

• 研究构想(Conceptual Framework) •

中文自然阅读情境下儿童副中央凹注意编码的 神经发育基础*

李东伟¹ 祁梦迪² 唐书凝¹ 陈路遥³ 崔新¹

(¹北京师范大学文理学院心理系; ²北京师范大学教务部实验教学平台, 广东 珠海 519085)
(³北京师范大学国际中文教育学院, 北京 100875)

摘要 本研究旨在探索学龄期儿童在中文自然阅读情境中副中央凹注意编码的神经发育机制及其对阅读能力的影响。通过整合光泵磁强计脑磁图、眼动追踪和经颅光生物调节技术, 系统揭示儿童自然阅读过程中眼跳前注意的实时和动态神经表征及发展规律。研究拟聚焦以下核心问题: (1) 儿童副中央凹注意的加工广度和深度及其与眼动模式的关联; (2) 多线程相位编码模型在儿童阅读中的适用性, 即视觉皮层与前额叶并行处理中央凹语义与副中央凹字形信息的神经振荡相位同步机制; (3) 基于额眼区的光生物调节对提升副中央凹注意深度及阅读能力的干预效果。本研究首次通过融合自然阅读范式揭示儿童阅读过程中实时注意动态的神经机制, 为构建“基于脑发育规律的阅读教育”提供理论依据, 并为开发安全、精准的和个性化的阅读困难脑调控方案奠定科学基础。

关键词 自然阅读, 注意, 儿童, 脑电/脑磁图, 光生物调节技术

分类号 B842; B844

1 研究意义

阅读获得是学龄期儿童认知发展的里程碑, 是儿童脑智发展的基石。阅读依赖多种基本认知加工过程, 其中视觉注意编码和眼动控制尤其重要(Gabrieli & Norton, 2012)。探讨儿童阅读过程中的眼动, 以及与之相关的视觉注意神经表征和神经计算模型, 对揭示儿童阅读的脑机制具有重要科学价值。此外, 儿童注意能力的个体差异与其阅读能力的发展密切相关(李杰等, 2021; Hjetland et al., 2019)。学龄期儿童经历了从“学习阅读(learning to read)”到“通过阅读来学习(reading to learn)”的转变, 其大脑发育快、可塑性强。探索儿童期注意和阅读能力快速发展的神经基础, 旨在

深刻揭示领域一般性能力与领域特异性高级能力发展的关系。该研究不仅是脑科学前沿的核心领域, 也为理解儿童脑智发育规律提供了关键视角, 同时紧密契合国家提升基础教育与促进人口健康的重大战略需求。

注意是将视觉信息转化为语义的关键一环, 现有研究通常分别测量儿童的注意和阅读能力, 发现儿童注意能力对阅读发展的正向作用(Wang et al., 2017)。然而, 儿童阅读过程中的注意存在变化, 阅读过程中注意的实时起伏能够反映当下的阅读效率和阅读理解能力(Pan et al., 2021; Yildiz & Çetinkaya, 2017)。目前仍缺少测量儿童阅读中实时注意起伏的研究, 尚未系统探讨注意的动态变化在儿童阅读中的认知神经基础。注意既是儿童阅读发展的基石, 注意困难也是学习障碍常见的并发问题。例如, 阅读困难是学龄儿童高发的特异性学习困难之一, 发生率为5%~8%, 其中近50%会伴随注意问题(王久菊等, 2023), 阅读和注意困难极大地影响了近千万儿童的学业发展,

收稿日期: 2025-06-05

* 国家自然科学基金青年项目(32400863)资助。

通信作者: 李东伟, E-mail: DongweiLi@bnu.edu.cn

崔新, E-mail: xincui@bnu.edu.cn

为基础教育系统带来了巨大负担。因此,探索中国儿童阅读中注意的脑发育规律,开发安全有效的基于注意靶点进行的阅读能力提升的脑调控方案,实现从“基于经验的阅读教育”到“基于脑发育规律的阅读教育”的转变,具有深远的应用前景和重大的社会现实意义。

近年来,无创脑成像、神经调控技术的兴起和迅猛发展,为构建和解析儿童认知功能的奥秘提供了前所未有的机遇。本文计划创新性地从注意的视角出发,拟融合多变量表征相似性分析和计算建模等多种方法,联合采用可穿戴脑磁图和光生物调节技术等多种评估和神经调控手段,系统地探究儿童阅读中在线注意的动态神经表征,探讨儿童视觉注意的神经活动与中文阅读行为表现之间的独特联系,揭示汉语儿童自然阅读的脑发育机制。此外,本文将提出儿童阅读能力的无创提升方案,服务于我国儿童脑健康保护和脑智提升等领域。

2 国内外研究进展及述评

自然阅读是允许眼动的真实阅读环境,需要视觉注意和眼动控制等多个认知过程的紧密协调。视觉注意在自然阅读中的作用主要体现在两个方面:眼跳前注意的广度和深度。眼跳(Saccade)是阅读过程中的一种基本的眼动类型,通过眼跳可以将原本位于副中央凹(Parafoveal)的信息呈现在中央凹(Foveal)内,以获得精确而清晰的视觉信息。尽管副中央凹区域视敏度有限,研究发现读者可以在眼跳前对副中央凹中的信息进行编码,在阅读流畅性中具有重要作用(张慢慢等, 2023; Yao et al., 2021)。副中央凹的信息获取与内隐视觉注意密切相关。在内隐视觉注意的研究中,受试者需要用余光辨认位于外周视野的目标信息来完成任务(Li, Luo et al., 2023),在自然阅读过程中反映为眼跳前注意副中央凹对字词信息的编码。神经科学的研究揭示了儿童在完成自然阅读任务时,会激活额眼区等额顶注意网络相关的脑区(Wang et al., 2023)。然而,以往研究探讨阅读的副中央凹加工过程主要关注语言信息的加工(Schotter et al., 2012; Tiffin-Richards, 2024),忽视了更为基础的视觉注意加工。结合脑成像技术和计算模型,研究儿童阅读过程中注意编码的神经活动和发展规律,可以进一步帮助探索阅读理解

的加工机制,揭示高级认知能力和脑发育的关系,对理解人类大脑如何适应新近文化产物(如,文字)具有重要的科学意义(Dehaene-Lambertz et al., 2018)。

2.1 眼跳前注意在自然阅读中的作用:副中央凹预加工

眼跳前注意是指在自然阅读的过程中,眼睛到达下个注视点之前对该注视点位置中信息的加工,亦叫做副中央凹预加工。眼跳前注意的广度是指我们能在注视点落在当前词的时候,加工后序信息的数量。眼跳前注意的深度则是在眼跳前我们能够对后续信息进行预加工深度,对阅读来说,字形(Orthography)层面的加工相对较浅,而能够通达语音(Phonology)或语义(Semantic)则表明加工相对较深。眼跳前注意加工的重要性在于帮助读者将眼睛精准地落在有意义的词上,避免漏字等情况的发生,并大大提高了阅读流畅性。大量眼动研究的证据表明,对于位于中央凹处信息的注视时间会因副中央凹处刺激的词频以及语义信息产生变化,证实了眼跳前注意在自然阅读中的关键作用(张慢慢等, 2023; Pan et al., 2021)。

在眼跳前注意的帮助下,熟练读者在阅读过程中的眼动注视点经常会跳过一些无意义的介词或者副词(Li & Pollatsek, 2020; Rayner, 1998; Reichle et al., 1998)。这种眼跳的步长不一的模式符合“列维分布”的特征(Papanikolaou et al., 2024; Stephen et al., 2009)。列维分布(Lévy distribution)是一种具有重尾特征的随机游走模型,最初在动物觅食行为中被发现,后被广泛应用于人类认知任务中的行为轨迹建模(Stephen et al., 2009)。其形式表现为步长分布中存在大量短程移动与少量长程跳跃相结合的特征。动物感知外部环境是通过跑动或者飞行,而人类则通过眼动来观察外部环境。许多动物通过大范围移动(如跑动、飞行)来探索环境,并依赖多样化的感官系统;而人类虽然也活动,但在认知世界时,视觉(尤其是通过眼动进行主动观察)扮演着更为核心和主导的角色。在自然阅读中,列维分布可能反映了一种高效的信息搜索策略。短步长对应于对局部信息的精细加工;长步长则反映对已知或可预测信息的跳过;随着阅读能力的发展,眼跳前注意深度逐渐加深,这种“局部密集探索与偶尔远距离跳跃”的模式,

被认为是一种在有限认知资源下最大化信息获取效率的优化策略。然而, 学龄期儿童早期总是逐字阅读(Gruhn et al., 2020; Hjetland et al., 2019), 眼跳前注意深度可能只在字形层面且广度较小, 跳读现象较少。已有研究报告了注意缺陷多动障碍(Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder, ADHD)儿童在工作记忆任务中眼跳轨迹的列维分布特征参数存在异常, 偏离了最优策略路径(Papanikolaou et al., 2024)。列维分布的参数能够有效量化任务中的整体眼动模式, 量化儿童阅读策略发展过程中整体眼动分布模式特征, 从而探索儿童在发展成熟阅读者的过程中眼动步长分布模式的变化及其与阅读能力的关系。探究学龄期儿童自然阅读中眼动轨迹整体的分布特征, 量化阅读初学者到成熟阅读的列维分布参数变化, 对构建自然阅读中眼跳前注意编码的神经动力学模型具有重要意义。

已有研究证据表明眼跳前注意可以帮助我们预先加工位于副中央凹的信息, 但位于中央凹处和副中央凹处的信息几乎同时进入我们的视觉系统中, 由此带来的问题是: 中央凹的信息和副中央凹的信息竞争有限的认知资源。因此, 大脑需要特定的机制, 既避免认知资源的竞争, 又能够序列整合位于中央凹和副中央凹的信息, 从而保证阅读的流畅性。

传统观点认为, 大脑对中央凹与副中央凹信息的加工遵循串行加工模型, 如 E-Z Reader 等(Reichle et al., 1998), 即大脑首先对位于中央凹的信息进行加工, 待完成编码后眼跳到下一个词, 再对原来位于副中央凹区域的信息进行加工(Protopapas et al., 2013)。然而, 近期研究从时间进程上对阅读的串行加工模型提出了挑战。电生理实验证据表明, 信息从视网膜传输到视觉皮层大约需要 60 ms (Reichle & Reingold, 2013; Schmolesky et al., 1998), 而动作皮层进行眼跳准备和执行大约需要 90 ms (Carreiras et al., 2014)。熟练的阅读过程中, 眼睛每个注视点的时长大约在 200 ms 左右, 这意味着大脑从视觉皮层到获取语义信息只有 50 ms 的时间, 这与电生理观察到从视觉皮层到语义表征的脑区传递所需要的时间至少相差了几十毫秒的时间(Woolnough et al., 2021)。随后的并行加工模型试图加工速度的问题, 研究者还提出了并行加工模型, 如, SWIFT/

Glenmore/OB1 等(见综述: 陈松林 等, 2024)。Li 和 Pollatsek (2020)基于汉语中无词间隔等特征提出了汉语阅读模型(Chinese Reading Model, CRM)。CRM 为阅读过程中词汇选择和眼跳的提供了系统框架, 为中文阅读眼动现象的规律提供了支持。但 CRM 模型未考虑神经生理层面的加工过程, 如知觉广度内的字词如何实现并行识别。

为了解决神经生理层面的时间限制和并行加工的潜在容量瓶颈, 研究者提出了同时包含串行和并行加工过程的多线程相位编码模型(Multiplexing phase coding model)。该神经计算模型认为, 在自然阅读过程中, 高级语义皮层(如前额叶)在处理眼跳发生之前位于中央凹处词语的语义信息的同时, 低级视觉皮层(如视觉字形区)已经开始处理位于副中央凹处的字形等低层级信息。以简化的字词识别过程为例(字形识别和词汇语义通达), 中央凹和副中央凹的词语同时被加工, 但是两者在不同的层级被处理, 读者读一个句子“The quick brown fox jumped over the lazy dog.”, 当注视点移动到“jumped”时, “jumped”的字形已经在注视点为“fox”时由副中央凹加工完成, 注视点移动到“jumped”时只需要加工词汇语义信息, 并在副中央凹的信息中提前加工“over”的字形信息。随着儿童阅读技能的提升, 对中央凹词汇的深度语义加工在本质上仍是序列性的, 而对副中央凹词汇的浅层预加工(如字形特征)则可以与中央凹加工并行进行, 也就是说, 熟练阅读者能够在序列性地深度加工中央凹词义的同时, 并行地在副中央凹对后续词进行预视和浅层编码, 呈现一种层级化的流水线加工模式。随着发育逐渐完善, 大脑能够更好地在时间上协调中央凹的串行深度加工与副中央凹的并行预加工, 由神经振荡的相位将串行与并行加工在时间上精确嵌套和整合(Jensen et al., 2021)。综上, 本文拟基于多线程相位编码的神经计算模型, 通过探究眼跳前注意的广度和深度, 揭示学龄期儿童自然阅读的神经计算模型, 并结合机器学习分类算法, 提取学龄期儿童自然阅读过程中注意的层级表征。

2.2 儿童注意与阅读关系的认知神经研究

大量注意领域的脑电/脑磁研究揭示了 alpha 节律在注意中的关键作用(Li, Hu et al., 2023; Jensen & Mazaheri, 2010)。例如, 当儿童将注意力投放在右侧时, 左侧大脑顶叶的 alpha 能量则会

被显著抑制,产生 alpha 活动的偏侧化现象(Bagherzadeh et al., 2020; Li et al., 2021)。此外,通过经颅磁刺激对注意相关的额眼区进行调控,顶叶的 alpha 能量会随之发生显著的变化,这进一步支持了受到额眼区调控的 alpha 节律在额顶注意网络中的重要作用(Herring et al., 2015)。额眼区(Frontal eye field, FEF)作为眼动控制的关键脑区(Moore & Fallah, 2004),大量研究论证了其在儿童注意和阅读发展中的关键地位(Ellis et al., 2021; Turkeltaub et al., 2003)。最近一项功能磁共振研究揭示了儿童在中文阅读过程中,额眼区等注意网络相关的脑区可观察到显著激活(Wang et al., 2023)。该区域被认为是额顶注意网络中的关键脑区,是沟通前额叶注意表征、运动皮层眼动控制和顶枕叶视觉信息的桥梁。

自然阅读研究同样发现了额顶注意网络中 alpha 的偏侧化现象(Kornrumpf et al., 2017),进一步强调了注意在自然阅读中的作用。研究发现自然阅读过程在额顶注意网络中诱发了明显的 alpha 偏侧化,这表明个体会将注意提前放在下一个注视点的位置。一项元分析的结果发现,儿童阅读能力发展关键期与注意相关的脑电 alpha 节律的峰值频率发生阶跃关键期一致(Cellier et al., 2021),这表明额顶注意网络中的 alpha 频率峰值的阶跃发生的年龄可能与阅读能力习得的早晚密切相关。此外,阅读过程中眼跳前的 alpha 相位受到目标词词频的调控,低频词眼跳前的 alpha 相位一致性更高,进一步支持了额顶注意网络中的 alpha 活动在学龄期儿童阅读能力的发展中可能起到了至关重要的作用(Pan, et al., 2023)。

尽管利用眼动和核磁技术在探测自然阅读中的眼跳前注意的研究中已经被广泛使用,但鲜有研究利用高时间分辨率的脑磁/脑电技术。其原因是眼动信号会带来非常大的肌电伪迹,对脑电信号产生污染(Luck, 2014)。经典的脑电实验为了避免眼动伪迹对脑电信号的干扰,通常使用逐字而非整句呈现阅读内容的实验范式(Gao et al., 2022),而非直接探测自然阅读过程中儿童眼跳前的注意能力。为了探究注意相关的脑活动与自然阅读行为之间的关系,研究者通常分别开展视觉注意和自然阅读两个实验任务,来建立二者之间的联系。例如,已有研究表明,注意相关的脑电指标能够预测儿童的阅读流畅性,这印证了注意能力个

体差异与阅读发展密切相关的观点(Wang et al., 2017)。然而,独立测量无法捕捉阅读过程中的眼跳前注意。在自然阅读中,注意实则表现出动态变化的特征,而正是这种注意的瞬时波动,可能是导致注意困难与阅读困难高度共患的核心潜在机制。现有研究受限于实验范式和技术,无法探测自然阅读过程中注意的实时起伏,需要结合新技术阐释自然阅读中实时注意和阅读能力之间的关系。

近期有研究者开创性地提出了一种可以在自然阅读任务中探究实时的眼跳前注意及其脑磁活动变化的实验范式和技术——快速不可见频率标记(Rapid invisible frequency tagging, RIFT)。该技术通过探测注意的神经活动对不可见的高频闪烁的响应,揭示了成人在英文自然阅读过程中眼跳前注意的深度可以达到词频甚至语义层面,并且副中央凹注意编码的神经活动能够预测阅读表现,具体表现为当注视点在预视词(pre-target word)时的相干性在语义通顺和语义违反间差异越大,被试的阅读速度越快(Pan et al., 2023)。一项中文阅读下的脑电研究通过快速序列视觉呈现(Rapid serial visual presentation, RSVP)范式,揭示了成年人副中央凹语义更新对中央凹与信息处理的影响,验证了汉语母语者的脑电活动可以在眼跳发生前区分下一个注视点的内容是否存在语义违反的现象(Li et al., 2022)。尽管上述工作通过结合脑电/脑磁图和眼动技术论证了眼跳前注意在成年人自然阅读过程中的重要性,学龄期儿童阅读中眼跳前注意的发育规律目前仍不清楚。由于学龄期儿童大脑发育快、可塑性强,仍然缺乏神经证据揭示儿童在阅读中眼跳前注意的广度和深度。

此外,虽然传统的脑磁图技术同时具有高时间和高空间分辨率,但传感器的位置是固定在一个不能移动的通用头盔中。由于儿童还处于发育期,相较于成年人普遍头较小,头部无法与脑磁图采集的头盔较好地贴合,即使1厘米的微小头动也会大大影响传统脑磁图技术采集到的儿童神经活动。然而,随着光泵磁力仪的发展,研究者开发了新型可穿戴的光泵磁强计脑磁图系统(Optically pumped magnetometer magnetoencephalography, OPM-MEG),不仅大大降低了脑磁图的使用成本和环境要求,更重要的是,传感器的位置可以根据受试者头围进行调整,且允许头部存在 ± 10 cm

的运动,因此非常适合儿童研究,相关研究成果发表在 *Nature* 上(Boto et al., 2018)。本研究计划采用新型可穿戴的 OPM-MEG 系统,探究自然阅读下学龄儿童副中央凹注意编码的广度和深度这一关键科学问题。

2.3 基于注意增强的阅读能力提升技术

鉴于视觉注意个体差异大的特点和在自然阅读中的重要地位,亟待探索出一种安全有效的方法来提升自然阅读中的注意能力。最近的一项研究探讨了注意与阅读的紧密联系:调查表明,我国阅读困难的学龄儿童中近 50%会伴随注意问题(王久菊等, 2023)。已有研究发现注意认知训练可以改善儿童的阅读技能(Franceschini et al., 2013; Guo et al., 2023),但是认知训练方法存在着训练周期长、个体差异大和迁移效应差等问题(Jaeggi et al., 2014)。

经颅光生物调节技术(Transcranial photobiomodulation, tPBM)是一种经济、安全的提高人类认知功能的有效方案(Salehpour et al., 2018)。与经颅电或磁刺激不同,经颅光生物调节技术的作用原理是非侵入式地调节大脑皮层神经元的代谢信号,即通过低能量密度的近红外激光调节大脑皮层神经元的细胞色素 c 氧化酶(Cytochrome c oxidase, CCO)的含量,提升三磷酸腺苷(Adenosine triphosphate, ATP)的合成效率,最终实现对神经元内线粒体呼吸作用的调节(dos Santos Cardoso et al., 2021)。相较于电/磁刺激具有更好的聚焦性,可用于探究脑区活动在认知发育中的因果作用,且没有疼痛感和诱发癫痫的风险,安全性更高,是更适合在儿童研究中广泛使用的神经调控技术。大量研究论证了光生物调节技术对局部脑血流量和全局脑网络的影响,并广泛应用于脑损伤、阿尔兹海默症等精神或神经系统疾病的临床干预中(Liu et al., 2023)。

研究发现额眼区(FEF)在眼动控制和视觉注意中的重要地位(Buschman & Miller, 2009; Herring et al., 2015; Schall, 2004)。受试者在完成视觉搜索任务时,其额眼区会表现出显著的血氧信号激活(Leonards et al., 2000; Remington et al., 2021);额眼区被广泛认为是额顶注意网络中的关键节点。这为额眼区作为光生物调节的刺激靶点提供了依据。最近一项研究发现作用在额眼区的 1064 nm 经颅光生物调节可以改善个体的工作记忆功能

(Zhao et al., 2022),而注意与工作记忆的神经机制存在高度重合(Panichello & Buschman, 2021),因此,光生物调节技术可能对注意能力产生效果。此外,已有研究发现 1064 nm 的 tPBM 作用在额眼区可以显著提高个体在进行复杂句子阅读时的表现(Yang et al., 2024)。

综上,本研究拟通过解析学龄儿童的脑节律与脑网络状态的特异性,定制个性化的光生物调节的精准神经调控靶点,开发“闭环”光生物调节系统,即根据儿童的脑活动和行为表现,实时调节调控剂量,提升学龄儿童的阅读能力,具有较高的科学和社会实践价值。

3 问题提出

随着认知神经科学技术的进步,研究者揭示了阅读过程中副中央凹预加工(Parafoveal Preview Benefit, PPB)的关键作用。然而,受限於实验范式和数据采集技术,缺少结合高时间分辨率技术的研究解析自然阅读中眼跳前注意的神经编码过程。此外,本研究关注“阅读情境”中的副中央凹注意编码,而非将阅读作为探析副中央凹注意的工具探讨一般性副中央凹编码机制。副中央凹注意在视觉探索等情境下广泛存在,但在视觉探索和阅读中,其编码机制可能存在差异。一方面,视觉探索从个体有视觉经验之后开始发展,较少依赖训练,阅读则需要多年训练,很大程度依赖后天学习和经验。另一方面,视觉探索在人类进化早期已经存在,而文字则是相对近期的文化产物。因此,人脑不太可能演化出先天专用于文字加工的神经机制。此外,自然阅读要求注意资源在中央凹语义加工与副中央凹预加工之间实现动态分配,从而形成一种阅读特异的注意编码模式。这种动态的、并行的加工机制,与实验室中采用视觉搜索等任务对注意能力进行的孤立测量存在本质差异。因此,阅读情境中的副中央凹编码可能存在特异性。最新的脑磁图研究结合频率标记(Frequency tagging)技术,报告了成人在自然阅读中表现出注意资源分配差异。例如低频词相较于高频词获得了更多资源,语义通顺的句子比语义违反的句子获得了更多的注意资源(Pan et al., 2021; Pan et al., 2023),研究者假设这种注意资源的动态分配的过程依赖于阅读过程中副中央凹的预视效应,从而使得皮层能够提前加工字形或语

义范畴等信息。然而,儿童阅读习得过程和副中央凹神经编码变化过程仍不清楚。

尽管成人研究发现了眼跳前注意和阅读能力之间的关系,学龄儿童阅读能力发展对副中央凹注意编码的影响机制仍不清楚。最后,成人研究中报告了额眼区对副中央凹编码模式的重要作用,其对促进儿童注意编码模式优化并提升阅读能力的机制尚不明确。

综上,本研究聚焦以下核心科学问题:“学龄期儿童在中文自然阅读中,副中央凹注意编码的神经发育机制及其对阅读能力的影响规律是什么?”具体可分解为三个子问题:(1)儿童自然阅读中的副中央凹注意编码是否遵循“多线程相位编码模型”?该模型假设不同脑区(如视觉皮层与前额叶)可并行处理中央凹语义与副中央凹字形信息,并通过神经振荡的相位同步来协调信息流的时间组织(Jensen et al., 2021)。然而,儿童是否具备这种层级化流水线加工能力?其神经表征(如 alpha 节律的相位偏侧化)如何随年龄发展?(2)儿童副中央凹注意的广度和深度如何随年龄增长而演变?其眼动模式(如列维分布)与神经活动(如额顶网络 alpha 能量)的关联是否具有关键期特征?(3)针对额眼区的光生物调节能否通过增强 alpha 节律的相位一致性,提升副中央凹注意深度,从而改善阅读流畅性?如何实现个性化参数优化以应对儿童脑结构的异质性?

近年来,自然刺激的实验范式逐渐兴起,与实验室中严格的控制变量不同,自然刺激更加接近现实生活中的真实现象。为了阐明学龄儿童中文自然阅读与注意发展的关系问题,本文基于自然阅读的实验范式,相比传统的逐字呈现的阅读范式,更接近于真实阅读的场景,生态效率高,为阅读理论模型的发展提供了新视角。

此外,基础教育高质量发展的关键在于遵循儿童大脑发育和认知发展的客观规律,本研究将为有效提升我国 2 亿多儿童的学习效率,改善数千万学习困难儿童的心理与行为问题提供理论依据。“健康中国 2030”规划纲要明确指出要“加大对重点人群心理问题早期发现和及时干预力度”。本文计划融合认知行为、脑成像、神经调控等多模态手段,结合频率标记技术,综合运用计算模型和表征相似性分析等前沿数据分析方法,旨在量化儿童副中央凹注意编码广度和深度,全面揭示

儿童中文阅读特异的副中央凹注意表征编码的神经基础及发育规律;并进一步结合光生物调节技术,开发精准提升阅读和学习能力的安全有效的脑调控方案,打造中国学龄儿童脑健康“评估-调控-评估”的闭环训练模式,提高国人主动保护脑健康的意识,并带动脑潜能开发等领域的发展。

4 研究构想

围绕“中文自然阅读下学龄儿童副中央凹注意编码的广度和深度及其发展规律”这一关键科学问题,针对学龄期儿童大脑发育快、可塑性强的特点,本文计划以学龄期正常发育儿童为研究对象,旨在阐明:(1)学龄儿童自然阅读中注意编码的神经计算模型,揭示眼跳前注意的广度和深度与眼动分布的关系,建立自然阅读中注意的神经振荡与阅读行为的关联,找到与自然阅读过程中注意表征相关的脑区和神经标记,为“多线程相位编码”模型提供初步的神经证据;(2)结合眼动和脑磁数据,探究儿童自然阅读中注意表征编码广度和深度相关的神经活动随年龄变化的特征,揭示儿童眼跳前注意的多线程相位编码、眼动列维分布和阅读发展三者之间的关系随年龄的变化,为神经调控提供有效的刺激靶点和客观的评价指标,并进一步探究“多线程相位编码”模型在不同发展阶段的适用性,为儿童阅读发展的脑机制研究奠定基础;(3)利用光生物调节技术,建立前额叶尤其是额眼区的神经活动在阅读中注意的多线程相位编码中的因果作用。根据个体的影像学数据,精准闭环调控和提升副中央凹的注意深度,揭示前额叶神经活动的变化与阅读能力提升之间的关系,进一步为“多线程相位编码”提供潜在的因果证据。

为此,本文计划开展三项实验研究(图 1),采集 7~12 岁正常发育的学龄期儿童完成自然阅读任务时的可穿戴脑磁图和眼动数据,研究 1 主要探究儿童阅读中注意编码的关键脑区和脑节律,揭示儿童自然阅读中眼跳前注意编码的神经动力学特征和神经发育模型;研究 2 分为低年级(7~9 岁)与高年级(10~12 岁)两组,通过跨年龄横向比较的方法探讨儿童从学习阅读(learn to read)向利用阅读学习(read to learn)的转变,主要考察研究 1 中发现的关键脑节律随年龄的变化特征;研究 3 则以研究 1、研究 2 的结果为神经调控的靶点,研

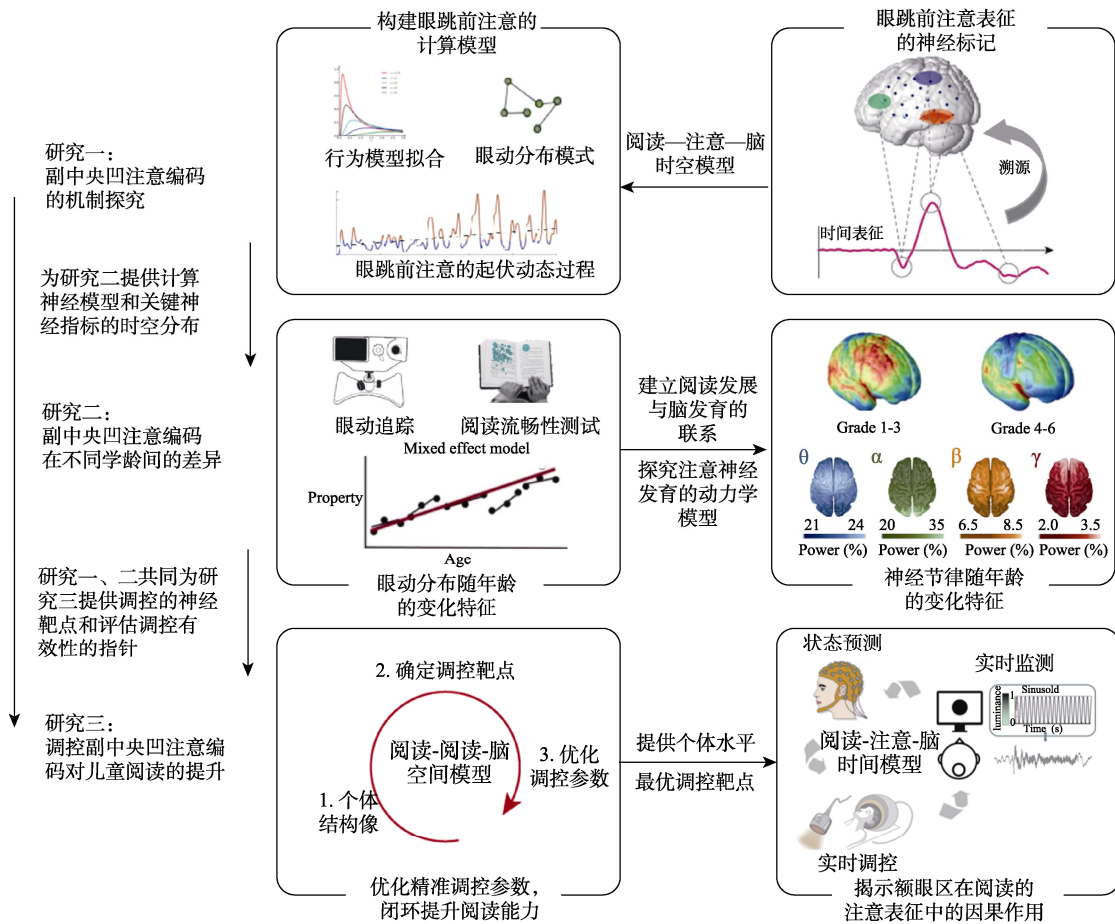


图 1 研究内容的具体框架图

发基于脑影像学精准定位和个体脑节律的神经调控方法以调节注意力、提升阅读能力，建立前额叶与眼跳前注意编码的因果联系，并阐明神经调控方法的脑认知机制。三项研究紧密相连，其研究结果有助于全面系统地理解儿童阅读中的注意表征，为儿童阅读的脑发育研究奠定基础。

4.1 研究 1: 儿童自然阅读下副中央凹注意的计算神经基础

研究 1 拟以副中央凹注意深度(字形和语义)作为被试内变量，构建单因素实验设计，探究熟练阅读儿童自然阅读过程中注视点在目标词之前的词时，眼跳前注意对位于副中央凹目标词的加工广度和深度，旨在揭示儿童副中央凹的预加工机制及注意编码的神经计算模型和层级加工特征。结合 OPM-MEG 技术具有高时间分辨率的优势，本研究计划在儿童完成自然阅读任务时同步

记录脑磁图和眼动信号，基于计算模型和单次表征相似性分析等数据分析方法，提取儿童自然阅读过程中眼跳步长(Saccadic length)和注视点时长(Fixation duration)，用以估计儿童眼动数据和列维分布的拟合程度，基于多线程相位编码模型和自然阅读的流水线加工的理论框架，根据眼动数据的 x、y 坐标，将每个试次的实验材料与眼动坐标相匹配，找到眼睛落在目标词位置的时刻点。通过将眼动与 OPM-MEG 数据对齐，以眼睛注视点第一次到达目标词为时间零点对 OPM-MEG 数据进行分段，并关注眼跳(saccade)/微眼跳(micro-saccade)前后 alpha 相位的一致性，从而揭示眼动符合列维分布这一行为模式背后的神经基础。并对实验材料根据正字法和语义分别进行向量化编码，计算不同句子间的欧式距离，生成实验材料不同句子间的表征不相似性矩阵，对神经

活动生成单次神经数据在不同实验材料间的表征不相似性矩阵随时间的动态变化波形,最后计算神经活动的表征不相似性矩阵与实验材料的表征不相似性矩阵间的相关性,解析儿童神经活动对字形和语义加工的层级性和时间特征,建立眼动列维分布模型、神经节律和额顶注意网络的联系,揭示儿童自然阅读中央凹与副中央凹注意层级编码的时空表征模型。

本研究的假设为:(1)儿童自然阅读的副中央凹眼跳前注意深度总体上在字形层面,未达到语义层面;(2)个体眼跳前注意深度越深,眼动的分布模式越符合列维分布的模式;(3)中央凹处的语义信息和副中央凹的字形信息在不同脑区同时加工,且由节律性神经活动的相位进行时间组织。

4.2 研究 2: 儿童自然阅读下副中央凹注意的不同年龄间的差异研究

研究 2 在研究 1 的基础上增加年龄作为新变量,拟以副中央凹注意深度(字形和语义)作为被试内变量,年龄(7~9 岁、10~12 岁)作为被试间变量,构建两因素实验设计,从神经发育的视角,以研究 1 发现的关键行为和神经指标为基础,通过在儿童完成自然阅读任务时同步记录脑磁图和眼动信号,结合快速不可见频率标记(RIFT)技术,目标词以 55~75 Hz 的频率进行不可见的闪烁。前期成年人研究表明,受试者无法察觉自然阅读过程中有字词在闪烁,并可以在视觉皮层诱发稳态响应。RIFT 技术可用于测量神经元的兴奋性,并且与注意投放的强度高度相关(Zhigalov et al., 2019)。因此可以通过计算不同的目标词的频率标记信号和眼睛落在预视词时 OPM-MEG 采集的神经信号的相干性(Coherence),来评估儿童自然阅读过程中副中央凹的注意编码深度是在字型还是语义层面,并整合 OPM-MEG 高时间分辨率的特点实时探测儿童自然阅读中注意表征在线的起伏;建立儿童阅读流畅性等行为指标与注意相关的频率标记反应和相位振幅耦合等神经活动的关系,探究儿童阅读行为与注意相关的神经活动随年龄的动态变化特征,探究眼动列维分布、眼跳前注意深度的神经表征随年龄发展变化规律,揭示儿童阅读发展的关键神经表征和神经计算模型。

本研究的假设为:(1)随着儿童年龄的增长,儿童眼动分布模式和列维分布模型拟合越好;(2)神经活动上表现出更大的副中央凹注意广度和深

度。具体来说,当注视点位于目标词之前的一个词时,若字形正确条件下频率标记信号和 OPM-MEG 信号的相干性显著强于字形不正确条件下的相干性,则说明儿童副中央凹注意编码的深度达到了字形层面;若语义通顺条件下频率标记信号和 OPM-MEG 信号的相干性显著强于语义不通顺条件下的相干性,则说明儿童副中央凹注意编码的深度达到了语义层面;反之则副中央凹加工可能没有达到该层面。由于注视点此时还落在目标词之前的词语,频率标记信号和 OPM-MEG 信号的相干性为副中央凹注意深度是在字形还是语义层面提供了依据。而对于注意编码广度的分析则是指,允许个体探测到上述不同条件上的相干性差异时注视点和目标词之间的字词数量,若是只能在目标词之前的一个词被发现,则注意广度为 1;若是能在更多数量的字词发现了条件间在相干性上存在显著差异,则说明有更大的注意广度。

4.3 研究 3: 基于闭环光生物调节技术的儿童阅读能力增强随机对照研究

研究 3 在研究 1 的基础上增加神经调控作为新变量,拟以副中央凹注意深度(字形和语义)、光生物调节的神经调控方式(真刺激和假刺激)作为被试内变量,构建两因素实验设计,旨在探究额眼区神经活动在儿童自然阅读下副中央凹注意广度和深度中的因果作用。该因果关系的“因”是额眼区;“果”是指在随机对照双盲实验中,与安慰剂刺激相比,由真 tPBM 刺激引发的、与副中央凹注意相关的神经或阅读测度变化。通过多模态融合光生物调节、OPM-MEG、眼动的技术手段,施加波长 1064 nm 的 tPBM 旨在靶向刺激额眼区,基于交叉双盲随机对照的实验方法来排除安慰剂效应,通过对比真假刺激间的差异,如果因果关系假设成立,真刺激后儿童的在与副中央凹注意广度和深度相关的神经活动相干性指标上与假刺激存在显著差异,同时被试在真假刺激间的眼睛在目标词上的注视点时长等行为指标也存在显著差异,提示 tPBM 具有显著的干预效应。此外,阅读发展模型以语言能力为主(e.g., Gough & Tunmer, 1986),较少纳入非言语能力,限制了对儿童阅读成绩落后的解释能力。检验以额眼区为关键节点的额顶注意网络在阅读中的作用,能够为整合非言语能力和阅读能力发展模型提供支持,为儿童阅读困难的非言语能力干预方案提供依据。本研

究将尝试构建神经增强效应在真/假刺激与行为改善之间的中介模型,提供“光刺激-神经响应-行为改善”的证据链,从时间和空间两个维度探究关键神经节律和关键脑区在中文自然阅读场景中注意表征的多线程相位编码中的因果作用;结合个体的磁共振结构像空间定位,基于个体实时的脑活动状态和行为表现,融合神经计算模型和影像学数据提供个体水平的最优光生物调节刺激参数,开发个性化的闭环脑调控技术,实现儿童自然阅读下注意能力的精准调控和个体化提升,揭示光生物调节技术能否以及如何提高儿童自然阅读的能力,探讨前额叶神经活动的变化与阅读能力提升之间的关系。

本研究的假设为:(1)相对于安慰剂刺激,真1064 nm光生物调节刺激额眼区后,儿童眼跳前注意深度加深,列维分布拟合优化,相关的神经活动得到显著提升;(2)神经活动在真假刺激中的差异与儿童阅读能力提升的差异存在显著相关;(3)光刺激对儿童阅读能力的提升效果与年龄呈现负相关趋势,年龄越小,提升效果越明显。

5 理论建构与创新

本研究以“多线程相位编码”模型(Jensen et al., 2021)为框架,整合神经振荡、眼动控制与语言加工理论,构建儿童自然阅读中副中央凹注意编码的层级-动态模型(Hierarchical-Dynamic Model, HDM)。该模型包含三个核心维度:层级编码、相位组织和神经发育可塑性,旨在揭示从视觉输入到语义整合的神经计算模型及其年龄依赖性变化。

该模型的理论框架认为,(1)眼跳前注意可以帮助儿童提前获取副中央凹中的信息,提取的深度随年龄逐渐加深且与儿童阅读流畅性相关;(2)不同脑区可以同时中央凹的语义信息和副中央凹的字形结构进行编码;(3)位于中央凹和副中央凹的同一层级信息符合序列编码规则,由眼跳前注意相关神经振荡的相位进行时间组织,中央凹和副中央凹信息分别在alpha节律的不同相位上进行编码。

本研究的创新之处在于直接探测儿童自然阅读情境下注意的实时起伏,揭示儿童阅读能力发育的神经动态性特征,以及与视觉注意发展之间的关系。这一创新将为阅读的儿童脑智发育研究领域提供新的研究视角和方法,多模态融合认知

神经科学、发展心理学与系统科学等跨学科的技术和分析方法,为理解儿童自然阅读中注意表征的神经基础、无创提升儿童阅读能力提供了全新理念和方法。在此基础上,我们将实现揭示儿童阅读的神经系统动力学模型的目的,帮助更加全面的揭示学龄儿童自然阅读中注意发展一般系统规律,打造中国学龄儿童脑健康“评估-调控-评估”的闭环管理模式,不断提高国人主动保护脑健康的意识,并带动脑潜能开发等领域的发展。

综上,本研究开创性地运用中文自然阅读范式,结合多模态联合记录和快速频率标记的研究手段,尤其是结合全新的OPM-MEG技术,实时评估中文阅读情境下儿童的注意分配,揭示学龄儿童自然阅读情境下注意的发育规律。这种实时注意监测的自然情境实验范式具有生态化效率高,应用转化潜力大的特点,不仅适用于阅读领域,还可以推广到研究依赖视觉注意的其他认知加工过程,以及工程实践和临床转化中。根据个体的脑数据建模生成个性化刺激参数,实现光生物调节精准干预,为实现闭环神经调控奠定重要基础。

参考文献

- 陈松林,陈新炜,李璜夏,药盼盼.(2024).阅读研究中常用眼动控制模型的对比分析. *心理科学进展*, 32(1), 100-117.
- 李杰,杨悦,赵婧.(2021).汉语发展性阅读障碍儿童视觉同时性加工技能子成分的发展及其与阅读的关系. *心理学报*, 53(8), 821-836.
- 王久菊,孟祥芝,李虹,崔新,洪恬,杨斌让...王玉凤.(2023).汉语发展性阅读障碍诊断与干预的专家意见. *中国心理卫生杂志*, 37(3), 185-191.
- 张慢慢,胡惠兰,张志超,李鑫,汪强,白学军,臧传丽.(2023).预测性对快速读者和慢速读者词汇加工的影响. *心理学报*, 55(1), 79-93.
- Bagherzadeh, Y., Baldauf, D., Pantazis, D., & Desimone, R. (2020). Alpha synchrony and the neurofeedback control of spatial attention. *Neuron*, 105(3), 577-587.
- Boto, E., Holmes, N., Leggett, J., Roberts, G., Shah, V., Meyer, S. S., ... Brookes, M. J. (2018). Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system. *Nature*, 555(7698), 657-661.
- Buschman, T. J., & Miller, E. K. (2009). Serial, covert shifts of attention during visual search are reflected by the frontal eye fields and correlated with population oscillations. *Neuron*, 63(3), 386-396.
- Carreiras, M., Armstrong, B. C., Perea, M., & Frost, R. (2014). The what, when, where, and how of visual word recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(2), 90-98.

- Cellier, D., Riddle, J., Petersen, I., & Hwang, K. (2021). The development of theta and alpha neural oscillations from ages 3 to 24 years. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 50, 100969.
- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K., & Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLoS Biology*, 16(3), e2004103.
- dos Santos Cardoso, F., Dos Santos, J. C. C., Gonzalez-Lima, F., Araújo, B. H. S., Lopes-Martins, R. Á. B., & Gomes da Silva, S. (2021). Effects of chronic photobiomodulation with transcranial near-infrared laser on brain metabolomics of young and aged rats. *Molecular Neurobiology*, 58(5), 2256–2268.
- Ellis, C. T., Skalaban, L. J., Yates, T. S., & Turk-Browne, N. B. (2021). Attention recruits frontal cortex in human infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(12), e2021474118.
- Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Viola, S., Molteni, M., & Facoetti, A. (2013). Action video games make dyslexic children read better. *Current Biology*, 23(6), 462–466.
- Gabrieli, J. D., & Norton, E. S. (2012). Reading abilities: Importance of visual-spatial attention. *Current Biology*, 22(9), R298–R299.
- Gao, F., Wang, J., Wu, C., Wang, M. Y., Zhang, J., & Yuan, Z. (2022). The neural dynamics associated with lexicality effect in reading single Chinese words, pseudo-words and non-words. *Cognitive Neurodynamics*, 16(2), 471–481.
- Gough, P. B., & Tunmer, W. E. (1986). Decoding, reading, and reading disability. *Remedial and Special Education*, 7(1), 6–10.
- Gruhn, S., Segers, E., Keuning, J., & Verhoeven, L. (2020). Profiling children's reading comprehension: A dynamic approach. *Learning and Individual Differences*, 82, 101923.
- Guo, J., Luo, X., Kong, Y., Li, B., Si, B., Jensen, O., ... Song, Y. (2023). The effects of first-dose methylphenidate on the neural signatures of visual selective attention in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychology*, 177, 108481.
- Herring, J. D., Thut, G., Jensen, O., & Bergmann, T. O. (2015). Attention modulates TMS-locked alpha oscillations in the visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 35(43), 14435–14447.
- Hjetland, H. N., Lervåg, A., Lyster, S. A. H., Hagtvet, B. E., Hulme, C., & Melby-Lervåg, M. (2019). Pathways to reading comprehension: A longitudinal study from 4 to 9 years of age. *Journal of Educational Psychology*, 111(5), 751–763.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Shah, P., & Jonides, J. (2014). The role of individual differences in cognitive training and transfer. *Memory & Cognition*, 42, 464–480.
- Jensen, O., & Mazaheri, A. (2010). Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: Gating by inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 186.
- Jensen, O., Pan, Y., Frisson, S., & Wang, L. (2021). An oscillatory pipelining mechanism supporting previewing during visual exploration and reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(12), 1033–1044.
- Kornrumpf, B., Dimigen, O., & Sommer, W. (2017). Lateralization of posterior alpha EEG reflects the distribution of spatial attention during saccadic reading. *Psychophysiology*, 54(6), 809–823.
- Leonards, U., Sunaert, S., Van Hecke, P., & Orban, G. A. (2000). Attention mechanisms in visual search—An fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(Suppl. 2), 61–75.
- Li, D., Hu, Y., Qi, M., Zhao, C., Jensen, O., Huang, J., & Song, Y. (2023). Prioritizing flexible working memory representations through retrospective attentional strengthening. *NeuroImage*, 269, 119902.
- Li, D., Luo, X., Guo, J., Kong, Y., Hu, Y., Chen, Y., ... Song, Y. (2023). Information - based multivariate decoding reveals imprecise neural encoding in children with attention deficit hyperactivity disorder during visual selective attention. *Human Brain Mapping*, 44(3), 937–947.
- Li, D., Zhao, C., Guo, J., Kong, Y., Li, H., Du, B., ... Song, Y. (2021). Visual working memory guides spatial attention: Evidence from alpha oscillations and sustained potentials. *Neuropsychologia*, 151, 107719.
- Li, N., Dimigen, O., Sommer, W., & Wang, S. (2022). Parafoveal words can modulate sentence meaning: Electrophysiological evidence from an RSVP-with-flanker task. *Psychophysiology*, 59(9), e14053.
- Li, X., & Pollatsek, A. (2020). An integrated model of word processing and eye-movement control during Chinese reading. *Psychological Review*, 127(6), 1139–1162.
- Liu, H., Nizamutdinov, D., & Huang, J. H. (2023). Transcranial photobiomodulation with near-infrared light: A promising therapeutic modality for Alzheimer's disease. *Neural Regeneration Research*, 18(9), 1944–1945.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT Press.
- Moore, T., & Fallah, M. (2004). Microstimulation of the frontal eye field and its effects on covert spatial attention. *Journal of Neurophysiology*, 91(1), 152–162.
- Pan, Y., Frisson, S., & Jensen, O. (2021). Neural evidence for lexical parafoveal processing. *Nature Communications*, 12(1), 5234.
- Pan, Y., Popov, T., Frisson, S., & Jensen, O. (2023). Saccades are locked to the phase of alpha oscillations during natural reading. *PLoS Biology*, 21(1), e3001968.
- Panichello, M. F., & Buschman, T. J. (2021). Shared mechanisms underlie the control of working memory and attention. *Nature*, 592(7855), 601–605.
- Papanikolaou, C., Sharma, A., Lind, P. G., & Lencastre, P. (2024). Lévy-flight model of gaze trajectories to improve ADHD diagnoses. *Entropy*, 26(5), 392.

- Protopapas, A., Altani, A., & Georgiou, G. K. (2013). Development of serial processing in reading and rapid naming. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(4), 914–929.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422.
- Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, 105(1), 125–157.
- Reichle, E. D., & Reingold, E. M. (2013). Neurophysiological constraints on the eye-mind link. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 361.
- Remington, R. W., Vromen, J. M., Becker, S. I., Baumann, O., & Mattingley, J. B. (2021). The role of frontoparietal cortex across the functional stages of visual search. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 33(1), 63–76.
- Salehpour, F., Mahmoudi, J., Kamari, F., Sadigh-Eteghad, S., Rasta, S. H., & Hamblin, M. R. (2018). Brain photobiomodulation therapy: A narrative review. *Molecular Neurobiology*, 55(8), 6601–6636.
- Schall, J. D. (2004). On the role of frontal eye field in guiding attention and saccades. *Vision Research*, 44(12), 1453–1467.
- Schmolesky, M. T., Wang, Y., Hanes, D. P., Thompson, K. G., Leutgeb, S., Schall, J. D., & Leventhal, A. G. (1998). Signal timing across the macaque visual system. *Journal of Neurophysiology*, 79(6), 3272–3278.
- Schotter, E. R., Angele, B., & Rayner, K. (2012). Parafoveal processing in reading. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(1), 5–35.
- Stephen, D. G., Mirman, D., Magnuson, J. S., & Dixon, J. A. (2009). Lévy-like diffusion in eye movements during spoken-language comprehension. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 79(5), 056114.
- Tiffin-Richards, S. P. (2024). Bilingual parafoveal processing: Children and adults preprocess orthographic information of the upcoming word during sentence reading in their first and second language. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 50(11), 1844–1861.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*, 6(7), 767–773.
- Wang, E., Sun, M., Tao, Y., Gao, X., Guo, J., Zhao, C., ... Song, Y. (2017). Attentional selection predicts rapid automatized naming ability in Chinese-speaking children with ADHD. *Scientific Reports*, 7(1), 939.
- Wang, Y., Guan, H., Ma, L., Luo, J., Chu, C., Hu, M., ... Tao, S. (2023). Learning to read may help promote attention by increasing the volume of the left middle frontal gyrus and enhancing its connectivity to the ventral attention network. *Cerebral Cortex*, 33(5), 2260–2272.
- Woolnough, O., Donos, C., Rollo, P. S., Forseth, K. J., Lakretz, Y., Crone, N. E., ... Tandon, N. (2021). Spatiotemporal dynamics of orthographic and lexical processing in the ventral visual pathway. *Nature Human Behaviour*, 5(3), 389–398.
- Yang, M., Liu, Y., Yue, Z., Yang, G., Jiang, X., Cai, Y., ... Chen, L. (2024). Transcranial photobiomodulation on the left inferior frontal gyrus enhances Mandarin Chinese L1 and L2 complex sentence processing performances. *Brain and Language*, 256, 105458.
- Yao, P., Slattery, T. J., & Li, X. (2021). Sentence context modulates the neighborhood frequency effect in Chinese reading: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 48(10), 1507–1517.
- Yildiz, M., & Çetinkaya, E. (2017). The relationship between good readers' attention, reading fluency and reading comprehension. *Universal Journal of Educational Research*, 5(3), 366–371.
- Zhao, C., Li, D., Kong, Y., Liu, H., Hu, Y., Niu, H., ... Song, Y. (2022). Transcranial photobiomodulation enhances visual working memory capacity in humans. *Science Advances*, 8(48), eabq3211.
- Zhigalov, A., Herring, J. D., Herpers, J., Bergmann, T. O., & Jensen, O. (2019). Probing cortical excitability using rapid frequency tagging. *NeuroImage*, 195, 59–66.

The developmental neural basis of parafoveal attention encoding in children during natural Chinese reading

LI Dongwei¹, QI Mengdi², TANG Shuning¹, CHEN Luyao³, CUI Xin¹

¹ Department of Psychology, Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519085, China)

² Experimental Teaching Platform, Academic Affairs Office, Beijing Normal University, Zhuhai 519085, China)

³ School of International Chinese Language Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This study aims to explore the developmental neural mechanisms of parafoveal attention encoding in school-age children during natural Chinese reading and its impact on reading ability. By integrating (Optically pumped magnetometer magnetoencephalography, OPM-MEG), eye-tracking, and (Transcranial photobiomodulation, tPBM), we systematically investigate the dynamic neural representations and developmental patterns of pre-saccadic attention during natural reading. The research focuses on three questions: (1) the association between the processing scope and depth of parafoveal attention and eye movement patterns in children; (2) the applicability of the multiplexing phase coding model in children's reading, specifically the neural oscillatory phase synchronization mechanisms underlying parallel processing of foveal semantic and parafoveal orthographic information in the visual cortex and prefrontal regions; (3) the intervention effects of tPBM targeting the frontal eye field (FEF) on enhancing parafoveal attention depth and reading fluency. This study pioneers the integration of natural reading paradigms and advanced neurotechnologies to reveal real-time attentional dynamics in children's reading. The findings are expected to provide a theoretical foundation for "brain development-based reading education" and establish a scientific basis for developing safe and precise neuroregulatory strategies to address reading difficulties in children.

Keywords: natural reading, attention, children, EEG/MEG, Transcranial Photobiomodulation