

以眼观心：发展视角下的眼动追踪研究

陈 敏¹, 周 可¹, 朱晓倩¹, 罗美伊¹, 颜志强^{1,2*}

¹湖南师范大学教育科学学院心理学系, 湖南 长沙

²湖南师范大学认知与人类行为湖南省重点实验室, 湖南 长沙

收稿日期: 2024年8月14日; 录用日期: 2024年9月5日; 发布日期: 2024年9月19日

摘 要

眼睛是心灵的窗户, 而眼动追踪技术的发展则使得以眼观心成为现实。眼动追踪技术的客观性、非侵入性和低限制性使其成为了心理学研究中最重要研究方法之一。同时, 眼动追踪技术因其适用对象年龄范围广和应用便捷, 从而在发展心理学研究中表现出了不可替代的优势。本文根据文献计量分析结果, 从生理发展、认知发展和社会性发展三个方面回顾了眼动追踪技术在发展心理学中的应用, 整理和比较了对应的眼动追踪研究范式, 最后对眼动追踪技术在发展心理学中的应用进行了总结与展望。

关键词

眼动追踪, 发展, 心理学, 研究范式

Reading the Mind in the Eyes: Eye Tracking Research from a Developmental Perspective

Min Chen¹, Ke Zhou¹, Xiaoqian Zhu¹, Meiyi Luo¹, Zhiqiang Yan^{1,2*}

¹Department of Psychology, College of Educational Sciences, Hunan Normal University, Changsha Hunan

²Cognition and Human Behavior Key Laboratory of Hunan Province, Hunan Normal University, Changsha Hunan

Received: Aug. 14th, 2024; accepted: Sep. 5th, 2024; published: Sep. 19th, 2024

Abstract

The eyes are a window into the soul, and the development of eye-tracking technology has made it possible to see the mind with the eyes. Eye-tracking technology has become a crucial tool in psychological research due to its objectivity, non-invasiveness, and minimal constraints. Its broad applicability across various age groups makes it particularly valuable in developmental psychology. This paper provides a comprehensive review of the use of eye-tracking technology in developmental

*通讯作者。

文章引用: 陈敏, 周可, 朱晓倩, 罗美伊, 颜志强(2024). 以眼观心: 发展视角下的眼动追踪研究. *心理学进展*, 14(9), 491-507. DOI: 10.12677/ap.2024.149674

psychology, supported by a bibliometric analysis across physiological, cognitive, and social development. The paper organizes and compares various eye-tracking research paradigms, concluding with a discussion on the future prospects and potential applications of this technology in the field.

Keywords

Eye Tracking, Development, Psychology, Research Paradigms

Copyright © 2024 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

以眼观心，自古有之。孟子曾提到：“存乎人者，莫良于眸子。眸子不能掩其恶。胸中正，则眸子瞭焉；胸中不正，则眸子眊焉。”（参见《孟子·离娄》上）。孟子认为，我们能够通过他人的眼睛观察其内心。然而，要客观地探究眼睛与心灵的关系，还需要借助精确的算法和精密的仪器。眼动追踪技术的发展以及眼动仪的出现，为此提供了可能。

眼动追踪技术起源于 19 世纪末，它是一种以非侵入性的方式测量个体在参与不同活动中眼球运动范围的技术(Rahal & Fiedler, 2019; Zammarchi & Conversano, 2021)。眼动追踪技术能为研究者提供直接且高分辨率的眼动数据(许洁, 王豪龙, 2020)，眼动数据的解释依据是眼脑假说(Just & Carpenter, 1980; Lai et al., 2013)。眼脑假说认为个体眼睛在注视某一信息时，大脑也在对该信息进行认知加工处理，即眼睛注视的内容和大脑处理的内容之间是一一对应的关系(Just & Carpenter, 1980)。这意味着，眼动即心动，即脑动。

目前，眼动追踪技术已经广泛地应用于心理学，尤其是发展心理学领域(陆润豪等, 2021; 张苏媛等, 2021; 朱晓倩等, 2021; Yan et al., 2018)。发展心理学是探讨个体毕生心理和行为随年龄发展的特点及其规律的科学，旨在揭示人类心理发展的过程性和动态性(余益兵, 葛明贵, 2004)。与传统的行为研究以及其他的神经科学技术相比，眼动追踪技术在毕生发展研究中有其独特的优势。一方面，眼动追踪技术作为一种非侵入性的研究手段，适用于广泛的年龄范围。无论是仅 8 周大的婴儿(Richards & Holley, 1999)，还是 80 多岁的老年人都可以使用眼动追踪技术(Barsznica et al., 2021)。这无疑对识别、追踪个体毕生发展，进行针对性的预防和干预具有积极意义。另一方面，眼动追踪技术能够帮助研究者了解个体特定行为的动态发展轨迹，如从婴儿期到成年期注意力的习得发展(Popa et al., 2015)。

为了从总体上了解眼动追踪技术在心理学研究中的应用现状，作者在中国知网和 Web of Science 数据库中，以眼动(“eye movement” or “eye tracking”)为主题词进行了文献检索，检索日期为 2024 年 1 月 1 日。通过分析文献检索结果，发现了三大关键趋势。其一，近十年间使用眼动追踪技术的研究论文发表量呈先增后稳态势(见图 1)。其二，眼动追踪研究对象横跨了从婴儿到老年人的全生命周期。其三，眼动追踪技术的研究主要集中在三个核心领域。针对 Web of Science 数据库的文献进行关键词共现分析(见图 2)，提取出了 3 个关键词聚类。第一类聚焦于眼动追踪技术在个体生理发展中的应用，该类涵盖关键词眼跳、瞳孔大小、视觉控制等。第二类涉及眼动追踪技术在认知发展中的应用，尤其是在阅读领域的应用，该类涵盖关键词主要有语言理解、工作记忆等。第三类关注的是眼动追踪技术在社会性发展的应用，该类涵盖关键词面部情绪、威胁等。值得注意的是，这三方面恰好与发展心理学的核心维度——生理、认知及社会性发展相契合，彰显了眼动追踪技术在发展心理学研究中的独特优势和广泛应用。

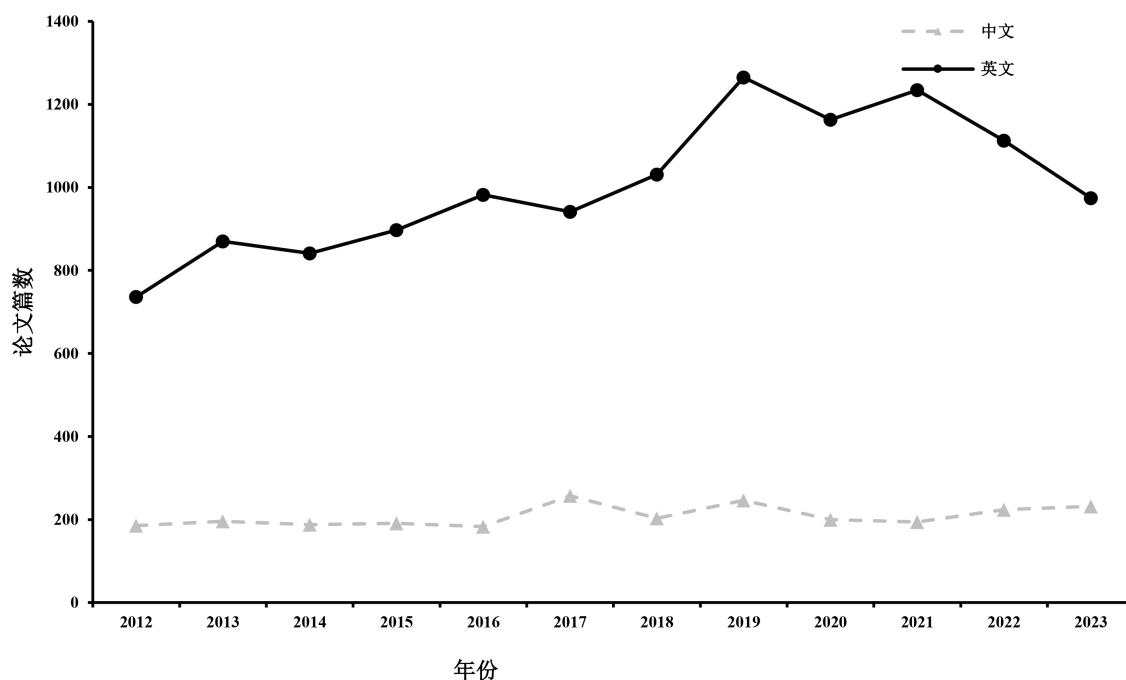
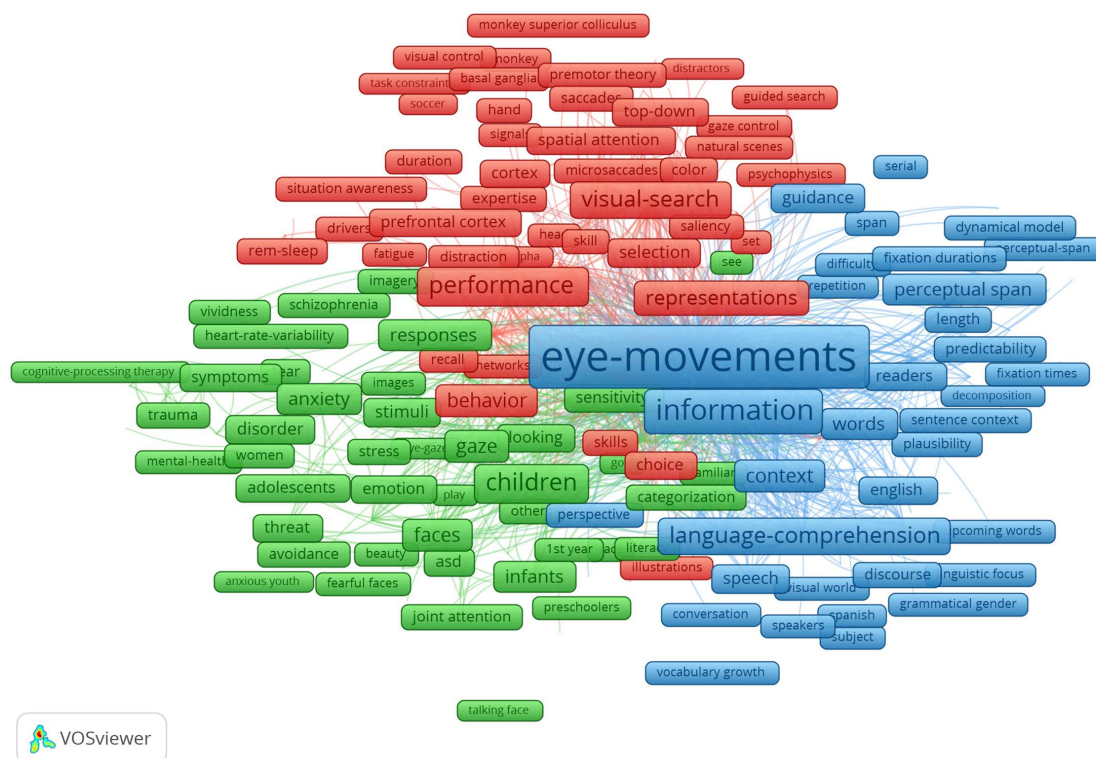


Figure 1. Number of publications on eye-tracking research in the past decade

图 1. 近十年眼动追踪研究论文出版篇数



注：使用 Vosviewer1.6.20 软件进行关键词共现分析。“红色”为第一类眼动追踪技术在生理发展中的应用，“蓝色”为第二类眼动追踪技术在认知发展中的应用，“绿色”为眼动追踪技术在社会性发展中的应用。

Figure 2. Cluster map of keywords in eye-tracking research in Web of Science.

图 2. Web of Science 中眼动追踪研究主题关键词聚类图

基于此,本文聚焦于发展心理学中的眼动追踪研究。首先,梳理和总结眼动追踪技术的原理及指标。其次,回顾和归纳眼动追踪技术在生理发展、认知发展和社会性发展方面的研究成果。再次,整理与比较发展心理学中常见的眼动追踪研究范式。最后,在此基础上提出在发展心理学领域进行眼动追踪研究的展望。

2. 眼动追踪技术的原理及指标

从科学研究的角度出发,研究眼动首先需要理解眼球的基本构造以及视觉信息处理的途径(Chamberlain, 2007)。物体发出的光线经过眼内折光系统发生折射,并在视网膜上形成图像,视网膜上的感光细胞将光刺激所包含的视觉信息转化为神经信息,通过视神经传递到大脑的视觉中枢,最终形成视觉(李珊珊等, 2021; Singh & Singh, 2012)。随着对视觉产生原理的认识加深,人们发展了多种眼动记录技术,以便于精确地捕捉人们的眼球运动。目前,最流行的眼动追踪技术是基于瞳孔和角膜反射的视频记录法(卞迁等, 2009)。该方法使用一个摄像机或其他光学接收器捕捉被眼睛反射回来的红外线,从而记录眼球的运动。视频数据的分析和处理是通过计算机软件完成。眼动仪作为应用眼动记录技术的具体设备,通过发射近红外光并在角膜上产生反射来捕捉眼球运动,仪器的传感器收集到反射的光信号后,应用特定的算法计算出人的视线位置(Zammarchi & Conversano, 2021)。

从实践的角度而言,眼动追踪研究需要明确的测量指标,包括注视、眼跳和追随运动三种类型(陈庆荣等, 2012)。注视是眼睛中央凹对准目标刺激的活动,通常以在 1 度视角或 30 像素半径内停留超过 100 ms 为标准(王福兴等, 2016; Singh & Singh, 2012)。常用的注视类指标包括注视时间和注视次数(夏海莎等, 2022)。眼跳是注视点的快速转移,当注意的目标发生转移时,眼睛将从一个注视点移动到另一个注视点,始终保持注视对象在视网膜中央凹区域,以此获得清晰的视觉。眼跳的速度非常快,仅有 0.01 至 0.1 s 的时间(徐娟, 2012; Carter & Luke, 2020)。常用的眼跳指标包括眼跳速度、眼跳幅度和眼跳反应时。追随运动是指眼睛追随一个运动的物体移动。当周围环境中的运动物体吸引观察者的注意,眼睛开始追随这个目标运动,产生视觉追随运动(陈婷婷等, 2012)。其中慢速平稳的追随运动被称为平滑追踪眼动。而当物体的运动速度过快时,人们则会辅以追赶性眼跳(陈庆荣等, 2012; 陈婷婷等, 2012)。

3. 发展心理学中的眼动追踪研究

眼动追踪技术在发展心理学研究中展现出了独特优势与广泛的应用价值。具体而言,眼动追踪技术全面覆盖了个体发展的整个周期,极大地扩展了发展心理学实践研究的年龄范围。在现有研究中,眼动追踪技术已应用于仅 8 周大的婴儿(Richards & Holley, 1999)。在儿童、青少年以及成人研究中,眼动追踪技术的应用更为常见(刘志方等, 2021)。此外,眼动追踪技术也是探究老年人发展的重要研究方法,当前研究中最高年龄已达 86 岁(Barsznica et al., 2021)。同时,关键词共现分析进一步揭示了眼动追踪技术在发展心理学中的三大核心应用维度:生理发展、认知发展以及社会性发展。基于此,本文将探讨眼动追踪技术在这三大维度上的具体应用及其成果。

3.1. 生理发展

视觉的产生源于生理发展,是人类获取自然场景和社会场景信息的重要通道(陈庆荣等, 2012)。眼动追踪技术通过记录注视、追随运动以及瞳孔等眼球运动,揭示视觉系统随年龄增长的成熟过程,以反映视觉的生理发展特点。

首先,当个体注视静止物体时,眼球并非固定不变的,而是伴随着缓慢的漂移和微眼跳,这些微眼跳有助于维持中央凹上的清晰成像(陈庆荣等, 2012),其作用已被大量研究证明(嵩钰佳等, 2018; Cherici et al., 2012)。其次,人们通过采取追赶性眼动和平滑追踪眼动两种自主眼动方式,维持感兴趣的物体图像

集中并稳定在中央凹(Spering & Carrasco, 2015)。其中, 追赶性眼动是离散的弹道运动, 将眼睛快速导向视觉目标。而平滑追踪眼动是连续的、缓慢的眼睛旋转, 用以补偿视觉目标的运动(Spering & Carrasco, 2015)。研究表明, 5 个月大的婴儿已经能够准确地追随目标(Grönqvist et al., 2006)。同时, 与垂直方向上的平滑追踪眼动相比, 婴儿与成人在水平方向上的平滑追踪眼动的准确性更高(Grönqvist et al., 2006)。最后, 瞳孔大小是评估婴幼儿视觉发展的一个重要指标。瞳孔的扩大意味着个体正在获取更多的视觉信息, 反映个体对物体的认知难度、心理加工程度的增加以及对信息的兴趣(王福兴等, 2016; Ariel & Castel, 2013)。与成人不同, 由于婴儿不能集中地对物体进行注意加工, 需要通过瞳孔大小所提供得辅助性视觉信息来探讨婴幼儿的信息加工过程(杨晓梦等, 2022; Cheng et al., 2019a; Jackson & Sirois, 2009)。例如, 在研究婴儿对非预期性事件认知和客体永存性时, 婴儿瞳孔大小的变化可以辅助解释可靠性不高的观看时间(王福兴等, 2016; Jackson & Sirois, 2009)。

3.2. 认知发展

认知发展研究聚焦于探讨个体认知能力以及脑发育或脑老化的动态发展特点(刘燊等, 2022)。眼脑假说认为眼动是大脑认知加工过程的反映(Just & Carpenter, 1980)。基于此, 利用眼动追踪技术捕捉个体在执行认知任务时的眼动, 可以揭示个体认知能力的发展及其与脑功能变化的关联(马恒芬, 张长颀, 2023)。其中, 注意、记忆、阅读等都是典型的与视觉发展密切相关且能够被有效反映的认知发展内容。

个体对事物的注意加工过程能够被眼跳所反映, 其中反向眼跳常被用于反映个体对行为的注意控制(周临等, 2012; Coe & Munoz, 2017), 个体对事物的注意兴趣则与平滑追踪眼动紧密相关(Fukushima et al., 2013)。此外, 当眼动追踪技术与特定任务结合时, 其研究范围被进一步拓展。例如, 眼动追踪技术结合记忆任务能够有效反映记忆的注意加工过程, 常用于工作记忆的研究(Hikosaka & Wurtz, 1983)。类似地, 在阅读任务中使用眼动追踪技术是考察个体阅读能力发展的重要途径之一。阅读中的眼球运动表现为一系列的注视点和眼跳(闫国利等, 2010), 其中每一次注视的时距和每一次眼跳的方向与时长反映了个体在阅读中的认知和知觉加工过程(陈庆荣等, 2012)。这种结合了眼动追踪技术的阅读任务, 不仅在儿童认知发展中广泛运用(Wertli et al., 2020), 在老年人的认知发展评估上也常被使用(李琳等, 2022; Li et al., 2018)。

3.3. 社会性发展

社会性发展研究的核心在于理解个体社会性发展特点, 强调社会环境与个体发展的相互作用(刘燊等, 2022)。研究者利用眼动追踪技术可以观察个体对社会性刺激的注意以及在社会互动中的眼动模式, 进而揭示个体的社会性发展特点。

研究显示, 人类的眼睛具有向他人发出信号的独特能力。与类人猿相比, 人类的巩膜更白、更暴露, 这使得人类的注视方向更容易被他人辨别(Kobayashi & Kohshima, 1997)。这种跟随他人注视的倾向在婴儿期就被观察到(Senju & Csibra, 2008), 个体在婴儿期就已表现出对社会刺激的注意偏好(Fujioka et al., 2020)。Morton 和 Johnson (1991)通过给新生儿分别呈现相同大小和形状的人类面孔特征、错乱的人类面孔特征以及空白的人类面孔图案, 发现个体对面孔这一类社会性刺激的偏好是与生俱来的。在情绪信息的处理过程中, 情绪信息的获取更多地受到视野中图像感知特征的驱动, 进而引起个体对情绪信息的注意偏向。通过记录个体在观看情绪刺激时的眼球运动(如注视点、注视时长、眼跳等), 可以了解个体在加工情绪刺激时的注意加工特点, 进而更详细地分析情绪的产生过程(朱晓倩等, 2021)。颜志强等人(2016)的研究发现, 个体对疼痛面孔存在注意偏向, 表现为早期注意定向更快和晚期注意维持更长。进一步的, Yan 等人(2017)发现, 高共情组的儿童在视觉搜索疼痛面孔时速度更快。类似地, 青少年、成人及老年人也会对情绪性信息产生注意偏向(胡金生等, 2018; 李莎等, 2016)。

4. 发展心理学中的眼动追踪研究范式

随着眼动追踪技术在发展心理学中的广泛应用, 相关的研究范式也逐渐增多。为了对已有的研究范式进行梳理, 本文根据关键词共现分析的聚类结果, 分别整理了生理发展、认知发展和社会性发展三个维度中目前能够检索到的且具有代表性的眼动追踪研究范式。

4.1. 生理发展研究范式

基于眼动追踪技术的生理发展研究, 聚焦于探讨视觉系统的发展特点。该领域的研究重点在于通过记录个体的注视、眼跳以及追随运动等眼球运动, 来反映视觉系统的成熟过程和生理变化。基于此, 研究者开发了相应的研究范式, 见表 1。

注视、眼跳和追随运动是人类眼球运动的三种基本类型(陈庆荣等, 2009)。其中, 动眼肌捕捉任务被设计于探究注视与眼跳间的关系, 其通过要求被试自由观看并记录眼动特点来实现。Otero-Millan 等人(2013)通过动眼肌捕捉任务发现, 注视和眼跳不是孤立的眼动行为, 而是视觉探索功能连续体的两端。人类的眼动神经系统在视觉探索过程中, 会根据兴趣区大小产生注视性微眼跳和探索性眼跳两种。具体而言, 小区域倾向于引发小而不频繁的微眼跳, 大区域则触发更大、更频繁的探索性眼跳。换言之, 眼跳速度、幅度和频率会随探索区域的大小而动态调整。当探索区域缩小至一定尺寸时, 探索性眼跳的频率可能与注视过程中的微眼跳频率相似, 此时的眼跳相当于注视过程中的微眼跳。而追随运动则常使用矩阵移动范式进行评估, 该任务要求被试自由观看在垂直方向上或水平方向上运动的物体。Richards 和 Holley (1999)应用此范式研究了 8 到 26 周大的婴儿对移动矩形的追随运动, 以此来探究个体眼动追踪能力的发展。结果发现, 随着物体速度增加, 婴儿从平滑眼动追踪转向跳跃眼动追踪。另外, 年龄较小的婴儿的眼跳幅度随着物体速度增加而减小, 年龄较大的婴儿则相反, 这体现了眼动追踪能力的发展差异。Grönqvist 等人(2006)进一步发现, 婴儿在多种运动轨迹上均表现出良好的追踪能力, 表明了婴儿追踪能力发展的普遍性。

Table 1. Paradigms of eye-tracking research in physiological development

表 1. 生理发展眼动研究范式

生理发展范式	适用年龄	主要内容	眼动指标	文献来源
动眼肌捕捉任务	8 岁及以上	在自由观看的情境下记录分析眼球运动	眼跳频率、眼跳幅度、眼跳方向、眼跳时间间隔等	Otero-Millan et al., 2013
矩阵移动范式	8 周及以上	呈现一个水平或垂直移动的矩形, 被试自由观看	追踪时间、眼跳频率、眼跳幅度等	Richards & Holley, 1999
轨迹追踪任务	9 岁及以上	要求被试眼球按照呈现的字母数字顺序移动	注视次数、眼跳幅度、眼跳方向、能量函数等	Veneri et al., 2014
平滑追踪任务	3 岁及以上	对目标对象进行追随运动	眼跳反应时、平滑追踪眼动速度、追踪增益等、追踪潜伏期等	Lisberger et al., 1987

注: 以上研究范式是该领域中较具代表性的眼动追踪研究范式, 非该领域中所有眼动追踪研究范式(下同)。

此外, 在生理发展领域, 眼动追踪技术还可以用于检测发展异常群体。轨迹追踪任务和平滑追踪任务是筛查异常群体的典型的研究范式。轨迹追踪任务作为神经心理学工具, 与眼动追踪技术相结合, 能够有效地检测神经疾病和神经心理障碍(Bowie & Harvey, 2006)。Veneri 等人(2014)利用简化版本的轨迹追踪任务研究小脑疾病患者的眼动特点。结果发现, 小脑疾病患者的眼球运动可能会表现出眼球震颤、间断的眼跳, 以及异常追踪行为。平滑追踪任务则是评估视觉运动皮层通路特性的高敏感探针(Lisberger et al., 1987; Takarae et al., 2008), 分为开环(目标呈现后的前 140 ms)和闭环两个阶段。高世欢等人(2019)应用此任务考

察了自闭症谱系障碍儿童与典型儿童的双眼注视点间距的区别,实验以双眼注视点间距的差异作为分辨自闭症谱系障碍儿童与典型发展儿童的指标。结果发现 ASD 儿童的双眼注视点间距过大,且在大振幅、快速度的条件下具有优良的鉴别力,与自闭症行为量表总分显著正相关。此外,平滑追踪任务还可用于预测某些神经退行性疾病,如获得性免疫缺陷综合征、痴呆综合征和阿尔茨海默病(Vidal et al., 2012)。

4.2. 认知发展研究范式

基于眼动的认知发展研究范式,主要探讨个体在执行认知任务时的注意表现。眼动作为大脑活动的外在表现,能够反映个体的认知加工过程(Just & Carpenter, 1980)。此外,眼动追踪技术的非侵入性使认知发展的研究对象更为广泛。其中,注意、阅读和记忆是能够被眼动有效反映的认知行为,接下来本文将依次举例介绍,见表 2。

眼动追踪技术是揭示注意机制的关键方法。反向眼跳和朝向眼跳范式常用于研究注意定向和抑制能力。Hallett (1978)首次使用反向眼跳范式来研究注意,要求被试抑制对目标的朝向眼跳,并转移视线至相反位置。朝向眼跳范式则要求被试在刺激出现时看向它(Munoz & Everling, 2004)。Saslow (1967)提出的空白重叠范式则更加全面地考察了注意的解离、转移和定向过程(闫国利等, 2019)。在空白任务中,中央刺激呈现结束后呈现空屏,促使被试的注意力从中央刺激解离,随后目标刺激出现,反映注意转移和对新刺激的注意过程。而在重叠任务中,中央刺激和目标刺激同时呈现,要求被试先从中央刺激解离注意力,再转移到目标刺激上,完成注意解离、转移和定向三阶段。除朝向眼跳等外源性注意外,预测性眼跳等内源性注意同样重要。Nelson (1971)创设的婴儿遮挡范式,也称视觉预期范式,是探究预测性眼跳的典型范式。该范式分为两个阶段:无遮挡的视觉体验和随后的遮挡条件下的反应观察。Gredebäck 和 Von Hofsten (2004)使用此范式发现,成人展现出成熟的视觉预期能力,而幼儿则因认知发展局限未能表现出预测性眼跳。此外,注意的分配特点也受到了研究者的广泛关注。Posner (1984)提出的空间线索任务是用以测量注意资源的空间分配特点的经典模式。实验首先要求被试注视中央注视点,随后呈现内源性(如中央提示)或外源性线索(如周围边框闪烁),预示目标刺激的可能位置。目标刺激出现后,被试需立即响应。Yantis (1992)进一步提出的多目标任务,则探讨了个体在追踪多个目标时的注意分配特点。该范式随后发展出多目标辨别范式、延迟匹配提取任务等变式。多目标任务要求被试在干扰物中跟踪多个目标对象。实验开始时,目标和干扰同时出现并移动,被试需在整个跟踪阶段保持对目标的追踪,并在任务结束时识别目标,强调对外观相似项的注意分配。与多目标任务不同,多目标辨别范式通过独特特征区分目标与干扰,更侧重于对目标身份的识别与记忆。延迟匹配提取任务则尤其适用于探索婴儿注意发展(Cheng et al., 2019b)。另外,习惯化范式也是探究婴儿视觉注意发展的重要范式,最先由 Fantz (1964)提出。习惯化范式分为熟悉和测试两个阶段。在熟悉阶段,婴儿持续接触特定刺激直至习惯化形成。随后,测试阶段引入新刺激,以评估婴儿对旧刺激的反应差异。Tomalski 等人(2017)通过习惯化范式研究了家庭环境质量与婴儿早期注意力发展之间的关系。结果表明,在高任务要求下,家庭混乱拥挤不利于婴儿早期注意力的发展。

眼动追踪技术在记忆研究中也得到了应用,尤其是在工作记忆的研究领域。记忆导向眼跳范式是研究空间工作记忆的理想实验模型(Brignani et al., 2010)。该范式要求被试首先注视中央注视点,随后快速呈现目标刺激,目标刺激可以呈现在中央注视点周围的任意位置上。当中央注视点消失或“追随”信号发出后,被试需根据记忆线索产生指向目标刺激的眼跳(Hikosaka & Wurtz, 1983)。记忆导向眼跳任务根据记忆目标的数量分为单一目标记忆导向的眼跳范式和系列目标记忆导向的眼跳范式(陈庆荣等, 2009; Müller et al., 1999)。此外,习惯化范式也可以用于探究语言前婴儿记忆能力的发展(季红光等, 2001; Kucharský et al., 2024)。该范式假设婴儿对新刺激注视时间的延长,反映了其对旧刺激的记忆形成及新旧刺

激的区分能力。**Richmond 等人(2015)**使用习惯化范式探究了婴儿对空间关系的记忆能力,发现 9 个月、18 个月和 27 个月大的婴儿对变换了空间关系的新刺激的注视时间更长,但 9 个月大的婴儿需花费更长时间记忆空间关系。

Table 2. Paradigms of eye-tracking research in cognitive development
表 2. 认知发展眼动研究范式

认知发展范式	主要内容	眼动指标	文献来源
眼跳任务	反向眼跳和朝向眼跳分别要求不看或看突显刺激	眼跳反向、眼跳反应时、眼跳错误率等	Hallett, 1978
空白重叠范式	空白任务和重叠任务	眼跳反应时、眼跳方向、解离代价、解离成本、解离失败率等	Saslow, 1967
婴儿遮挡范式	视觉被遮挡后,对目标预期位置的注视情况	眼跳反应时、眼跳位置、注视时间等	Gredebäck & Von Hofsten, 2004
空间线索任务	通过呈现内源性或外源性线索,预示目标刺激的可能位置。目标刺激出现后,要求被试需立即响应	注视持续时间、注视次数、眼跳反应时等	Posner, 1984
多目标任务	在多元素的追随运动中判断某元素是否为目标元素	注视次数、注视持续时间、注视比例、瞳孔大小、眼动轨迹等	Yantis, 1992
习惯化范式	对反复呈现的旧刺激和新刺激进行自由观看	注视持续时间、注视次数、总注视时间等	Fantz, 1964
记忆导向眼跳任务	根据记忆线索对信息进行眼跳反应	眼跳反应时、眼跳幅度、眼跳精度、眼跳峰速度等	Hikosaka & Wurtz, 1983
移动窗口范式	在计算机屏幕上呈现句子,但是句子被其它刺激掩蔽,考察阅读知觉广度	首次注视持续时间、凝视时间、单字平均首次通过时间、注视时间、眼跳幅度、注视次数、知觉广度等	McConkie & Rayner, 1975
移动掩蔽范式	通过变化掩蔽范围大小或者是移动窗口大小来精确控制读者一次注视获取的信息量	眼跳幅度、注视时间、注视次数、知觉广度等	Rayner & Bertera, 1979
边界范式	设置不同的方位和预视条件,当读者的眼睛注视着边界的左侧时,边界右侧呈现的内容是不同的预视信息;当读者的眼睛越过边界时,这些预视信息就会变为目标词	首次注视持续时间、注视时间、预视准确性等	Rayner, 1975
快速启动范式	在读者眼跳越过边界之前,目标刺激位置上是一个掩蔽刺激,当读者的眼跳越过该边界时,启动刺激立即替代掩蔽刺激,短暂呈现预先设定的时间之后,启动刺激被目标刺激替代	首次注视持续时间、凝视时间等	Sereno & Rayner, 1992
消失文本范式	当读者注视一个词达到一个特定的时间后,被注视的词就会“消失”,即注视点处变成空白。当下一个注视开始时,原来消失的注视词又重新呈现,而该注视词也会在呈现相同的时间后消失。	单字注视持续时间、首次注视持续时间、注视时间、凝视时间等	Rayner et al., 2003
视觉情境范式	把实验材料录音播放给读者听,同时呈现一些图片或者是给被试观看实物,然后要求被试依据实验材料录音去注视图片中的目标物,或者是对实物进行相应的操作	注视次数比例、注视时间等	Cooper, 1974

阅读作为认知发展领域与眼动追踪技术紧密结合的典型研究领域(Wertli et al., 2020), 其重要性得到了关键词共现分析结果的证实。对此, 研究者们开发了众多有关阅读的眼动研究范式。当前阅读研究领域中常用的眼动追踪研究范式有: 移动窗口范式、移动掩蔽范式、边界范式、快速启动范式、消失文本范式和视觉情境范式等, 具体实验流程可见闫国利等人(2010)。这些范式被广泛地应用于揭示不同年龄群体的阅读特点。例如, Blythe 等人(2012)使用词边界范式探究空格对于儿童学习阅读新词汇的作用, 结果发现空格可以帮助 7~10 岁的儿童在两个汉字表征和相应的新词表征之间形成更强的联系, 或者形成对单词本身更充分的特定表征。类似地, 易佳琦等人(2023)同样使用词边界范式比较青年和老年的阅读特点以探究阅读中词切分机制的年轻化, 结果发现年轻化对两种中文阅读词切分机制的影响不同。

4.3. 社会性发展研究范式

社会性发展研究聚焦于探究个体对社会性刺激的注意过程, 以此来揭示社会性发展的内在机制。传统上, 研究者依赖反应时指标间接评估注意加工, 但反应时指标的精确性不足(杨周等, 2024; Schoth et al., 2012)。相比之下, 眼动追踪技术提供了一种直接、精确且动态的测量方式, 能够实时捕捉个体在社会性刺激呈现过程中的视觉注意变化(杨周等, 2024; Yang et al., 2012; Yang et al., 2013)。因此, 眼动追踪技术已成为社会性发展研究中探究个体对社会性刺激注意加工过程的重要工具, 见表 3。

为了考察个体社会性注意的发展, 研究者们开发了多个研究范式。自由观看任务又被称为注视偏好任务, 是非任务导向型范式。该范式通过要求被试自由浏览刺激矩阵(齐亚菲等, 2016; Chakrabarti et al., 2017), 模拟自然观看条件的视觉注意, 避免了在眼球运动中混入依赖于任务的自上而下的效果(Parkhurst et al., 2002)。点探测任务、人群情绪任务、视觉搜索任务和情绪面孔提示范式则为任务导向型范式。其中, 点探测任务(Dot Probe Task)常被用来探究个体对不同情绪面孔的注意偏向(Mogg et al., 1993), 实验中一般先让被试将注意力集中在屏幕正中的注视点上, 然后在屏幕分散的两个空间位置分别呈现刺激对, 接着在刺激呈现位置之一呈现探测信号, 让被试对探测信号尽可能快速并正确地做出按键反应(颜志强等, 2016)。该范式能较好地观察注意定向和保持, 并能灵活地和各种方法结合(刘静怡等, 2013)。人群情绪任务则是研究注意偏向的更为简单的范式, 仅要求被试判断混合情绪面孔中的主要情绪, 揭示情绪感知的优势或偏好。例如, Bucher 等人(2019)利用人群情绪任务发现, 相较于年轻人, 老年人对人群情绪的评价更消极。视觉搜索任务由 Luck 和 Hillyard (1990)提出, 旨在考察注意偏向发生的时间进程(刘静怡等, 2013)。该范式要求被试在一系列干扰物中搜索目标物(Eimer, 2014)。另外, 情绪面孔提示范式作为空间线索范式在社会性发展中的应用, 通过将线索替换为社会性刺激, 也可用于考察个体对社会性刺激的注意偏向。Nakagawa 和 Sukigara (2019)应用该范式对 6 至 12 个月的婴儿展开了研究, 结果发现婴儿对恐惧情绪面孔存在注意偏向。

此外, 研究者们常使用眼动追踪技术探究社会性注意与行为之间的关系。以道德判断研究为例, Pärnamets 等人(2015)设计了注意操纵范式, 通过操纵选项的呈现时间来研究注意和决策之间的关系。在此范式中, 一旦被试对目标刺激的注视时间达到预设时长, 其他选项将停止呈现, 催促被试做出决策。类似地, 在饮食偏好研究中, 改变食物的视觉呈现方式已被证实能够影响人们的食物偏好与选择(Vermeir & Roose, 2020), 突显了视觉注意在社会性行为中的关键作用。值得注意的是, 头戴式眼动仪的发展进一步推动了社会性注意与社会性行为之间关系的研究。具体而言, 头戴式眼动仪允许研究者在真实情境中进行眼动实验, 提高了研究的生态效度。Peng 等人(2021)使用头戴式眼动仪比较个体在真实和虚拟情境中的食物注意偏好, 发现两种情境下个体的注视偏好有所不同, 这提示了真实情景任务中的眼动追踪研究可能与实验室情境中的行为选择存在差异。

Table 3. Paradigms of eye-tracking research in social development
表 3. 社会性发展眼动研究范式

社会性发展范式	主要内容	眼动指标	文献来源
自由观看任务	在呈现的多个刺激物种进行无约束的自由观看	注视持续时间、眼跳朝向、注意偏差等	Chakrabarti et al., 2017
点探测任务	在两个分散的位置分别呈现两个匹配的刺激之后在在任意刺激呈现位置呈现探测信号, 判断探测信号的位置	注视持续时间、注视次数、首次注视时间等	Mogg et al., 1993
人群情绪任务	将多个目标情绪面孔混合在一群中性或其他情绪面孔中, 要求被试判断人群中是否有更多的中性或特定情绪面孔	注视时间、注视次数等	Bucher et al., 2019
视觉搜索任务	搜索分布在视觉分心刺激矩阵中的目标刺激	注视持续时间、注视次数、首次注视时间等	Luck & Hillyard, 1990
情绪面孔提示范式	通过呈现社会性刺激线索, 预示目标刺激的可能位置。目标刺激出现后, 要求被试需立即响应	注视持续时间、注视次数、眼跳反应时等	Posner, 1984
偶然注意刺激操纵范式	控制注视情境, 在当前注视情景中进行道德选择	指向刺激的注意比例、最后注视位置、相对注视时间	Pärnamets et al., 2015
真实情景任务	佩戴可移动式眼动仪在真实场景中眼动追踪	注视持续时间、注视次数、总访问时间等	Peng et al., 2021

5. 总结与展望

5.1. 眼动追踪研究的毕生发展

在心理学发展领域中, 毕生发展心理学研究已然成为趋势(林崇德, 2019; 李月, 2018)。关键词编码分析明确指出了这一趋势, 儿童和成人仍为发展心理学的核心主体, 但研究群体年龄呈现向婴幼儿和老年人两端扩展的趋势(见图 3)(林崇德, 陈英和, 2009; 刘荣等, 2022)。人类心身发展呈现量和质两方面的变化, 既表现出连续性又表现出阶段性, 形成独特年龄特征(林崇德, 1994)。发展心理学的毕生发展目标能够帮助人们更全面地了解人类心理发展特点。此外, 与其他神经科学技术相比, 眼动追踪技术在年龄适用范围上显示出独特优势, 有助于探讨个体生理、认知和社会性的毕生发展。

眼动追踪技术因其非侵入性而被广泛应用于各年龄群体。非侵入性意味着数据采集时, 眼动仪无需直接接触眼睛, 避免了实验可能带来的不适, 确保了数据的生态性, 特别适用于婴幼儿和老年人等敏感群体。选择适合特定年龄段的眼动仪至关重要。根据便携性区分, 眼动仪可以分为桌面式/遥测式和头戴式(王福兴等人, 2016; Chamberlain, 2007; Corbetta et al., 2012)。桌面式/遥测式眼动仪采样率高, 数据优质(王福兴等人, 2016), 但对被试头部和身体的移动限制严格。在应用于婴幼儿等难以保持静止的群体时容易导致数据丢失(Corbetta et al., 2012; Gredebäck et al., 2009), 更适用于自控力强的青少年和成人。相比之下, 头戴式眼动仪虽精度略低, 但通过 3D 眼球模型技术和头动补偿技术, 为被试提供了更大的头部活动自由度, 更适用于婴幼儿群体(Corbetta et al., 2012; Franchak et al., 2010; Jones & Klin, 2013)。Onkhar 等人(2024)的研究指出, Tobii Pro Glasses2 在不限制头动时的眼动追踪精度更高。此外, 头戴式眼动仪的便携性也使得发展心理学研究可以跨越实验室界限, 深入幼儿园、学校以及家庭等, 服务于更广泛的年龄群体。

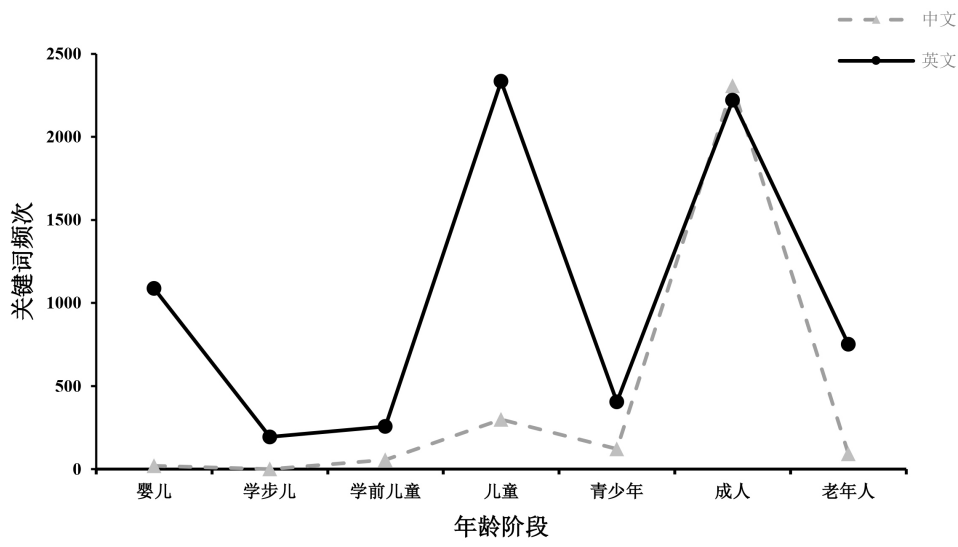


Figure 3. Keyword frequency of age stages involved in eye-tracking research
图 3. 眼动研究中涉及年龄阶段对象的关键词频次

5.2. 眼动追踪研究的比较与建议

综合以往研究, 本文选取了多个关键因素比较分析了生理发展、认知发展和社会性发展三个领域中的眼动追踪研究, 包括适用对象、编程要求、数据分析难度、时序性、任务难度、交互性以及生态效度(见表 4)。生理发展研究较少涉及实验设计, 聚焦于视觉生理特点, 编程要求基本处于中等水平, 数据分析难度较低。认知发展和生理发展研究对时序性要求较高, 强调按特定顺序进行刺激呈现与反应, 而社会性发展研究则更注重自然状态下的反应, 对时序性的要求相对较低。任务难度层面, 认知发展侧重于任务导向的考察, 如记忆与阅读能力, 相较之下, 生理发展聚焦于眼球运动的一般特征, 任务难度较低。社会性发展则因需捕捉自然状态下对社会性刺激的反应机制, 其任务难度介于生理与认知发展之间。交互性层面, 生理发展研究因集中于眼动生理特性, 往往不涉及复杂的交互。社会性发展则高度依赖个体与社会情境的互动, 交互性最强。认知发展则处于两者之间。最后, 生态效度是衡量一个理论或研究解释或预测人们在真实情境中的行为有效性的指标(窦东徽等, 2014)。社会性发展因其关注人际互动、情感表达、社会认知和行为模式等, 对生态效度要求最高。认知发展研究内容虽能在实验室精确测量, 但研究结果仍需在自然情境中验证, 以确保结果的现实相关性, 因此认知发展研究也有一定生态效度要求。相较之下, 生理发展研究聚焦于标准化实验下的生理功能, 对生态效度的要求最低。

Table 4. Comparison and summary of eye-tracking studies

表 4. 眼动追踪研究的比较与总结

研究问题	研究适用年龄(月)	编程要求	数据分析难度	时序性要求	任务难度	交互性	生态效度
生理发展	≥2	中	中	中	低	低	低
认知发展	>12	高	高	高	高	中	中
社会性发展	>12	中	中	低	中	高	高

值得注意的是, 眼动研究范式的选择应基于研究问题。若研究者旨在探索视觉系统的生理发展特点, 可选取生理发展领域的眼动研究范式。例如, 动眼肌捕捉任务通常用于探究注视与眼跳特点(Otero-Millan et al., 2013), 而矩阵移动范式、轨迹追踪任务和平滑追踪任务则有助于研究眼睛追随能力的发展(Richards

& Holley, 1999; Veneri et al., 2014)。在认知发展领域,眼动研究范式专注于揭示大脑认知过程,尤其适用于注意、阅读和记忆能力。注意抑制和定向可通过眼跳任务或空白重叠范式进行探究(闫国利等, 2019; Hallett, 1978),婴儿遮挡范式可用于考察视觉预期能力(Gredebäck & Von Hofsten, 2004),空间线索任务和多目标任务则有助于探索注意力分配(Posner, 1984; Yantis, 1992)。阅读研究范式众多,不同研究范式适用于不同的研究问题,例如边界范式可用于考察副中央凹视觉区域信息对阅读的影响,详见闫国利等人(2010)。记忆导向眼跳任务和习惯化范式常用于评估记忆能力发展,其中后者适用于语言前婴儿(Kucharský et al., 2024)。社会性发展领域的眼动研究范式关注对社会性刺激的注意特点。自由观看任务、视觉搜索任务、点探测任务、人群情绪任务和情绪面孔提示范式更多用于考察个体对社会性刺激的注意偏向(Bucher et al., 2019; Chakrabarti et al., 2017; Mogg et al., 1993; Posner, 1984)。而注意与社会性行为的关系则更倾向于在真实情景中进行,其中在道德领域中可能使用偶然注意刺激操纵范式(Pärnamets et al., 2015)。不过,本文所列眼动研究范式仅为较具代表性的眼动研究范式。眼动作为一项研究技术,可与多种研究范式结合。因此,研究者在采用眼动追踪技术时,应根据研究问题、目标群体和实际情况灵活决策,不必局限于传统范式。

在不同研究领域中,眼动仪的选择对确保数据质量和研究的生态效度至关重要。生理发展领域和认知发展领域研究要求眼动仪具备高精度的数据采集能力(李文清等, 2020)。例如,以高精度著称的 Eyelink 系列眼动仪或高采样率的 Tobii Pro Spectrum 将更为合适(Nyström et al., 2021)。相反,社会性发展领域更注重在自然状态下的交互,该领域更倾向于使用 Tobii 系列眼动仪(李文清等, 2020),特别是那些设计用于自然观察的型号,如 Tobii Pro Glasses。此外, Tobii Pro Fusion 和 Tobii Pro Nano 因其便携性也更适用于社会性发展研究。另外,眼动指标的选取也是研究的关键(Richards & Holley, 1999)。在生理发展领域中,原始眼动指标如眼跳幅度、瞳孔大小、注视时间等更为常用(Otero-Millan et al., 2013; Richards & Holley, 1999),这些指标能够直接反映视觉系统的生理反应。相对地,认知发展和社会性发展领域则更倾向于使用经过计算的、具备动态性的眼动指标(Pärnamets et al., 2015; Thothathiri & Snedeker, 2008),这些指标能够揭示更深层次的认知和交互过程。因此,研究者在使用眼动追踪技术时,需同时考虑设备是否能满足研究领域的特定需求,以及是否能够捕捉到对解答研究问题至关重要的眼动指标。

5.3. 眼动追踪研究的未来展望

眼动追踪技术的发展和应用展现出了广阔的前景,但也面临挑战。具体而言,眼动追踪技术虽然可以部分或完全反映真实生活场景下个体复杂的视觉注意过程,但是目前的眼动追踪研究仍然更多地集中于实验室,这限制了眼动追踪研究结果的生态效度。随着便携式眼动仪的发展,今后的研究将会在自然环境下展开。另外,眼动追踪技术正逐渐与其他技术相结合,以克服单一技术的局限性。近年来,不少学者尝试将眼动追踪技术与脑电、脑成像技术结合,以探究更为精确的认知加工过程及其背后的生理机制。因此,未来的眼动追踪研究需要更多地考虑生态效度,同时积极探索与其他科学技术的结合,以实现更加标准化和深入的应用。

基金项目

湖南省自然科学基金青年项目(编号 2022JJ40270)。

参考文献

- 卞迁, 齐薇, 刘志方, 闫国利(2009). 当代眼动记录技术述评. *心理研究*, 2(1), 34-37.
- 陈庆荣, 谭顶良, 邓铸, 周临, 张晓丽(2009). 眼跳的研究范式及其主要认知功能. *心理科学进展*, 17(6), 1197-1210.

- 陈庆荣, 周曦, 韩静, 安静(2012). 眼球追踪: 模式、技术和应用. *实验室研究与探索*, 31(10), 10-15.
- 陈婷婷, 蒋长好, 丁锦红(2012). 视觉运动追踪的加工过程. *心理科学进展*, 20(3), 354-364.
- 窦东徽, 石敏, 赵然, 刘肖岑(2014). 社会生态心理学: 探究个体与环境关系的新取向. *北京师范大学学报: 社会科学版*, (5), 43-54.
- 高世欢, 陈顺森, 苏彦捷, 林彩云(2019). 视觉正常的自闭症儿童双眼注视点间距的特点及其意义. *心理学报*, 51(9), 1018-1027.
- 胡金生, 李骋诗, 王琦, 李松泽, 李涛涛, 刘淑清(2018). 孤独症青少年的情绪韵律注意偏向缺陷: 低效率的知觉模式. *心理学报*, 50(6), 637-646.
- 季红光, 郭迪, 蔡汝刚, 王海明(2001). 婴幼儿习惯化行为的研究概况. *中国行为医学科学*, 10(4), 397-398.
- 李琳, 赵赛男, 张俐娟, 王敬欣(2022). 老年人汉语阅读中预测误差成本的产生机制. *心理科学进展*, 30(1), 1-14.
- 李莎, 栗觅, 吕胜富, 付冰冰, 丰雷, 王刚, 钟宁(2016). 视觉搜索范式下抑郁症患者的负性注意偏向. *中国心理卫生杂志*, 30(3), 167-171.
- 李珊珊, 尤冉, 郭笑霄, 赵露, 王艳玲, 陈曦(2021). 视神经再生机制研究与进展. *中国组织工程研究*, 25(23), 3740-3745.
- 李文清, 张珊珊, 徐琨鹏(2020). 眼动仪在认知行为实验中的应用及选择. *软件导刊*, 19(2), 80-83.
- 李月(2018). 毕生发展心理学的新进展——评《毕生发展心理学(第二版)》. *中国教育学报*, (11), 142.
- 林崇德(1994). 从儿童心理学到发展心理学. *北京师范大学学报: 社会科学版*, (1), 1-7.
- 林崇德(2019). 中国的发展心理学七十年. *心理发展与教育*, 35(5), 632-640.
- 林崇德, 陈英和(2009). 中国发展心理学 30 年的进展. *北京师范大学学报: 社会科学版*, (1), 38-46.
- 刘静怡, 黄希庭, 杨帅(2013). 社交焦虑障碍中的注意偏差三成分研究述评. *心理科学进展*, 21(4), 664-670.
- 刘荣, 甘烨彤, 汪琛, 王高峰(2022). 中国发展心理学的研究热点与发展趋势——基于《心理发展与教育》创刊 35 年的文献计量分析. *心理发展与教育*, 38(3), 447-456.
- 刘志方, 全文, 张智君, 王永胜(2021). 中文阅读中切词过程的年轻化: 眼动证据. *心理学探新*, 41(1), 34-40.
- 陆润豪, 张兴利, 施建农(2021). 眼动技术在个体认知能力差异研究中的应用. *心理科学*, 44(3), 552-558.
- 马恒芬, 张长颀(2023). 基于眼动追踪技术的认知语言学研究进展. *中国生物医学工程学报*, 42(6), 750-756.
- 齐亚菲, 梁良, 莫书亮, 王福兴(2016). 孤独症儿童对限制性兴趣刺激的视觉注意: 一项眼动研究. *中国特殊教育*, (5), 29-34.
- 嵩钰佳, 王菠, 吕正欣(2018). 婴幼儿早期阅读的方法. *黑龙江教育学院学报*, 37(6), 80-82.
- 王福兴, 童钰, 钱莹莹, 谢和平(2016). 眼动追踪技术与婴幼儿研究: 程序、方法与数据分析. *心理与行为研究*, 14(4), 558-567.
- 夏海莎, 李雨谿, 刘小菠, 范金, 张家铭, 苟馨云, 李涓, 郑重, 金荣疆(2022). 抑郁患者情绪面孔注视特征: 基于眼动研究的 Meta 分析. *中国组织工程研究*, 26(29), 4735-4741.
- 徐娟(2012). 眼动仪的发展和性能比较. *中国现代教育装备*, (23), 16-18.
- 许洁, 王豪龙(2020). 阅读行为眼动跟踪研究综述. *出版科学*, 28(2), 52-66.
- 闫国利, 巫金根, 胡晏雯, 白学军(2010). 当前阅读的眼动研究范式述评. *心理科学进展*, 18(12), 1966-1976.
- 闫国利, 周丽, 张莉(2019). 空白重叠范式对自闭症儿童的早期预测. *心理科学*, 42(1), 223-229.
- 颜志强, 王福兴, 苏彦捷(2016). 疼痛面孔注意加工中共情的作用——来自眼动的证据. *心理科学*, 39(3), 573-579.
- 杨晓梦, 王福兴, 王燕青, 赵婷婷, 高春颖, 胡祥恩(2022). 瞳孔是心灵的窗口吗?——瞳孔在心理学研究中的应用及测量. *心理科学进展*, 28(7), 1029-1041.
- 杨周, 朱嘉雯, 苏琳, 熊明洁(2024). 对疼痛线索的晚期注视偏向预测慢性疼痛的维持: 来自眼动的证据. *心理学报*, 56(1), 44-60.
- 易佳琦, 刘志方, 全文, 陈朝阳(2023). 阅读中词边界影响词汇加工的年轻化研究: 眼动证据. *心理科学*, 46(4), 779-786.
- 余益兵, 葛明贵(2004). 世纪之交中的中国发展心理学研究的计量学分析. *心理发展与教育*, 20(4), 79-83.
- 张苏媛, 兰泽波, 张水, 孟珠, 闫国利(2021). 无关言语对一年级小学生阅读影响的眼动研究. *心理与行为研究*, 19(4),

- 433-438, 446.
- 周临, 邓铸, 陈庆荣(2012). 反向眼跳的实验范式、机制及影响因素. *心理科学*, 35(1), 16-23.
- 朱晓倩, 王一伊, 苏彦捷, 曾晓, 颜志强(2021). 儿童共情研究及其测量工具: 回顾与展望. *心理技术与应用*, 9(10), 619-628.
- Ariel, R., & Castel, A. D. (2013). Eyes Wide Open: Enhanced Pupil Dilation When Selectively Studying Important Information. *Experimental Brain Research*, 232, 337-344. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3744-5>
- Barsznica, Y., Noiret, N., Lambert, B., Monnin, J., De Pinho, C., Hickel, J. et al. (2021). Saccadic Eye Movements in Elderly Depressed Patients with Suicidal Behaviors: An Exploratory Eye-Tracking Study. *Frontiers in Psychology*, 12, Article 712347. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.712347>
- Blythe, H. I., Liang, F., Zang, C., Wang, J., Yan, G., Bai, X. et al. (2012). Inserting Spaces into Chinese Text Helps Readers to Learn New Words: An Eye Movement Study. *Journal of Memory and Language*, 67, 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2012.05.004>
- Bowie, C. R., & Harvey, P. D. (2006). Administration and Interpretation of the Trail Making Test. *Nature Protocols*, 1, 2277-2281. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.390>
- Brignani, D., Bortoletto, M., Miniussi, C., & Maioli, C. (2010). The When and Where of Spatial Storage in Memory-Guided Saccades. *NeuroImage*, 52, 1611-1620. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.05.039>
- Bucher, A., Voss, A., Spaniol, J., Hische, A., & Sauer, N. (2019). Age Differences in Emotion Perception in a Multiple Target Setting: An Eye-Tracking Study. *Emotion*, 20, 1423-1434. <https://doi.org/10.1037/emo0000645>
- Carter, B. T., & Luke, S. G. (2020). Best Practices in Eye Tracking Research. *International Journal of Psychophysiology*, 155, 49-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.05.010>
- Chakrabarti, B., Haffey, A., Canzano, L., Taylor, C. P., & McSorley, E. (2017). Individual Differences in Responsivity to Social Rewards: Insights from Two Eye-Tracking Tasks. *PLOS ONE*, 12, e0185146. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185146>
- Chamberlain, L. (2007). Eye Tracking Methodology: Theory and Practice. *Qualitative Market Research: An International Journal*, 10, 217-220. <https://doi.org/10.1108/13522750710740862>
- Cheng, C., Kaldy, Z., & Blaser, E. (2019a). Focused Attention Predicts Visual Working Memory Performance in 13-Month-Old Infants: A Pupillometric Study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 36, Article ID: 100616. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100616>
- Cheng, C., Kaldy, Z., & Blaser, E. (2019b). Two-year-olds Succeed at MIT: Multiple Identity Tracking in 20- and 25-Month-Old Infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, 187, Article ID: 104649. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.06.002>
- Cherici, C., Kuang, X., Poletti, M., & Rucci, M. (2012). Precision of Sustained Fixation in Trained and Untrained Observers. *Journal of Vision*, 12, 31-31. <https://doi.org/10.1167/12.6.31>
- Coe, B. C., & Munoz, D. P. (2017). Mechanisms of Saccade Suppression Revealed in the Anti-Saccade Task. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372, Article ID: 20160192. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0192>
- Cooper, R. M. (1974) The Control of Eye Fixation by the Meaning of Spoken Language: A New Methodology for the Real-time Investigation of Speech Perception, Memory, and Language Processing. *Cognitive Psychology*, 6, 84-107. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(74\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(74)90005-X)
- Corbetta, D., Guan, Y., & Williams, J. L. (2012). Infant Eye-tracking in the Context of Goal-directed Actions. *Infancy*, 17, 102-125. <https://doi.org/10.1111/j.1532-7078.2011.00093.x>
- Eimer, M. (2014). The Neural Basis of Attentional Control in Visual Search. *Trends in Cognitive Sciences*, 18, 526-535. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.05.005>
- Fantz, R. L. (1964). Visual Experience in Infants: Decreased Attention to Familiar Patterns Relative to Novel Ones. *Science*, 146, 668-670. <https://doi.org/10.1126/science.146.3644.668>
- Franchak, J. M., Kretch, K. S., Soska, K. C., Babcock, J. S., & Adolph, K. E. (2010). Head-mounted Eye-Tracking of Infants' Natural Interactions. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications—ETRA'10* (pp. 21). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1743666.1743671>
- Fujioka, T., Tsuchiya, K. J., Saito, M., Hirano, Y., Matsuo, M., Kikuchi, M. et al. (2020). Developmental Changes in Attention to Social Information from Childhood to Adolescence in Autism Spectrum Disorders: A Comparative Study. *Molecular Autism*, 11, Article No. 24. <https://doi.org/10.1186/s13229-020-00321-w>
- Fukushima, K., Fukushima, J., Warabi, T., & Barnes, G. R. (2013). Cognitive Processes Involved in Smooth Pursuit Eye Movements: Behavioral Evidence, Neural Substrate and Clinical Correlation. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 7, Article 4. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00004>
- Gredebäck, G., & von Hofsten, C. (2004). Infants' Evolving Representations of Object Motion during Occlusion: A

- Longitudinal Study of 6- to 12-Month-Old Infants. *Infancy*, 6, 165-184. https://doi.org/10.1207/s15327078in0602_2
- Gredebäck, G., Johnson, S., & von Hofsten, C. (2009). Eye Tracking in Infancy Research. *Developmental Neuropsychology*, 35, 1-19. <https://doi.org/10.1080/87565640903325758>
- Grönqvist, H., Gredebäck, G., & Hofsten, C. V. (2006). Developmental Asymmetries between Horizontal and Vertical Tracking. *Vision Research*, 46, 1754-1761. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.11.007>
- Hallett, P. E. (1978). Primary and Secondary Saccades to Goals Defined by Instructions. *Vision Research*, 18, 1279-1296. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(78\)90218-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(78)90218-3)
- Hikosaka, O., & Wurtz, R. H. (1983). Visual and Oculomotor Functions of Monkey Substantia Nigra Pars Reticulata. III. Memory-Contingent Visual and Saccade Responses. *Journal of Neurophysiology*, 49, 1268-1284. <https://doi.org/10.1152/jn.1983.49.5.1268>
- Jackson, I., & Sirois, S. (2009). Infant Cognition: Going Full Factorial with Pupil Dilation. *Developmental Science*, 12, 670-679. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00805.x>
- Jones, W., & Klin, A. (2013). Attention to Eyes Is Present but in Decline in 2-6-Month-Old Infants Later Diagnosed with Autism. *Nature*, 504, 427-431. <https://doi.org/10.1038/nature12715>
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A Theory of Reading: From Eye Fixations to Comprehension. *Psychological Review*, 87, 329-354. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.87.4.329>
- Kobayashi, H., & Kohshima, S. (1997). Unique Morphology of the Human Eye. *Nature*, 387, 767-768. <https://doi.org/10.1038/42842>
- Kucharský, Š., Zaharieva, M., Raijmakers, M., & Visser, I. (2024). Habituation, Part II. Rethinking the Habituation Paradigm. *Infant and Child Development*, 33, e2383. <https://doi.org/10.1002/icd.2383>
- Lai, M., Tsai, M., Yang, F., Hsu, C., Liu, T., Lee, S. W. et al. (2013). A Review of Using Eye-Tracking Technology in Exploring Learning from 2000 to 2012. *Educational Research Review*, 10, 90-115. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.10.001>
- Li, S., Li, L., Wang, J., McGowan, V. A., & Paterson, K. B. (2018). Effects of Word Length on Eye Guidance Differ for Young and Older Chinese Readers. *Psychology and Aging*, 33, 685-692. <https://doi.org/10.1037/pag0000258>
- Lisberger, S. G., Morris, E. J., & Tychsen, L. (1987). Visual Motion Processing and Sensory-Motor Integration for Smooth Pursuit Eye Movements. *Annual Review of Neuroscience*, 10, 97-129. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.10.030187.000525>
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1990). Electrophysiological Evidence for Parallel and Serial Processing during Visual Search. *Perception & Psychophysics*, 48, 603-617. <https://doi.org/10.3758/bf03211606>
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1975). The Span of the Effective Stimulus during a Fixation in Reading. *Perception & Psychophysics*, 17, 578-586. <https://doi.org/10.3758/bf03203972>
- Mogg, K., Bradley, B. P., Williams, R., & Mathews, A. (1993). Subliminal Processing of Emotional Information in Anxiety and Depression. *Journal of Abnormal Psychology*, 102, 304-311. <https://doi.org/10.1037/0021-843x.102.2.304>
- Morton, J., & Johnson, M. H. (1991). CONSPEC and CONLERN: A Two-Process Theory of Infant Face Recognition. *Psychological Review*, 98, 164-181. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.98.2.164>
- Müller, N., Riedel, M., Eggert, T., & Straube, A. (1999). Internally and Externally Guided Voluntary Saccades in Unmedicated and Medicated Schizophrenic Patients. Part II. Saccadic Latency, Gain, and Fixation Suppression Errors. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 249, 7-14. <https://doi.org/10.1007/s004060050059>
- Munoz, D. P., & Everling, S. (2004). Look Away: The Anti-Saccade Task and the Voluntary Control of Eye Movement. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 218-228. <https://doi.org/10.1038/nrn1345>
- Nakagawa, A., & Sukigara, M. (2019). Attentional Bias Assessed by a Facial Expression Cuing Paradigm in Infants. *Scientific Reports*, 9, Article No. 68. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36806-1>
- Nelson, K. E. (1971). Accommodation of Visual Tracking Patterns in Human Infants to Object Movement Patterns. *Journal of Experimental Child Psychology*, 12, 182-196. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(71\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0022-0965(71)90003-8)
- Nyström, M., Niehorster, D. C., Andersson, R., & Hooge, I. (2021). The Tobii Pro Spectrum: A Useful Tool for Studying Microsaccades? *Behavior Research Methods*, 53, 335-353. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01430-3>
- Onkhar, V., Dodou, D., & de Winter, J. C. F. (2024). Evaluating the Tobii Pro Glasses 2 and 3 in Static and Dynamic Conditions. *Behavior Research Methods*, 56, 4221-4238. <https://doi.org/10.3758/s13428-023-02173-7>
- Otero-Millan, J., Macknik, S. L., Langston, R. E., & Martinez-Conde, S. (2013). An Oculomotor Continuum from Exploration to Fixation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 6175-6180. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222715110>
- Parkhurst, D., Law, K., & Niebur, E. (2002). Modeling the Role of Salience in the Allocation of Overt Visual Attention. *Vision Research*, 42, 107-123. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(01\)00250-4](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(01)00250-4)

- Pärnamets, P., Johansson, P., Hall, L., Balkenius, C., Spivey, M. J., & Richardson, D. C. (2015). Biasing Moral Decisions by Exploiting the Dynamics of Eye Gaze. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 4170-4175. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415250112>
- Peng, M., Browne, H., Cahyadi, J., & Cakmak, Y. (2021). Predicting Food Choices Based on Eye-Tracking Data: Comparisons between Real-Life and Virtual Tasks. *Appetite*, 166, Article ID: 105477. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2021.105477>
- Popa, L., Selejan, O., Scott, A., Mureșanu, D. F., Balea, M., & Răfăla, A. (2015). Reading Beyond the Glance: Eye Tracking in Neurosciences. *Neurological Sciences*, 36, 683-688. <https://doi.org/10.1007/s10072-015-2076-6>
- Posner, M. I. (1984). Components of Visual Orienting. *Attention and Performance*, 10, 531-556.
- Rahal, R., & Fiedler, S. (2019). Understanding Cognitive and Affective Mechanisms in Social Psychology through Eye-tracking. *Journal of Experimental Social Psychology*, 85, Article ID: 103842. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2019.103842>
- Rayner, K. (1975). The Perceptual Span and Peripheral Cues in Reading. *Cognitive Psychology*, 7, 65-81. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(75\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(75)90005-5)
- Rayner, K., & Bertera, J. H. (1979). Reading without a Fovea. *Science*, 206, 468-469. <https://doi.org/10.1126/science.504987>
- Rayner, K., Liversedge, S. P., White, S. J., & Vergilino-Perez, D. (2003). Reading Disappearing Text: Cognitive Control of Eye Movements. *Psychological Science*, 14, 385-389. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.24483>
- Richards, J. E., & Holley, F. B. (1999). Infant Attention and the Development of Smooth Pursuit Tracking. *Developmental Psychology*, 35, 856-867. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.35.3.856>
- Richmond, J. L., Zhao, J. L., & Burns, M. A. (2015). What Goes Where? Eye Tracking Reveals Spatial Relational Memory during Infancy. *Journal of Experimental Child Psychology*, 130, 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.09.013>
- Saslow, M. G. (1967). Effects of Components of Displacement-Step Stimuli Upon Latency for Saccadic Eye Movement. *Journal of the Optical Society of America*, 57, 1024-1029. <https://doi.org/10.1364/josa.57.001024>
- Schoth, D. E., Nunes, V. D., & Lioffi, C. (2012). Attentional Bias Towards Pain-Related Information in Chronic Pain; a Meta-Analysis of Visual-Probe Investigations. *Clinical Psychology Review*, 32, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2011.09.004>
- Senju, A., & Csibra, G. (2008). Gaze Following in Human Infants Depends on Communicative Signals. *Current Biology*, 18, 668-671. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.03.059>
- Sereno, S. C., & Rayner, K. (1992). Fast Priming during Eye Fixation in Reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 173-184. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.18.1.173>
- Singh, H., & Singh, J. (2012). Human Eye Tracking and Related Issues: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2, 1-9.
- Spering, M., & Carrasco, M. (2015). Acting without Seeing: Eye Movements Reveal Visual Processing without Awareness. *Trends in Neurosciences*, 38, 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.02.002>
- Takarae, Y., Luna, B., Minshew, N. J., & Sweeney, J. A. (2008). Patterns of Visual Sensory and Sensorimotor Abnormalities in Autism Vary in Relation to History of Early Language Delay. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 14, 980-989. <https://doi.org/10.1017/s1355617708081277>
- Thothathiri, M., & Snedeker, J. (2008). Give and Take: Syntactic Priming during Spoken Language Comprehension. *Cognition*, 108, 51-68. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.012>
- Tomalski, P., Marczuk, K., Pisula, E., Malinowska, A., Kawa, R., & Niedźwiecka, A. (2017). Chaotic Home Environment Is Associated with Reduced Infant Processing Speed under High Task Demands. *Infant Behavior and Development*, 48, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2017.04.007>
- Veneri, G., Federico, A., & Rufa, A. (2014). Evaluating the Influence of Motor Control on Selective Attention through a Stochastic Model: The Paradigm of Motor Control Dysfunction in Cerebellar Patient. *BioMed Research International*, 2014, Article ID: 162423. <https://doi.org/10.1155/2014/162423>
- Vermeir, I., & Roose, G. (2020). Visual Design Cues Impacting Food Choice: A Review and Future Research Agenda. *Foods*, 9, Article 1495. <https://doi.org/10.3390/foods9101495>
- Vidal, M., Turner, J., Bulling, A., & Gellersen, H. (2012). Wearable Eye Tracking for Mental Health Monitoring. *Computer Communications*, 35, 1306-1311. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2011.11.002>
- Wertli, J., Schötzau, A., Trauzettel-Klosinski, S., & Palmowski-Wolfe, A. (2020). Feasibility of Eye Movement Recordings with the SMI Tracking Bar in 10- to 11-Year-Old Children Performing a Reading Task. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*, 237, 510-516. <https://doi.org/10.1055/a-1101-9204>
- Yan, Z., Pei, M., & Su, Y. (2017). Children's Empathy and Their Perception and Evaluation of Facial Pain Expression: An Eye Tracking Study. *Frontiers in Psychology*, 8, Article 2284. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02284>
- Yan, Z., Pei, M., & Su, Y. (2018). Physical Cue Influences Children's Empathy for Pain: The Role of Attention Allocation.

-
- Frontiers in Psychology*, 9, Article 2378. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02378>
- Yang, Z., Jackson, T., & Chen, H. (2013). Effects of Chronic Pain and Pain-Related Fear on Orienting and Maintenance of Attention: An Eye Movement Study. *The Journal of Pain*, 14, 1148-1157. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2013.04.017>
- Yang, Z., Jackson, T., Gao, X., & Chen, H. (2012). Identifying Selective Visual Attention Biases Related to Fear of Pain by Tracking Eye Movements within a Dot-Probe Paradigm. *Pain*, 153, 1742-1748. <https://doi.org/10.1016/j.pain.2012.05.011>
- Yantis, S. (1992). Multielement Visual Tracking: Attention and Perceptual Organization. *Cognitive Psychology*, 24, 295-340. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90010-y](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90010-y)
- Zammarchi, G., & Conversano, C. (2021). Application of Eye Tracking Technology in Medicine: A Bibliometric Analysis. *Vision*, 5, Article 56. <https://doi.org/10.3390/vision5040056>