

阅读发展的神经机制

王姿懿

广东外语外贸大学外国语言学及应用语言学研究, 广东 广州

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年8月25日; 发布日期: 2025年9月8日

摘要

阅读是人类获取的一种关键能力, 它加速了人类文明的进程。人类阅读能力并非是与生俱来的, 而是源自于环境对人脑的塑造, 是人脑可塑性的体现。对阅读发展神经机制的研究, 使得研究者可以洞察大脑是如何调整和优化阅读过程的。这不仅有助于揭示阅读网络形成和发展的内在机制, 也有助于进一步揭示了人脑可塑性的深层原理。除此之外, 这些研究还有助于阐明阅读障碍的成因及其发展机制, 为实施有针对性的阅读干预措施提供科学依据。尽管在阅读发展的神经机制领域, 研究者已经取得了一定的研究成果, 但依然有许多关键性问题尚待解决。比如, 视觉阅读网络与语言网络之间的融合机制, 以及阅读网络发展如何与个体的一般脑网络发展相互关联, 都是当前研究中的难题。为了深入解答这些问题, 迫切需要借助新的方法和工具, 来推动阅读神经机制的研究向更深层次发展。

关键词

阅读, 发展, 神经机制, 方法

The Neural Mechanism of Reading Development

Ziyi Wang

Center for Linguistics and Applied Linguistics, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou Guangdong

Received: Aug. 5th, 2025; accepted: Aug. 25th, 2025; published: Sep. 8th, 2025

Abstract

Reading is a profound innovation, which promotes the process of human civilization. Numerous researches have been conducted for the neural mechanism about reading. However, there remains a paucity of study about the neural development of reading acquisition and the neural mechanisms underlying reading development is still unclear. The neural mechanisms underlying reading development shed light on how the brain adapts and optimizes the reading process, which is of great

importance for neural plasticity of our brains, as well as the cause of reading disability. It also plays a significant role in improving educational practices, and developing personalized learning strategies. Recent progress in research indicates that reading development occurs in three to four distinct phases, with corresponding changes in brain function. Specifically, reading emerged as the functional specification of the left occipitotemporal regions, and the brain function became more complexity as reading development. During reading acquisition, reading development is also characterized by dynamic changes in neural pathways. Begin readers initially started to learn to read through decoding ability, which relied much on the dorsal pathway, but when reading is skilled, readers turned to the ventral pathway to enhance reading efficiency. Although substantial progress has been made in the field, the intricacies of the neural mechanisms of reading development still need further investigation. The recently developed methods now offer fresh perspectives to unravel the mechanism underlying reading development.

Keywords

Reading, Development, Neural Mechanism, Methods

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

阅读作为人类获取间接经验的重要手段，不仅是知识传承的桥梁，更是文明累积的基石。大量研究表明，阅读能力的发展与三个关键脑功能网络的协作密不可分。这三个网络分别是：枕颞网络(occipitoparietal regions)，包括左侧枕中回(Middle occipital gyrus)，左侧颞下回(Inferior temporal gyrus)和左侧颞中回(Middle temporal gyrus)；颞顶网络(temporoparietal regions)，包括左后侧颞上回(Superior temporal gyrus)和左侧顶下小叶(inferior parietal lobule)；和额下网络(inferior frontal region)，包括左侧额下回(Inferior frontal gyrus)和中央前回(Precentral gyrus) (Pugh et al., 2000; Richlan, 2012)。具体而言，枕颞网络负责处理字形表征，即与字形编码、识别和形音对应相关的加工。颞顶网络负责语音表征，实现文字到语音的转换。额下网络则承担着整合这些信息并协调发音的功能。尽管已有研究揭示了这些脑网络在阅读中的各自功能，但熟练阅读能力是如何在这些网络的共同支撑下逐步形成的，仍是一个充满挑战的科学难题(Schlaggar & McCandliss, 2007)。本研究旨在回顾现有关于阅读发展的神经成像研究，以期揭示阅读能力发展的神经机制，并为阅读障碍的早期识别和干预提供科学依据。

2. 阅读网络的形成及阅读发展的阶段

2.1. 阅读网络的形成

从历史和进化的角度来看，人类阅读大约出现在 6000 年前，这在人类历史进程中是一个相对较短的时间，并不足以进化出独立的神经环路来支撑阅读的发展(Norton & Wolf, 2012)。Mattingly (1972)认为阅读在个体发生上晚于言语，其难度也大于言语；并且所有现存的语言都有口语形式，而并非所有语言都存在书写系统。因此，Mattingly 将阅读形象地比喻为建立于言语之上的产品，认为阅读的获取在神经上是建立于已有语言网络的基础之上的。那么，阅读网络是如何建立于已有大脑网络之上的呢？受进化理论中的“扩展适应”概念的影响，Dehaene 和 Cohen (2007)提出了神经再利用假说。该假说指出，人类在进化过程中，其大脑形成了特定的神经结构和连接，这些结构和连接构成了人类学习的基础。人类的学

习是对这些特定神经回路的重新利用。对阅读能力而言, 阅读网络的形成涉及对已有视觉系统和语言系统的重新利用。在此基础之上, 两个系统相互融合, 从而形成支持阅读的独特网络。相关研究表明, 两个系统融合越好, 个体的阅读能力也越强(Preston et al., 2016; Rueckl et al., 2015)。

2.2. 阅读发展的不同阶段及其神经机制

个体阅读发展并非是一个自发的过程, 它需要经过多年的正式训练。这种能力涉及一系列复杂的认知过程。根据儿童阅读文字信息所采用的策略不同, Frith (1986)提出了阅读发展的三阶段理论, 这三个阶段分别是图标阶段、拼音阶段和正字法阶段。在 6 岁之前, 儿童尚未接受正式的阅读训练, 他们往往以类似辨识图画的方式来识记文字, 此时的儿童处于图标阶段。在这个阶段, 儿童仅仅能够通过文字的一些显著图形特征来进行识别, 还未能进行有效的拼读。到了大约 8 岁, 儿童通过正规教育开始学会对每一个字母进行语音分析, 然后将这些声音按顺序组合起来, 从而实现对文字的识别。这个时期的儿童, 开始通过拼读方法识别文字, 标志着他们进入了拼音阶段。在大约 12 岁时, 儿童的阅读能力有了进一步的发展。他们不再需要逐音逐字地进行语音分析, 而是能够运用正字法规则, 像成人一样对文字进行解码, 这标志着儿童进入了正字法阶段。在此基础之上, Ehri (2020)将拼音阶段细分为两个子阶段, 提出了阅读发展的四阶段理论。分别为前拼音阶段, 等同于 Frith 理论的图标阶段; 部分拼音阶段, 此阶段的儿童尚未完全掌握形音对应规则, 不能完全解码文字; 完全拼音阶段, 此阶段儿童完全掌握了形音对应规则, 可以利用规则解码文字; 最后一个阶段是巩固拼音阶段, 类似于 Frith 理论的正字法阶段。在认知层面, 阅读的双通道模型认为, 文字解码过程涉及两条路径: 一条是依赖形音对应规则的副词汇通路(Sublexical route), 另一条是文字直接通达的词汇通路(Lexical route)。阅读的发展, 伴随着对两条通路的依赖程度的改变(Smith et al., 2018)。近年来的神经科学研究发现, 这两条通路分别由弓形束和上纵束构成的背侧通路, 以及由下额枕束构成的腹侧通路支持(Friederici, 2012; Kearns et al., 2019)。这两条神经通路的发展分别与阅读发展的拼音阶段和正字法阶段相对应。

3. 阅读发展的神经机制

对阅读发展的脑功能机制的研究目前还相对较少, 研究者对阅读发展规律的掌握还相对薄弱。Ozernov-Palchik (2023)等采用纵向研究设计发现, 在英语中, 儿童的阅读流畅性的发展伴随着双侧颞下回的激活增强。另一项针对波兰语的追踪研究, 也发现启蒙阶段儿童(6 岁)阅读的发展与左侧枕颞区域的功能改变密切相关(Dębska et al., 2023)。这表明, 阅读能力的萌芽和发展均与左侧枕颞区域的发展存在密切联系。另一项元分析对二十项成人研究和二十项儿童研究的对比发现儿童和成人在阅读中虽然共享相似的大脑功能区域, 但是其脑功能也各具其独特的特征(Martin et al., 2015)。这表明, 阅读的发展可能涉及不同的神经机制。

3.1. 阅读网络的发展起始于左侧视觉字形区对字形的特异化

简单阅读观(simple view of reading)认为阅读由解码和语言理解两个子系统组成(Gough & Tunmer, 1986; Hoover & Gough, 1990)。基于这一理论, 阅读区别于语言最核心特征是对视觉文字符号的解码, 即字形到语音和语义的映射。从这一理论出发, 而阅读网络的发展实际上起始于字形的解码过程。而这一过程将会极大地改变人类的大脑, 这种改变包括以梭状回为中心的视觉激活增强和颞平面对语音信息的激活增强(Dehaene et al., 2010)。其中, 最为核心的改变是左侧视觉字形区的形成。Chyl 等(2021a)指出, 左侧枕颞区域对文字敏感度的提升是阅读能力发展的重要标志。研究表明, 人类左侧视觉字形区具有很强的可塑性, Pleisch 等(2019a)的研究表明, 仅仅经过短短几个小时的训练, 就可以检测出视觉字形区的变化。一项纵向研究采用多时间点扫描技术对刚进行阅读学习的 6 岁儿童每隔两个月进行 1 次 fMRI 扫

描, 共计进行了 7 次扫描。研究发现, 左侧视觉字形区在儿童开始学习阅读后, 最初检测不到对于文字的反应, 到迅速形成并稳定(Dehaene-Lambertz et al., 2018)。这更直接证明了阅读网络的形成起始于左侧视觉字形区对字形的特异化。同时, 研究还发现, 最初的视觉字形区对面孔、数字、工具等都有反应, 随着阅读学习, 这一区域逐渐表现出对字形的特异化。这也为神经再利用假说提供了进一步的证据。然而, 人类阅读能力的萌芽, 可能早在正式阅读训练之前就已经开始。在 Frith (1986) 的阅读发展阶段理论中, 正式阅读训练之前, 还存在一个前阅读阶段。这一阶段的儿童虽然没有接受正式的阅读训练, 但是已经发展出阅读的雏形。Lochy 等(2016)的研究证实了左侧视觉字形区的特异化进程早在儿童正式阅读学习之前就已经出现, 并表现出左偏侧化(Lochy & Schiltz, 2019)。他们采用 EEG 技术, 仅需两分钟的数据采集就可以探测到左侧枕颞区对于文字的反应。而正式阅读训练, 加速了左侧枕颞区域对于文字的特异化程度(van de Walle de Ghelcke et al., 2021)。这表明, 早在儿童正式接受阅读训练之前, 儿童的阅读能力就已经萌芽, 阅读网络的神经支持系统也已经开始了特异化进程。在阅读障碍的研究中, 左侧视觉字形区域的脑功能异常作为阅读障碍的核心脑功能异常之一。这一区域的脑功能异常, 在儿童尚未正式学习阅读之前就能被检测到(Centanni et al., 2019; Pleisch, Karipidis, Brem, et al., 2019b)。这表明, 早期视觉字形区的特异化失败可能是阅读障碍形成的重要原因。

3.2. 阅读能力的发展伴随着视觉阅读网络和语言网络的融合

阅读的发展在左侧视觉字形区不断特异化的同时, 也进行着视觉阅读网络和语言网络的融合。Chyl 等(Chyl et al., 2018)对受过阅读训练的儿童和未受阅读训练的儿童的对比发现, 仅有受过阅读训练的儿童在外侧裂语言周区出现了对于视觉文字信息和听觉语言信息的共同激活。这表明当儿童开始正式阅读学习过程中, 视觉阅读网络和语言网络开始融合发展。而视觉阅读网络和语言网络的融合发展, 对于儿童阅读能力的发展至关重要。另一项纵向研究指出, 刚开始接受阅读训练的儿童视觉阅读网络和语言网络的融合程度可以预测两年后儿童的阅读能力(Preston et al., 2016)。证明了视觉阅读网络与语言网络的早期交互在阅读能力的发展中的重要作用。同时, 跨文化研究也表明, 无论是对于初学阅读的儿童(Chyl et al., 2021b)还是对于熟练的阅读者(Rueckl et al., 2015), 视觉阅读网络和语言网络的融合都表现出稳定的跨文化一致性。表明不同文化背景下的特定区域的视觉阅读网络与语言网络的协同是阅读发展的通用神经机制。另外, Yan 等的研究也指出, 视觉阅读网络和语言网络的融合异常是阅读障碍个体的核心特征之一(Yan et al., 2024b)。这些发现为我们理解阅读发展的神经机制和阅读障碍的神经基础提供了重要视角, 同时也指出了改善阅读障碍干预策略的潜在途径。

3.3. 阅读能力的发展伴随着脑功能复杂性的增加

阅读是一种高级认知活动, 阅读能力的提升, 伴随着人脑认知复杂度的提升。已有研究表明, 一般的发展伴随着脑功能信号变异性的增加和行为变异性的减弱(McIntosh et al., 2008)。一项针对 44 名 8~11 岁的儿童的研究发现, 左侧额下回区域的脑功能复杂性指标与阅读能力之间呈现正相关关系(Malins et al., 2018)。表明阅读能力与人脑功能的复杂性密切相关。另一项成人和儿童的对比研究发现, 与儿童相比, 成人在观看数学和阅读相关视频时, 在额叶和枕叶的大部分区域的脑功能复杂性高于儿童。并且, 阅读相关的功能复杂性与脑功能的成熟度呈正相关关系(Amalric & Cantlon, 2023)。表明, 阅读网络的发展和成熟伴随着功能复杂性的增加。目前, 此类研究还相对较少, 研究者可以进一步丰富阅读与脑功能复杂性之间关系的研究。

3.4. 阅读发展的不同阶段涉及不同的大脑环路

熟练阅读的重要标志是视觉文字对语言网络的自动化激活(Joo et al., 2021), 也就是说读者不再需

要依赖语音解码来识别文字，而是能够形成视觉输入与语音和语义的自动连接。这标志着阅读者从“学习阅读”到“阅读学习”的转变，即从基础的文字识别和解码技能向利用阅读作为获取知识和学习新技能的工具转变。这一转变过程涉及到不同的大脑环路的转换。这种转换可能包括两个阶段的转变，第一个阶段的转变涉及从大颗粒度的语音单元向更精细的语音单元的转变，在大脑功能上对应左侧枕颞区域脑激活的从后向前梯度改变，后侧枕颞区域负责大颗粒的语音单元的加工，而前侧枕颞区域负责更精细的语音加工(Dębska et al., 2023)。以及从副词汇通路向更直接的词汇语义通路的转变，Bouhali 等(2019)的研究显示内侧枕颞区域更倾向副词汇通路的语音编码，而外侧枕颞区域更倾向直接的词汇语义加工。因而显示出枕颞区域从内向外的梯度改变。这一阶段的转变更大程度上对应 Ehri (2020)发展理论中从部分拼音阶段向完全拼音阶段的转变。另一个阶段的转变，涉及从依赖解码到自动化激活的转变，即由背侧通路向腹侧通路的转变。Younger 等(2017)对 58 名 8~14 岁的儿童进行 2~3 年的追踪研究发现，儿童阅读能力的提升与背侧通路的初始连通性较高有关，随着儿童阅读能力的提升，背侧通路的连通性变弱，而腹侧通路的连通性与阅读能力提升的关系一直保持稳定。这表明，随着儿童阅读能力的提升，儿童会逐步摆脱对解码的依赖，从而采用更为自动化的腹侧通路实现阅读的快速实现。在阅读障碍研究中，Pugh 等(2000)指出，由于正常阅读对左侧枕颞区域的依赖会越来越强，因此左侧枕颞区域的脑功能异常可能会逐渐变大。阅读障碍个体在左侧枕颞区域的累积效应在一项元分析(Richlan et al., 2011)和最近的一项成人和儿童的对比研究(Yan et al., 2024a)中得到进一步的验证。

4. 阅读发展神经度量的新进展

目前，随着脑功能成像分析技术的发展，对脑功能发展的度量已经并不局限于基于脑激活的组间差异分析，近些年涌现了许多新的统计指标来刻画脑功能的发展。下面将从阅读特异性发展指标和一般发展性指标两个方面进行论述。

4.1. 阅读特异性神经度量 - 视觉阅读网络和语言网络融合度

视觉阅读网络和语言网络融合度(Print-speech convergence)是一种刻画阅读发展的特异性指标，该指标度量的是语言网络和视觉阅读网络的整合程度(Yan et al., 2024b)。该指标最早是由 Rueckl 等(Rueckl et al., 2015)提出，目前，该指标在阅读发展研究(Chyl et al., 2018; He et al., 2021)，第二语言学习研究(Gurunandan et al., 2019)和阅读障碍研究(Yan et al., 2024b)中均得到应用。常用的视觉阅读网络和语言网络融合度指标包括共激活(coactivation)分析(Chyl et al., 2021b; Dębska et al., 2021; Preston et al., 2016; Rueckl et al., 2015; Yan et al., 2024b)，基于体素的相关分析(Marks et al., 2019; Rueckl et al., 2015)，和表征相似性分析(Chyl et al., 2021b; Yan et al., 2024b)。共激活分析一般更局限于感兴趣区分析，基于全脑的共激活分析仅能提供群体水平的共激活展示(Marks et al., 2019)，没有办法进行更进一步的统计检验。基于体素的相关分析和表征相似性分析方法则更灵活，可以进行感兴趣区分析和全脑分析。这些指标的综合运用可以从不同的层面揭示视觉阅读网络和语言网络融合程度。

4.2. 一般神经度量

4.2.1. 脑信号变异性指标

脑功能的发展和成熟，往往伴随着脑功能信号变异性的增加。然而，目前更多地研究关注的是脑功能数据的集中趋势(例如，均数，中位数等)，数据的变异性指标常常被认为是不携带任何信息的噪音而被忽视(Garrett et al., 2013)。然而，最近的研究表明，脑功能数据的变异性也携带丰富的信息，可以帮助对数据的解读。试次间变异性指标和熵这两个指标是较常用的信号变异性指标。

(1) 试次间变异性(Trial-to-trial variability)

试次间变异性指的是人脑对重复出现的刺激的差异化反应。试次间变异性揭示了大脑功能的动态性和复杂性,是大脑高效处理信息的标志。目前,这一指标已经被应用于多种脑成像技术和多个研究主题中(Ribeiro et al., 2024)。在阅读研究中,利用这一指标的研究还相对较少。Malins 等(2018)的研究将这一指标引入到阅读能力的功能成像研究中。在功能成像研究中,这一指标的应用受益于多变量分析技术的发展。研究者不再局限于对大脑的平均激活指标的分析,可以估计每个试次引起的大脑反应。Malins 等(2018)放弃了大脑的平均激活指标,以试次间的标准差为指标,发现试次间变异性同样携带丰富的信息,可以解释被试阅读水平的变异。

(2) 熵

熵是源自物理学的一个概念,用来度量系统的混乱程度。在神经科学中,熵的概念被引用来描述神经系统处理信息的能力(Fagerholm et al., 2023)。在神经系统中,完全随机的脑信号的熵值高于周期变化的脑信号。在最近一项功能磁共振研究中,研究者引入多尺度熵这一指标,计算成人和儿童在观看阅读和数学视频时大脑的反应,结果发现成人在大部分脑区(尤其是右侧额上回)比儿童有更高的熵值,后续的进一步相关分析发现更高的熵值对应更高的脑功能成熟度(Amalric & Cantlon, 2023)。表明阅读的发展可能伴随相关脑区更高的熵值。

4.2.2. 脑功能成熟度指标

脑功能成熟度指标是一种衡量儿童大脑在多大程度上更像成人的脑功能发育指标,也就是说,以成人的大脑活动为基准,儿童的大脑在多大程度更像成人的大脑。脑功能成熟度指标是一种建立在被试间相关分析(intersubject correlation)基础之上的发展指标。被试间相关分析技术是一种测量被试间神经信号同步性的工具,目前已经成熟的应用于事件相关数据(Sheng et al., 2023)和自然任务研究中(Lerner et al., 2021)。

在一项成人和儿童的对比研究中,采用被试间相关分析,Kersey 等(2019)区分出了与阅读和数学相关的三种脑网络,分别是:发展网络,成熟网络和儿童特异性网络。发展网络的定义为成人与成人组内相似性大于儿童与成人组内相似性区域,成熟网络的定义为成人与成人组内相似性等于儿童与成人组内相似性区域,儿童特异性区域的定义为儿童与儿童组内相似性大于成人与成人组内相似性的区域。脑功能成熟性指标从一个新的视角来解释发展性数据,能更好地揭示传统任务中被忽视掉的儿童特异性网络(Cantlon, 2020)。尤其是这一方法可以不受任务的限制,研究者可以采用自然任务,一方面可以提高研究的生态效度(Cantlon, 2020),另一方面可以将研究拓展到尚未接受正式阅读训练的儿童。

4.2.3. 感觉运动 - 联合轴(Sensory Motor-Association Axis, S-A 轴)

近年来,发展研究表明,人类大脑的发展并非是均衡的。在这些脑区中,存在一些脑区在个体发展进程中会得到优先发展,有些脑区的发展则较为滞后(Herzberg et al., 2024)。为进一步揭示神经发展时空模式的神经生物学基础,研究者指出人类脑功能的非线性发展遵循感觉运动 - 联合轴(Sydnor et al., 2021)。其中,感觉运动模块的脑区在发展中成熟的更早,而联合模块的脑区在发展中成熟的更晚(Larsen et al., 2023)。发展模式符合 S-A 轴的拟合程度可以通过发展指标与 S-A 的排序之间的相关分析来实现。Sydnor 等(2021)通过对多模态数据的分析,提供了 S-A 轴的发展排序,这一数据可以在其共享的网页中找到(https://github.com/PennLINC/S-A_ArchetypalAxis)。感觉运动 - 联合轴可以用来探索脑功能的一般性发展与阅读特异性发展之间的关系,为揭示阅读发展的神经生物学机制提供了一个新的视角。

5. 小结

综上所述,阅读的发展起始视觉字形区的特异化,是视觉系统和语言系统相互作用和融合的结果。

总体而言, 阅读的发展是一个复杂动态的过程, 熟练的阅读总伴随着神经系统变异和复杂度的提升。在不同的发展阶段, 由于所需要的认知能力不同, 阅读网络的发展还展现出鲜明的阶段性特征。这些特征提示我们, 阅读的发展可能与其它认知的发展既存在共性的特征, 也存在其特异性特征。后续的研究需要借助新的方法和技术, 来更深刻地揭示阅读发展的与其它认知能力展现出的一致的一般神经机制及其特异性神经机制。

基金项目

本论文得到“广东省教育厅高校青年优秀科研人才国际培养计划”资助。

参考文献

- Amalric, M., & Cantlon, J. F. (2023). Entropy, Complexity, and Maturity in Children's Neural Responses to Naturalistic Video Lessons. *Cortex*, 163, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.02.008>
- Bouhali, F., Bézagu, Z., Dehaene, S., & Cohen, L. (2019). A Mesial-To-Lateral Dissociation for Orthographic Processing in the Visual Cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 21936-21946. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904184116>
- Cantlon, J. F. (2020). The Balance of Rigor and Reality in Developmental Neuroscience. *NeuroImage*, 216, Article ID: 116464. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116464>
- Centanni, T. M., Norton, E. S., Ozernov-Palchik, O., Park, A., Beach, S. D., Halverson, K. et al. (2019). Disrupted Left Fusiform Response to Print in Beginning Kindergartners Is Associated with Subsequent Reading. *NeuroImage: Clinical*, 22, Article ID: 101715. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.101715>
- Chyl, K., Fraga-González, G., Brem, S., & Jednoróg, K. (2021a). Brain Dynamics of (a)typical Reading Development—A Review of Longitudinal Studies. *npj Science of Learning*, 6, Article No. 4. <https://doi.org/10.1038/s41539-020-00081-5>
- Chyl, K., Kossowski, B., Dębska, A., Łuniewska, M., Banaszekiewicz, A., Żelechowska, A. et al. (2018). Prereader to Beginning Reader: Changes Induced by Reading Acquisition in Print and Speech Brain Networks. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 59, 76-87. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12774>
- Chyl, K., Kossowski, B., Wang, S., Dębska, A., Łuniewska, M., Marchewka, A. et al. (2021b). The Brain Signature of Emerging Reading in Two Contrasting Languages. *NeuroImage*, 225, Article ID: 117503. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117503>
- Dębska, A. M., Wang, J., Dzięgiel-Fivet, G. K., Chyl, K. M., Wójcik, M. P., Jednoróg, K. M. et al. (2023). The Development of Orthography and Phonology Coupling in the Ventral Occipito-Temporal Cortex and Its Relation to Reading. *Journal of Experimental Psychology: General*, 153, 293-306. <https://doi.org/10.1037/xge0001495>
- Dębska, A., Banfi, C., Chyl, K., Dzięgiel-Fivet, G., Kacprzak, A., Łuniewska, M. et al. (2021). Neural Patterns of Word Processing Differ in Children with Dyslexia and Isolated Spelling Deficit. *Brain Structure and Function*, 226, 1467-1478. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02255-2>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56, 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Jobert, A. et al. (2010). How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language. *Science*, 330, 1359-1364. <https://doi.org/10.1126/science.1194140>
- 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, e2004103. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004103>
- Ehri, L. C. (2020). The Science of Learning to Read Words: A Case for Systematic Phonics Instruction. *Reading Research Quarterly*, 55, S45-S60. <https://doi.org/10.1002/rrq.334>
- Fagerholm, E. D., Dezhina, Z., Moran, R. J., Turkheimer, F. E., & Leech, R. (2023). A Primer on Entropy in Neuroscience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 146, Article ID: 105070. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105070>
- Friederici, A. D. (2012). The Cortical Language Circuit: From Auditory Perception to Sentence Comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.04.001>
- Frith, U. (1986). A Developmental Framework for Developmental Dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 36, 67-81. <https://doi.org/10.1007/bf02648022>
- Garrett, D. D., Samanez-Larkin, G. R., MacDonald, S. W. S., Lindenberger, U., McIntosh, A. R., & Grady, C. L. (2013).

- Moment-To-Moment Brain Signal Variability: A Next Frontier in Human Brain Mapping? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 37, 610-624. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.02.015>
- Gough, P. B., & Tunmer, W. E. (1986). Decoding, Reading, and Reading Disability. *Remedial and Special Education*, 7, 6-10. <https://doi.org/10.1177/074193258600700104>
- Gurunandan, K., Carreiras, M., & Paz-Alonso, P. M. (2019). Functional Plasticity Associated with Language Learning in Adults. *NeuroImage*, 201, Article ID: 116040. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116040>
- He, Y., Liu, X., Hu, J., Nichols, E. S., Lu, C., & Liu, L. (2021). Difference between Children and Adults in the Print-Speech Coactivated Network. *Scientific Studies of Reading*, 26, 250-265. <https://doi.org/10.1080/10888438.2021.1965607>
- Herzberg, M. P., Nielsen, A. N., Luby, J., & Sylvester, C. M. (2024). Measuring Neuroplasticity in Human Development: The Potential to Inform the Type and Timing of Mental Health Interventions. *Neuropsychopharmacology*, 50, 124-136. <https://doi.org/10.1038/s41386-024-01947-7>
- Hoover, W. A., & Gough, P. B. (1990). The Simple View of Reading. *Reading and Writing*, 2, 127-160. <https://doi.org/10.1007/bf00401799>
- Joo, S. J., Tavabi, K., Caffarra, S., & Yeatman, J. D. (2021). Automaticity in the Reading Circuitry. *Brain and Language*, 214, Article ID: 104906. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2020.104906>
- Kearns, D. M., Hancock, R., Hoeft, F., Pugh, K. R., & Frost, S. J. (2019a). The Neurobiology of Dyslexia. *Teaching Exceptional Children*, 51, 175-188. <https://doi.org/10.1177/0040059918820051>
- Kersey, A. J., Wakim, K., Li, R., & Cantlon, J. F. (2019b). Developing, Mature, and Unique Functions of the Child's Brain in Reading and Mathematics. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 39, Article ID: 100684. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100684>
- Larsen, B., Sydnor, V. J., Keller, A. S., Yeo, B. T. T., & Satterthwaite, T. D. (2023). A Critical Period Plasticity Framework for the Sensorimotor-Association Axis of Cortical Neurodevelopment. *Trends in Neurosciences*, 46, 847-862. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2023.07.007>
- Lerner, Y., Scherf, K. S., Katkov, M., Hasson, U., & Behrmann, M. (2021). Changes in Cortical Coherence Supporting Complex Visual and Social Processing in Adolescence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 33, 2215-2230. https://doi.org/10.1162/jocn_a.01756
- Lochy, A., & Schiltz, C. (2019). Lateralized Neural Responses to Letters and Digits in First Graders. *Child Development*, 90, 1866-1874. <https://doi.org/10.1111/cdev.13337>
- Lochy, A., Van Reybroeck, M., & Rossion, B. (2016). Left Cortical Specialization for Visual Letter Strings Predicts Rudimentary Knowledge of Letter-Sound Association in Preschoolers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 8544-8549. <https://doi.org/10.1073/pnas.1520366113>
- Malins, J. G., Pugh, K. R., Buis, B., Frost, S. J., Hoeft, F., Landi, N. et al. (2018). Individual Differences in Reading Skill Are Related to Trial-By-Trial Neural Activation Variability in the Reading Network. *The Journal of Neuroscience*, 38, 2981-2989. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0907-17.2018>
- Marks, R. A., Kovelman, I., Kepinska, O., Oliver, M., Xia, Z., Haft, S. L. et al. (2019). Spoken Language Proficiency Predicts Print-Speech Convergence in Beginning Readers. *NeuroImage*, 201, Article ID: 116021. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116021>
- Martin, A., Schurz, M., Kronbichler, M., & Richlan, F. (2015). Reading in the Brain of Children and Adults: A Meta-Analysis of 40 Functional Magnetic Resonance Imaging Studies. *Human Brain Mapping*, 36, 1963-1981. <https://doi.org/10.1002/hbm.22749>
- Mattingly, I. G. (1972). Reading, the Linguistic Process, and Linguistic Awareness. In J. F. Kavanagh, & I. G. Mattingly (Eds.), *Language by Ear and by Eye: The Relationship between Speech and Reading*. Massachusetts Institute of Technology.
- McIntosh, A. R., Kovacevic, N., & Itier, R. J. (2008). Increased Brain Signal Variability Accompanies Lower Behavioral Variability in Development. *PLOS Computational Biology*, 4, e1000106. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000106>
- Norton, E. S., & Wolf, M. (2012). Rapid Automatized Naming (RAN) and Reading Fluency: Implications for Understanding and Treatment of Reading Disabilities. *Annual Review of Psychology*, 63, 427-452. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100431>
- Ozernov-Palchik, O., Sury, D., Turesky, T. K., Yu, X., & Gaab, N. (2023). Longitudinal Changes in Brain Activation Underlying Reading Fluency. *Human Brain Mapping*, 44, 18-34. <https://doi.org/10.1002/hbm.26048>
- Pleisch, G., Karipidis, I. I., Brauchli, C., Röthlisberger, M., Hofstetter, C., Stämpfli, P. et al. (2019a). Emerging Neural Specialization of the Ventral Occipitotemporal Cortex to Characters through Phonological Association Learning in Preschool Children. *NeuroImage*, 189, 813-831. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.046>
- Pleisch, G., Karipidis, I. I., Brem, A., Röthlisberger, M., Roth, A., Brandeis, D. et al. (2019b). Simultaneous EEG and fMRI Reveals Stronger Sensitivity to Orthographic Strings in the Left Occipito-Temporal Cortex of Typical versus Poor Beginning

- Readers. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 40, Article ID: 100717. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100717>
- Preston, J. L., Molfese, P. J., Frost, S. J., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Hoeft, F. et al. (2016). Print-Speech Convergence Predicts Future Reading Outcomes in Early Readers. *Psychological Science*, 27, 75-84. <https://doi.org/10.1177/0956797615611921>
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R. et al. (2000). Functional Neuroimaging Studies of Reading and Reading Disability (Developmental Dyslexia). *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews*, 6, 207-213. [https://doi.org/10.1002/1098-2779\(2000\)6:3<207::aid-mrdd8>3.0.co;2-p](https://doi.org/10.1002/1098-2779(2000)6:3<207::aid-mrdd8>3.0.co;2-p)
- Ribeiro, T. L., Jendrichovsky, P., Yu, S., Martin, D. A., Kanold, P. O., Chialvo, D. R. et al. (2024). Trial-by-Trial Variability in Cortical Responses Exhibits Scaling of Spatial Correlations Predicted from Critical Dynamics. *Cell Reports*, 43, Article ID: 113762. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.113762>
- Richlan, F. (2012). Developmental Dyslexia: Dysfunction of a Left Hemisphere Reading Network. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, Article 120. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00120>
- Richlan, F., Kronbichler, M., & Wimmer, H. (2011). Meta-Analyzing Brain Dysfunctions in Dyslexic Children and Adults. *NeuroImage*, 56, 1735-1742. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.02.040>
- Rueckl, J. G., Paz-Alonso, P. M., Molfese, P. J., Kuo, W., Bick, A., Frost, S. J. et al. (2015). Universal Brain Signature of Proficient Reading: Evidence from Four Contrasting Languages. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 15510-15515. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509321112>
- Schlaggar, B. L., & McCandliss, B. D. (2007). Development of Neural Systems for Reading. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 475-503. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.28.061604.135645>
- Sheng, J., Wang, S., Zhang, L., Liu, C., Shi, L., Zhou, Y. et al. (2023). Intersubject Similarity in Neural Representations Underlies Shared Episodic Memory Content. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120, e2308951120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2308951120>
- Smith, G. J., Booth, J. R., & McNorgan, C. (2018). Longitudinal Task-Related Functional Connectivity Changes Predict Reading Development. *Frontiers in Psychology*, 9, Article 1754. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01754>
- Sydnor, V. J., Larsen, B., Bassett, D. S., Alexander-Bloch, A., Fair, D. A., Liston, C. et al. (2021). Neurodevelopment of the Association Cortices: Patterns, Mechanisms, and Implications for Psychopathology. *Neuron*, 109, 2820-2846. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.06.016>
- van de Walle de Ghelcke, A., Rossion, B., Schiltz, C., & Lochy, A. (2021). Developmental Changes in Neural Letter-Selectivity: A 1-Year Follow-Up of Beginning Readers. *Developmental Science*, 24, e12999. <https://doi.org/10.1111/desc.12999>
- Yan, X., Feng, G., Fu, Y., Hua, J., & Cao, F. (2024a). Age-Related Changes in Individuals with and without Reading Disability: Behavioral and fMRI Evidence. *Imaging Neuroscience*, 2, 1-18. https://doi.org/10.1162/imag_a_00232
- Yan, X., Fu, Y., Feng, G., Li, H., Su, H., Liu, X. et al. (2024b). Reading Disability Is Characterized by Reduced Print-Speech Convergence. *Child Development*, 95, 1982-1999. <https://doi.org/10.1111/cdev.14134>
- Younger, J. W., Tucker-Drob, E., & Booth, J. R. (2017). Longitudinal Changes in Reading Network Connectivity Related to Skill Improvement. *NeuroImage*, 158, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.06.044>