实验 1b 中, 对任务态数据进行常规预处理后, 提取 GS 和各脑区信号。GS 被定义为所有灰质信号的算术平均值; 同时, 本研究使用中科院自动化所模板将大脑划

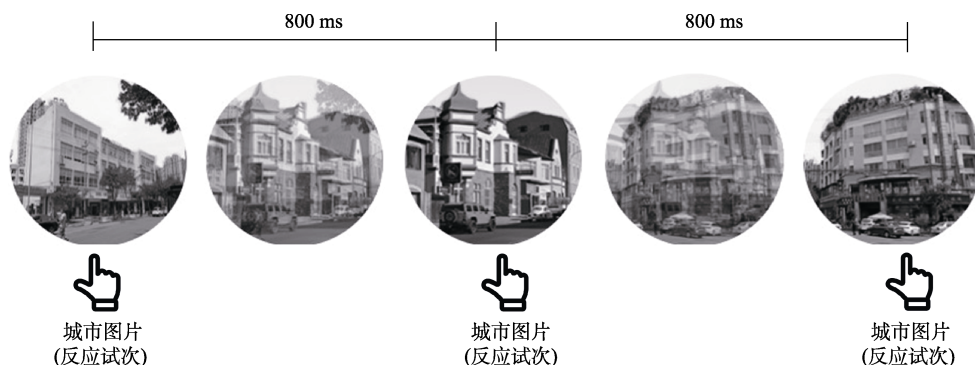


图3 无探针的 gradCPT 刺激呈现方式及流程。刺激包括 10 张城市图片, 图片大小和灰度保持一致。图片随机呈现, 但不允许相同的图片连续呈现。通过调整透明度, 图片逐渐从一张过渡到另一张: 前一张图片的透明度从 0% 更改为 100% 的同时, 下一张图片的透明度从 100% 更改为 0%。要求被试在城市场景最清晰时以右手食指快速按键。

分为 246 个脑区, 平均每个脑区中所有体素的信号值, 得到该脑区的信号序列, 即兴趣区信号 (ROIs)。通过对上述信号进行希尔伯特变换、功率谱密度分析、相干分析等, 得到频率、相位、波幅相关的特征以及全局时空拓扑结构, 进而与行为的低频波动进行耦合分析, 得到与警觉和心智游移相关的脑信号低频波动特征。

根据此前持续性注意发展和干预的相关研究结果, 实验 1 预期会在 0.05 Hz 和 0.1 Hz 附近发现与警觉和心智游移相关的峰值频率。由于警觉和心智游移的神经生理效标不同, 预期二者具有可分离的低频波动特征。

实验 2 旨在探究抑制控制波动的神经生理特征。在 gradCPT 中, 探针出现时被试需要抑制行为反应的惯性, 因此, 本研究通过两个子实验(单因素被试内设计)控制有无探针(2a)和探针出现的概率(2b), 以调节对抑制控制的需求, 通过行为和脑电优势频率的变化检测抑制控制低频波动的特征。

实验 2a 中, 自变量为有无探针, 有探针条件下探针(山区)出现的概率为 20%。无探针条件的实验程序与实验 1 相同, 有探针条件的实验程序如图 4 所示。在对脑电数据进行预处理后, 逐次提取 θ 、 α 、 β 功率, 计算 θ/α ratio (TAR)、 θ/β ratio (TBR) 等指标, 对这些指标进行低频功率谱分析; 对行为反应时、虚报、漏报进行低频功率谱分析, 确定波动特征; 考察脑电指标的低频波动与行为低频波动的相关性, 找到抑制控制的低频脑电特征, 为临床提供脑电效标。

实验 2b 进一步考察探针概率对抑制控制低

频波动特征的影响。由于探针概率不仅体现了对抑制控制的需求, 还会影响任务难度、警觉准备、心智游移等过程, 通过对探针概率的操作可进一步反映持续性注意主要成分之间的相互作用及其对持续性注意波动特征的影响。本实验以探针的概率(10%、20%、30%)为自变量, 以行为反应时、虚报率、漏报率、脑电的 P3 成分等的低频功率谱为因变量, 考察不同抑制控制需求对低频波动的影响。行为与脑电的数据处理方式与实验 2a 相同, 并通过对频率波动的变化与行为反应的变化做关联, 确定概率操作对不同成分的影响。

根据此前关于抑制控制低频波动的相关研究结果, 预期在有无探针的实验中, 抑制控制波动的峰值出现在 0.01 Hz 以下; 在操纵探针概率的实验中, 由于探针概率越高被试需要做出更多的抑制反应, 因此探针概率高的情况下虚报率可能更高; 探针概率低的情况下漏报率可能更高, 这会导致相关成分的低频波动特征发生变化。同时, 与抑制控制、注意集中等成分相关的脑电波动特征也可能发生同步变化。如果“不同认知成分有不同的波动特征”这一假设成立, 则抑制控制和其他成分的波动特征应该是可分离的, 但不能排除不同成分共享部分时空结构的可能性。为确定不同认知成分独有的和共享的时空结构的变化, 本研究将采用典型相关分析等多变量分析方法、时间和空间维度的独立成分分析以及有向相互影响等统计方法区分不同成分的行为和神经效应(Wang et al., 2014; Wang et al., 2015)。在此基础上, 结合研究一和前人研究结果, 逐步建立不同认知成分低频波动的时空动态结构。

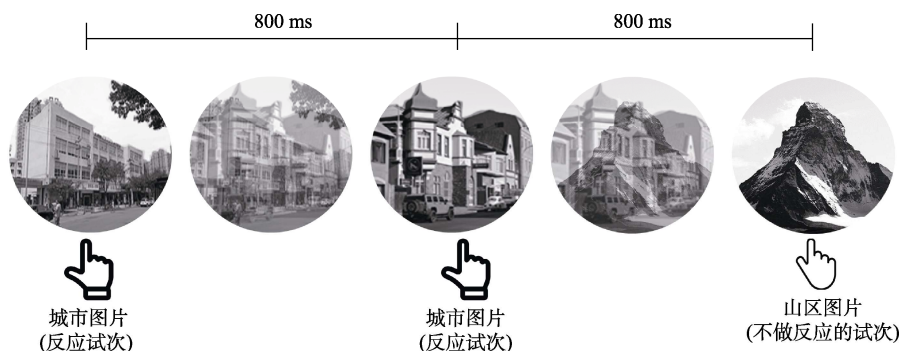


图 4 有探针的 gradCPT 刺激呈现方式及流程。城市图片出现的概率为 80%, 山区图片(探针)出现的概率为 20% (实验 2a)。图片的呈现顺序随机, 但不允许相同类别的图片连续呈现。要求被试确信看到城市图片时以右手食指按键, 看到山区图片时不按键。对山区图片按键被认定为虚报, 对城市图片未做反应则认定为漏报。

3.2 研究二：基于波动特征的持续性注意干预机制研究

在持续性注意过程中,多动症、自闭症人群表现出了左侧 PFC 的功能不足,说明左侧 DLPFC 可能是持续性注意干预的重要空间靶点(Christakou et al., 2013; Filmer et al., 2019)。同时,持续性注意波动的发展及其在多动症中的异常波动多发生在 0.05 Hz 附近(Karalunas et al., 2013; Yordanova et al., 2011)。据此,已有研究在左侧 DLPFC 实施 0.05 Hz 的 O-tDCS,成功干预了持续性注意的多个成分,为基于波动特征的干预指明了方向(Qiao et al., 2022)。本研究在研究一的基础上继续探索 O-tDCS 干预持续性注意波动的机制,揭示成分特异性的频率和靶点。

实验 3 旨在研究干预持续性注意低频波动的刺激频率效应。本实验为二因素混合设计,刺激频率(警觉峰值频率、抑制控制峰值频率、心智游移峰值频率等)为被试间变量,测试时间(刺激前、刺激中、刺激后)为被试内变量,因变量为行为反应时、虚报率、漏报率、EEG 信号等指标的低频功率谱。具体来说,本实验采用不同成分在研究中确定的 3~4 个优势频率,以左侧 DLPFC 为靶点实施 O-tDCS,对各行为和脑电指标进行刺激频率×测试时间的二因素方差分析,根据交互作用验证不同频率的刺激是否能特异性增强对应的认知功能,结合行为和脑电技术探索基于认知成分低频波动特征的精准干预机制。本研究预期在相应成分的优势频率上施加刺激可以更显著地调节该成分。

实验 4 旨在研究干预持续性注意低频波动的刺激靶点效应。本实验为二因素混合设计,干预靶点(警觉靶点、抑制控制靶点、心智游移靶点等)为被试间变量,测试时间为被试内变量,因变量为行为反应时、虚报率、漏报率等及其低频功率谱。具体来说,本实验以研究一确定的 3~4 个不同成分的核心皮层区域为刺激靶点实施 O-tDCS,刺激频率为 0.05 Hz。对各行为和脑电指标进行刺激靶点×测试时间的二因素方差分析,根据交互作用验证不同靶点的刺激是否能特异性增强对应的认知功能,结合行为和脑电技术探索基于认知成分特异性靶点的精准干预机制。本研究预期在相应成分的特异性靶点上施加刺激可以更显著地调节该成分。

研究二从频率(时间)和靶点(空间)两方面探索基于持续性注意成分波动特征的精准干预机制,一方面验证持续性注意的成分波动假设,另一方面基于新的成分波动理论开发持续性注意的精准干预方案。

3.3 研究三：认知成分交互作用的低频波动机制研究

本研究采用自主开发的 HR-CAT,考察持续性注意的波动在警觉、定向、执行控制和基线条件下的差异。HR-CAT 实验程序如图 5 所示。本研究将通过两个子实验,分别考察注意网络的行为和脑电信号低频波动特征以及 fMRI 信号低频波动特征,共同探索在基线水平上增加不同注意网络成分时,持续性注意的行为-电生理-神经血氧信号波动的时空特征。以警觉为例,警觉条件

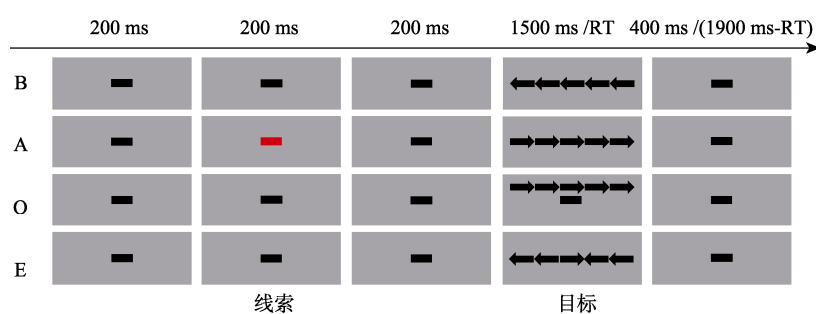


图 5 HR-CAT 任务流程图。B: 基线组块, A: 警觉组块, O: 定向组块, E: 执行控制组块, RT: 反应时。每个试次均以中心注视点(黑色短线“-”)开始;然后呈现线索(红色代表有警觉线索,黑色代表没有);间隔 200 ms 后呈现目标刺激,含有定向的组块目标出现在屏幕上方或下方,不含有定向的组块目标出现在屏幕中央,含有执行控制的组块中央箭头的方向与其余箭头的方向不一致,不含执行控制的组块中央箭头的方向与其余箭头的方向一致;要求被试在保证正确的基础上尽快反应,按键反应后或到 1500 ms 仍无反应则刺激消失;并以中心注视点呈现 400 ms (未按键反应时)或 (1900 ms-RT) ms 结束,以使每个试次长度为 2500 ms。

可以诱发被试的位相性警觉,而整个任务的警觉表现则可以代表紧张性警觉的波动。两种警觉状态下的蓝斑-去甲肾上腺素系统神经元放电会产生相互影响,但这个动态过程及作用机制仍不清楚(Aston-Jones & Cohen, 2005; Howells et al., 2012; Petersen & Posner, 2012)。在本实验中,通过对比警觉和基线条件下紧张性警觉低频波动的差异来检验位相性警觉的水平对紧张性警觉低频波动的影响,从而考察二者之间的关系。

实验5为被试内设计,每名被试完成HR-CAT中的警觉、定向、执行控制和基线四个任务。本实验采用稳态组块设计,基于行为、脑电和功能磁共振技术探索持续性注意与注意网络交互的波动特征。

实验5a以各个注意功能的反应时、正确率以及脑电成分的低频功率谱为因变量,考察注意网络的行为和脑电信号低频波动特征。具体来说,对HR-CAT任务的反应时和正确率数据进行功率谱计算,提取其峰值频率、功率值等进行重复测量方差分析和配对 t 检验,考察不同注意成分对持续性注意低频波动特征的影响。对脑电数据的记录和分析同实验1a,通过重复测量方差分析和配对 t 检验考察不同注意成分对脑电信号低频波动特征的影响。

实验5b以各个注意功能的反应时、正确率的功率谱以及fMRI信号的亚慢波时空拓扑结构为因变量,考察注意网络的行为和fMRI信号低频波动特征。具体来说,对行为数据的分析同实验5a;对fMRI数据的分析同实验1b,通过重复测量方差分析和配对 t 检验考察不同注意成分对fMRI信号低频波动特征的影响。在上述两个实验中,通过与基线条件的对比,考察哪些频率波动存在差异,检测实验中是否产生了新的频率波动特征以及检测研究一中的建立起来的波动特征是否会发生变化。

实验5预期不同的注意网络有不同的低频波动特征,其中警觉网络可能跟持续性注意的警觉波动存在交互作用,执行控制网络可能跟持续性注意的抑制控制波动存在交互作用。

4 理论建构与研究创新

随时间流逝而不断波动是持续性注意的一种重要特征。由于注意波动在生活中具有广泛的负

面影响,如何揭示和利用持续性注意的波动规律已经成为教育、心理治疗、人因工程等多个领域共同关注的前沿问题,但目前的理论框架难以涵盖其多成分、多频率的波动特性。本研究以认知的频谱指纹假说、注意的节律理论等理论为基础,针对“持续性注意低频波动的认知神经机制”这一核心问题,围绕“解码持续性注意的内部成分,阐明各成分波动的脑机制”这一核心内容,阐述“持续性注意中的不同认知成分主导了不同波动特征”的观点,从而建构和验证“持续性注意的成分波动理论”。

首先,本研究拓展了注意理论,填补了当前理论未澄清持续性注意的不同成分如何参与其缓慢波动过程的空白。早期研究者大多将持续性注意等同于警觉(Mackworth, 1948)。近年来,研究者们认为与选择性注意、自上而下注意等注意类型不同,持续性注意是一种复杂的认知功能,不能简单等同于警觉,而是包含了抑制控制、心智游移等不同的成分(Sarter et al., 2001; Thomson et al., 2015)。此外,正如三个注意网络既相互独立又相互协作(Callejas et al., 2005; Xuan et al., 2016),持续性注意的核心成分可能也是既可以分离又相互协同来应对生活中复杂多变的需求。为了系统分离持续性注意的核心成分、解析其内部结构,本研究探索不同认知成分所主导的波动特征,建构持续性注意波动的理论。需要强调的是,成分的可分离并不意味着不同成分是完全独立的,相反,除了不同成分独有的时空结构,成分之间会存在大量共享的时空结构,因而,探讨不同成分之间的相互作用也是建构成分波动理论的重要方面。

其次,本研究完善了脑功能理论,把特定的认知成分与脑功能的时空结构联系起来,形成从神经振荡到认知成分波动到持续性注意整体波动的逻辑链条,揭示持续性注意波动的认知神经机制。认知功能是由特定的神经回路实现的。在神经回路中,通过多层级的节律性神经活动交流信息是进化形成的一种主要的脑内信息传递模式(Buzsáki, 2009)。由于路径长度、传输速度等因素的影响,每个脑区和回路都有其特定的频谱特征,而协调更大范围的神经活动需要更低频的节律调节,这使得每种认知功能在宏观上表现出缓慢波动的频谱特征(Keitel & Gross, 2016)。认知的频谱指纹把每种认知功能与特定的脑活动时空特征相

联系,是一种新颖且有效的定义认知功能的方法(Siegel et al., 2012)。已有研究使用静息态和稳态组块设计的连续操作任务揭示了亚慢波脑活动的多频率波动特征(Ao et al., 2023; Wang et al., 2018; Wang et al., 2020),而持续性注意的波动刚好落在亚慢波的频段范围内(Esterman & Rothlein, 2019),本研究据此推断不同频率的波动可能与持续性注意的不同认知成分有关。由于行为、电生理、血氧信号在亚慢波段表现出相似的振荡特征,通过亚慢波脑活动的时空结构解码持续性注意的波动机制既具有必然性、必要性,也具有天然优势。本研究采用行为、脑电、fMRI等研究方法,结合自主开发的亚慢波 TES 和全局时空拓扑分析技术等,从生理-心理-神经耦合的角度探讨持续性注意波动的认知神经机制。在研究方法上,推动认知功能的脑区和脑网络研究走向时空结构研究(Wang et al., 2025),同时验证和完善“时空神经科学”(Northoff, 2024)、“认知的频谱指纹”(Siegel et al., 2012)等前沿理论。在研究内容上,把心理学对传统神经节律的研究扩展到亚慢波脑活动研究,促进对心理活动“宏观波动”、“慢过程”的认识(Kringelbach et al., 2015; Wilckens et al., 2018)。

最后,本研究丰富了无创脑干预领域的研究,提供了持续性注意波动的精准时空靶点。由于持续性注意的异常波动与各种神经、精神疾病有关,即使是正常波动也会对工作与学习效率造成影响,甚至可能导致重大灾难,因而有必要探寻调节持续性注意波动的有效方法。根据脑功能活动的时空特征进行精准干预能够有效改善干预效果。本研究在持续性注意的核心认知成分对应的优势频率、神经回路的关键靶点上施加亚慢波 TES,通过认知-频率-脑区特异性效应验证认知成分与波动特征的关联。一方面为持续性注意的成分波动假设提供因果证据,另一方面为持续性注意波动的干预提供精准靶点。亚慢波 TES 将促进对持续性注意波动特征的利用、避免波动的危害,助力个体提高学习、生活和工作质量,减少人为事故。

参考文献

- 张晓. (2022). 奖惩预期对持续性注意的影响 [硕士学位论文]. 天津师范大学.
- Adamo, N., Huo, L., Adelsberg, S., Petkova, E., Castellanos, F. X., & Di Martino, A. (2014). Response time intra-subject variability: Commonalities between children with autism spectrum disorders and children with ADHD. *European Child and Adolescent Psychiatry*, 23(2), 69–79.
- Ao, Y., Yang, C., Drewes, J., Jiang, M., Huang, L., Jing, X., Northoff, G., & Wang, Y. (2023). Spatiotemporal dedifferentiation of the global brain signal topography along the adult lifespan. *Human Brain Mapping*, 44(17), 5906–5918.
- Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 403–450.
- Axelrod, V., Rees, G., Lavidor, M., & Bar, M. (2015). Increasing propensity to mind-wander with transcranial direct current stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(11), 3314–3319.
- Axelrod, V., Zhu, X., & Qiu, J. (2018). Transcranial stimulation of the frontal lobes increases propensity of mind-wandering without changing meta-awareness. *Scientific Reports*, 8(1), 15975.
- Bast, N., Poustka, L., & Freitag, C. M. (2018). The locus coeruleus-norepinephrine system as pacemaker of attention -a developmental mechanism of derailed attentional function in autism spectrum disorder. *European Journal of Neuroscience*, 47(2), 115–125.
- Buzsáki, G. (2009). *Rhythms of the brain*. Oxford University Press.
- Callejas, A., Lupiáñez, J., Funes, M. J., & Tudela, P. (2005). Modulations among the alerting, orienting and executive control networks. *Experimental Brain Research*, 167(1), 27–37.
- Christakou, A., Murphy, C. M., Chantiluke, K., Cubillo, A. I., Smith, A. B., Giampietro, V., ... Rubia, K. (2013). Disorder-specific functional abnormalities during sustained attention in youth with Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) and with autism. *Molecular Psychiatry*, 18(2), 236–244.
- Clayton, M. S., Yeung, N., & Cohen Kadosh, R. (2015). The roles of cortical oscillations in sustained attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(4), 188–195.
- Clayton, M. S., Yeung, N., & Cohen Kadosh, R. (2019). Electrical stimulation of alpha oscillations stabilizes performance on visual attention tasks. *Journal of Experimental Psychology: General*, 148(2), 203–220.
- Draheim, C., Mashburn, C. A., Martin, J. D., & Engle, R. W. (2019). Reaction time in differential and developmental research: A review and commentary on the problems and alternatives. *Psychological Bulletin*, 145(5), 508–535.
- Esterman, M., Noonan, S. K., Rosenberg, M., & DeGutis, J. (2013). In the zone or zoning out? Tracking behavioral and neural fluctuations during sustained attention. *Cerebral Cortex*, 23(11), 2712–2723.
- Esterman, M., & Rothlein, D. (2019). Models of sustained attention. *Current Opinion in Psychology*, 29, 174–180.

- Falahpour, M., Chang, C., Wong, C. W., & Liu, T. T. (2018). Template-based prediction of vigilance fluctuations in resting-state fMRI. *Neuroimage*, 174, 317–327.
- Fan, J., Byrne, J., Worden, M. S., Guise, K. G., McCandliss, B. D., Fossella, J., & Posner, M. I. (2007). The relation of brain oscillations to attentional networks. *Journal of Neuroscience*, 27(23), 6197–6206.
- Fiebelkorn, I. C., & Kastner, S. (2019). A rhythmic theory of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(2), 87–101.
- Filmer, H. L., Griffin, A., & Dux, P. E. (2019). For a minute there, I lost myself ... dosage dependent increases in mind wandering via prefrontal tDCS. *Neuropsychologia*, 129, 379–384.
- Fortenbaugh, F. C., DeGutis, J., & Esterman, M. (2017). Recent theoretical, neural, and clinical advances in sustained attention research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1396(1), 70–91.
- Hasenkamp, W., Wilson-Mendenhall, C. D., Duncan, E., & Barsalou, L. W. (2012). Mind wandering and attention during focused meditation: A fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states. *Neuroimage*, 59(1), 750–760.
- Hegerl, U., & Hensch, T. (2014). The vigilance regulation model of affective disorders and ADHD. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 45–57.
- Howells, F. M., Stein, D. J., & Russell, V. A. (2012). Synergistic tonic and phasic activity of the locus coeruleus norepinephrine (LC-NE) arousal system is required for optimal attentional performance. *Metabolic Brain Disease*, 27(3), 267–274.
- Irrmischer, M., van der Wal, C. N., Mansvelder, H. D., & Linkenkaer-Hansen, K. (2018). Negative mood and mind wandering increase long-range temporal correlations in attention fluctuations. *PLoS ONE*, 13(5), e0196907.
- Jayakumar, M., Balusu, C., & Aly, M. (2023). Attentional fluctuations and the temporal organization of memory. *Cognition*, 235, 105408.
- Jin, C. Y., Borst, J. P., & van Vugt, M. K. (2019). Predicting task-general mind-wandering with EEG. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 19(4), 1059–1073.
- Karalunas, S. L., Huang-Pollock, C. L., & Nigg, J. T. (2013). Is reaction time variability in ADHD mainly at low frequencies? *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 54(5), 536–544.
- Keitel, A., & Gross, J. (2016). Individual human brain areas can be identified from their characteristic spectral activation fingerprints. *PLoS Biology*, 14(6), e1002498.
- Kringelbach, M. L., McIntosh, A. R., Ritter, P., Jirsa, V. K., & Deco, G. (2015). The rediscovery of slowness: Exploring the timing of cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 616–628.
- Kucyi, A., Hove, M. J., Esterman, M., Hutchison, R. M., & Valera, E. M. (2017). Dynamic brain network correlates of spontaneous fluctuations in attention. *Cereb Cortex*, 27(3), 1831–1840.
- Lewis, F. C., Reeve, R. A., Kelly, S. P., & Johnson, K. A. (2017). Sustained attention to a predictable, unengaging Go/No-Go task shows ongoing development between 6 and 11 years. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79(6), 1726–1741.
- Luna, F. G., Román-Caballero, R., Barttfeld, P., Lupiáñez, J., & Martín-Arévalo, E. (2020). A high-definition tDCS and EEG study on attention and vigilance: Brain stimulation mitigates the executive but not the arousal vigilance decrement. *Neuropsychologia*, 142, 107447.
- Luna, F. G., Tortajada, M., Martín-Arévalo, E., Botta, F., & Lupiáñez, J. (2022). A vigilance decrement comes along with an executive control decrement: Testing the resource-control theory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29(5), 1831–1843.
- Mackworth, N. H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1(1), 6–21.
- Martínez-Pérez, V., Andreu, A., Sandoval-Lentisco, A., Tortajada, M., Palmero, L. B., Castillo, A., ... Fuentes, L. J. (2023). Vigilance decrement and mind-wandering in sustained attention tasks: Two sides of the same coin? *Front Neuroscience*, 17, 1122406.
- Martínez-Pérez, V., Tortajada, M., Palmero, L. B., Campoy, G., & Fuentes, L. J. (2022). Effects of transcranial alternating current stimulation over right-DLPFC on vigilance tasks depend on the arousal level. *Scientific Reports*, 12(1), 547.
- Monto, S., Palva, S., Voipio, J., & Palva, J. M. (2008). Very slow EEG fluctuations predict the dynamics of stimulus detection and oscillation amplitudes in humans. *Journal of Neuroscience*, 28(33), 8268–8272.
- Neigel, A. R., Claypoole, V. L., & Szalma, J. L. (2019). Effects of state motivation in overload and underload vigilance task scenarios. *Acta Psychologica*, 197, 106–114.
- Northoff, G. (2024). *From brain dynamics to the mind: Spatiotemporal neuroscience*. Academic Press.
- Palva, J. M., & Palva, S. (2012). Infra-slow fluctuations in electrophysiological recordings, blood-oxygenation-level-dependent signals, and psychophysical time series. *Neuroimage*, 62(4), 2201–2211.
- Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1987). Interaction of signal discriminability and task type in vigilance decrement. *Perception, & Psychophysic*, 41(1), 17–22.
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 73–89.
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25–42.
- Qiao, J., Li, X., Wang, Y., Wang, Y., Li, G., Lu, P., & Wang, S. (2022). The infraslow frequency oscillatory transcranial direct current stimulation over the left dorsolateral prefrontal cortex enhances sustained attention. *Frontiers*

- in *Aging Neuroscience*, 14, 879006.
- Rodriguez-Larios, J., & Alarerts, K. (2021). EEG alpha-theta dynamics during mind wandering in the context of breath focus meditation: An experience sampling approach with novice meditation practitioners. *European Journal of Neuroscience*, 53(6), 1855–1868.
- Rosso, M., Moens, B., Leman, M., & Moumdjian, L. (2023). Neural entrainment underpins sensorimotor synchronization to dynamic rhythmic stimuli. *Neuroimage*, 277, 120226.
- Sala, G., & Gobet, F. (2019). Cognitive training does not enhance general cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(1), 9–20.
- Sarter, M., Givens, B., & Bruno, J. P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: Where top-down meets bottom-up. *Brain Research Reviews*, 35(2), 146–160.
- Shalev, N., Humphreys, G., & Demeyere, N. (2016). Assessing the temporal aspects of attention and its correlates in aging and chronic stroke patients. *Neuropsychologia*, 92, 59–68.
- Siegel, M., Donner, T. H., & Engel, A. K. (2012). Spectral fingerprints of large-scale neuronal interactions. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(2), 121–134.
- Smallwood, J. (2010). Why the global availability of mind wandering necessitates resource competition: Reply to McVay and Kane (2010). *Psychological Bulletin*, 136(2), 202–207.
- Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: Empirically navigating the stream of consciousness. *Annual Review of Psychology*, 66, 487–518.
- Thompson, G. J., Pan, W. J., Billings, J. C., Grooms, J. K., Shakil, S., Jaeger, D., & Keilholz, S. D. (2014). Phase-amplitude coupling and infraslow (<1 Hz) frequencies in the rat brain: Relationship to resting state fMRI. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 8, 41.
- Thomson, D. R., Besner, D., & Smilek, D. (2015). A resource-control account of sustained attention: Evidence from mind-wandering and vigilance paradigms. *Perspectives on Psychological Science*, 10(1), 82–96.
- van Schouwenburg, M. R., Sligte, I. G., Giffin, M. R., Günther, F., Koster, D., Spronkers, F. S., ... Slagter, H. A. (2021). Effects of midfrontal brain stimulation on sustained attention. *Journal of Cognitive Enhancement*, 5(1), 62–72.
- Wang, Y., Chen, W., Ye, L., Biswal, B. B., Yang, X., Zou, Q., ... Chen, H. (2018). Multiscale energy reallocation during low-frequency steady-state brain response. *Human Brain Mapping*, 39(5), 2121–2132.
- Wang, Y., Zou, Q., Ao, Y., Liu, Y., Ouyang, Y., Wang, X., ... Chen, H. (2020). Frequency-dependent circuits anchored in the dorsal and ventral left anterior insula. *Scientific Reports*, 10(1), 16394.
- Wang, Y. F., Cui, Q., Liu, F., Huo, Y. J., Lu, F. M., Chen, H., & Chen, H. F. (2014). A new method for computing attention network scores and relationships between attention networks. *PLoS ONE*, 9(3), e89733.
- Wang, Y. F., Jing, X. J., Liu, F., Li, M. L., Long, Z. L., Yan, J. H., & Chen, H. F. (2015). Reliable attention network scores and mutually inhibited inter-network relationships revealed by mixed design and non-orthogonal method. *Scientific Reports*, 5, 10251.
- Wang, Y. F., Long, Z., Cui, Q., Liu, F., Jing, X. J., Chen, H., ... Chen, H. F. (2016). Low frequency steady-state brain responses modulate large scale functional networks in a frequency-specific means. *Human Brain Mapping*, 37(1), 381–394.
- Wang, Y. F., Zhang, C., Liu, Q., & Jing, X. J. (2025). The intrinsic spatiotemporal structure of cognitive functions inspires the intervention of brain functions. *Frontiers in Neurology*, 16, 1494673.
- Warm, J. S., Parasuraman, R., & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, 50(3), 433–441.
- Wei, J., Zhang, Z., Yao, Z., Ming, D., & Zhou, P. (2021). Modulation of sustained attention by theta-tACS over the lateral and medial frontal cortices. *Neural Plasticity*, 2021, 5573471.
- Wilckens, K. A., Ferrarelli, F., Walker, M. P., & Buysse, D. J. (2018). Slow-wave activity enhancement to improve cognition. *Trends in Neurosciences*, 41(7), 470–482.
- Xuan, B., Mackie, M. A., Spagna, A., Wu, T., Tian, Y., Hof, P. R., & Fan, J. (2016). The activation of interactive attentional networks. *Neuroimage*, 129, 308–319.
- Yakubov, B., Das, S., Zomorodi, R., Blumberger, D. M., Enticott, P. G., Kirkovski, M., Rajji, T. K., & Desarkar, P. (2022). Cross-frequency coupling in psychiatric disorders: A systematic review. *Neuroscience and Biobehavioral*, 138, 104690.
- Yang, C., Biswal, B., Cui, Q., Jing, X., Ao, Y., & Wang, Y. (2024). Frequency-dependent alterations of global signal topography in patients with major depressive disorder. *Psychological Medicine*, 54(9), 2152–2161.
- Yordanova, J., Albrecht, B., Uebel, H., Kirov, R., Banaschewski, T., Rothenberger, A., & Kolev, V. (2011). Independent oscillatory patterns determine performance fluctuations in children with attention deficit/hyperactivity disorder. *Brain*, 134(6), 1740–1750.
- Zhang, C., Wang, Y., Jing, X., & Yan, J. H. (2023). Brain mechanisms of mental processing: from evoked and spontaneous brain activities to enactive brain activity. *Psychoradiology*, 3, kkad010.

The mechanism and intervention of low-frequency fluctuations of sustained attention

WANG Yifeng, TANG Yuzhu, XIAO Kunchen, JING Xiujuan

(Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

Abstract: Sustained attention is the ability to maintain attention to particular stimuli or cognitive activities over time. However, attention levels fluctuate over time, which can impede ongoing cognitive activities. The normal development of sustained attention, as well as its abnormal fluctuations in patients with neurological and psychiatric disorders, occur across multiple infra-slow frequencies. Current research oversimplifies the fluctuations as a trade-off and allocation of limited cognitive resources, making it difficult to analyze the complex array of diverse cognitive components and characteristics of multiple frequency fluctuations for sustained attention. This study aims to elucidate the cognitive neural mechanisms underlying the low-frequency fluctuations for sustained attention. It includes: (1) investigating the brain-spatiotemporal characteristics of cognitive components' fluctuations for sustained attention and proposing hypotheses for cognitive component fluctuations; (2) exploring interventions based on low-frequency fluctuations of sustained attention components, by using infra-slow wave transcranial electrical stimulation to validate the proposed hypotheses based on frequency, timing, and brain regions; (3) examining the interaction between sustained attention and attentional networks. This study contributes to understanding the cognitive and spatiotemporal characteristics of sustained attention and provides insights for precise interventions of sustained attention fluctuations.

Keywords: sustained attention, brain-spatiotemporal characteristics, low-frequency brain activity, infra-slow wave transcranial electrical stimulation, attentional network