

# 注意网络评估研究综述

毋琳<sup>1</sup>, 李晨曦<sup>1</sup>, 郑杨<sup>2</sup>, 方鹏<sup>1</sup>, 任垒<sup>3</sup>, 孙科伟<sup>1</sup>, 武圣君<sup>1</sup>, 刘旭峰<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>空军军医大学军事医学心理学系, 陕西 西安

<sup>2</sup>西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安

<sup>3</sup>武警后勤学院军事心理学教研室, 天津

收稿日期: 2024年6月29日; 录用日期: 2024年8月20日; 发布日期: 2024年8月28日

## 摘要

心理学家Posner等人提出的注意网络理论, 将注意功能解构为警觉、定向和执行控制三个子网络。大量研究表明, 注意网络测验及其变式可以有效地测量这三个注意子网络的效率及其相互作用。然而, 传统的注意网络评估主要使用行为学方法进行分析, 反应时和正确率等指标无法深入揭示注意功能的神经机制, 具有很大的局限性。本文结合认知神经科学技术方法, 从行为学、脑电、磁共振、眼动以及生物化学等方面对注意网络的大脑解剖学结构、行为学特点和神经生理学机制进行综述, 并基于现有研究, 对未来使用多模态融合的注意网络评估进行展望, 以推动对注意网络更加全面和深入的理解, 为提升注意网络功能提供理论和实证依据。

## 关键词

注意网络, 注意网络测验, 多模态, 认知神经科学技术

# Review of Attention Network Evaluation Research

Lin Wu<sup>1</sup>, Chenxi Li<sup>1</sup>, Yang Zheng<sup>2</sup>, Peng Fang<sup>1</sup>, Lei Ren<sup>3</sup>, Kewei Sun<sup>1</sup>, Shengjun Wu<sup>1</sup>, Xufeng Liu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Military Medical Psychology, Air Force Medical University, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Department of Military Psychology, Logistics University of Chinese People's Armed Police Force, Tianjin

Received: Jun. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 20<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The attention network theory was first proposed by psychologist Posner et al., which deconstructs

\*通讯作者。

文章引用: 毋琳, 李晨曦, 郑杨, 方鹏, 任垒, 孙科伟, 武圣君, 刘旭峰(2024). 注意网络评估研究综述. *心理学进展* 14(8), 753-765. DOI: 10.12677/ap.2024.148607

the attention function into three subnetworks: vigilance, orientation and executive control. A large number of studies have shown that the attention network test and its variants could effectively measure the efficiency and interaction of the three subnetworks. However, the traditional assessment of attention network mainly uses behavioral methods for analysis. Indicators such as reaction time and accuracy could not reveal the neural mechanism of attention function in depth, which has great limitations. In this manuscript, the anatomical structure, behavioral characteristics and neurophysiological mechanism of the attention network are reviewed from the aspects of behavior, EEG/ERP, MRI, eye tracking and biochemistry. Based on the existing research, the future evaluation of the attention network using multimode fusion technology is prospected. This review promotes a more comprehensive and in-depth understanding of attention networks and provides theoretical and empirical basis for enhancing attention network functions.

## Keywords

Attention Network, Attention Network Test, Multimode, Cognitive Neuroscience Technology

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. 注意与注意网络理论

注意是认知心理学的一个重要领域，是指对精神思想或物质环境等特定方面的心理准备和选择的过程(Nobre & van Ede, 2023)，被认为是事件发生后相对较早的认知能力之一。作为一种基本的心理能力，注意广泛参与到情绪、决策、记忆和其他心理过程中，从而确保人们对事物有更清晰的理解、更准确的反应和更可控的行为(Grossberg, 2021; Ben Azouz et al., 2009)。注意具有指向性和集中性的特点。指向性决定了心理或意识活动指向哪个对象，而集中性则是指注意资源在对象上的集中程度，以确保信息选择和问题处理的有效性(Carlisle, 2019)。

20 世纪 60 年代以来，心理学家提出了一系列注意理论模型，包括注意选择的过滤器理论(Broadbent, 1958)、衰减理论(Treisman & Gelade, 1980)以及双加工理论(彭聃龄, 2019)等，这些理论模型极大地促进了注意功能的理论和实证研究。随着研究的深入，学者们意识到，注意是一个复杂的过程，包括多个大脑区域、多种感官通道、多项心理过程的参与，传统的单一的理论模型已经无法解释注意加工过程中的诸多问题。

心理学家 Posner 和 Petersen 等人基于对注意功能的大脑解剖结构和特定功能的研究，提出了注意网络模型，将注意功能解构为警觉、定向和执行控制三个子网络(Posner & Petersen, 1990)。警觉网络是指个体维持一定程度的唤醒状态，从而实现传入信息的有效感知接收，反映的是个体持续性注意的能力(陈雪江, 朱燕辉, 2010)。研究表明，警觉分为内源性警觉和外源性警觉两种，内源性警觉多与个体固有神经活动相关，而外源性警觉多与个体即时的状态相关(Van Vleet et al., 2015)。现有研究较多关注外源性警觉，即从认知加工的角度探究警觉信号对目标刺激加工过程的影响，而目前关于内源性警觉的研究较少。定向网络负责个体对任务导向目标的主动追踪或突然出现目标的被动追随，反映了对于外界输入信息选择处理的能力，即选择性注意(张立伟, 杨业兵, 赵宁等, 2019)。根据刺激呈现的视觉空间位置和加工类型的不同，定向也包括内源性定向和外源性定向两种类型(Jefferies et al., 2019)。执行控制网络包括对冲突的监控和解决过程，广泛参与到计划或决策、错误监测、对于新异的或不熟悉刺激的反应、判断困难的条件或危险，克服习惯性行为等过程，是大脑在面对冲突信息时的高级决策和主动控制(Fan et al., 2009)。

虽然警觉、定向和执行控制三个注意子网络在大脑的解剖结构上是相对独立的，具有各自不同的神经起源和传导通路，但许多研究已经证实(荆秀娟, 王一峰, 2015)，注意功能的有效实现依赖于三个子网络及其脑区之间的功能整合和相互作用。基于此，研究者们开发了系列综合性的注意网络测验(Attention Network Test, ANT)对警觉、定向和执行控制功能进行测试(Posner, 2014)。

## 2. 注意网络测验

### 2.1. ANT 初始版本

Fan 等人于 2002 年首次报道了最初版本的 ANT 任务(Fan et al., 2002)。被试被要求尽快对处于五个并行箭头的中央箭头方向做出左右按键反应。同时，四种“\*”线索用于空间视觉引导：无线索，即在屏幕中央仅呈现“+”注视点；中心线索，即在屏幕中央注视点位置呈现“\*”；双线索，即在屏幕中央“+”注视点上下同时呈现两个“\*”；空间线索，即在屏幕中央“+”注视点上或下呈现一个“\*”。该任务由以上四种线索条件(无线索、中心线索、双线索和空间线索)与三种 Flanker 条件(中性、一致和不一致)组合设计，如图 1 所示。

ANT 任务以其精妙的任务设计和简单易行的特点，一经报道便被广泛使用。不同于精神运动警觉性任务(Psychomotor Vigilance Task, PVT)、空间线索范式(Spatial Cueing Task)、Stroop 任务等分别测量注意的相关功能，初始版本的 ANT 任务首次将注意的警觉、定向和执行控制子网络一并纳入其中，同时实现对三个子网络功能的测量，有效避免了时间任务效应带来的评估偏倚，具有良好的信度和效度。使用该任务的研究者认为三个子网络之间相互独立(Federico et al., 2016)，但是许多学者持不同观点，他们认为注意功能的执行并非各子网络单独作用的结果，各子网络之间应当具有一定的相互作用。此外，研究者也试图探索 ANT 任务在不同感官通道和不同人群的特点。经过二十多年的研究发展和许多学者的不断设计改良，已衍生出多个具有不同特点的版本(de Souza Almeida et al., 2021)。

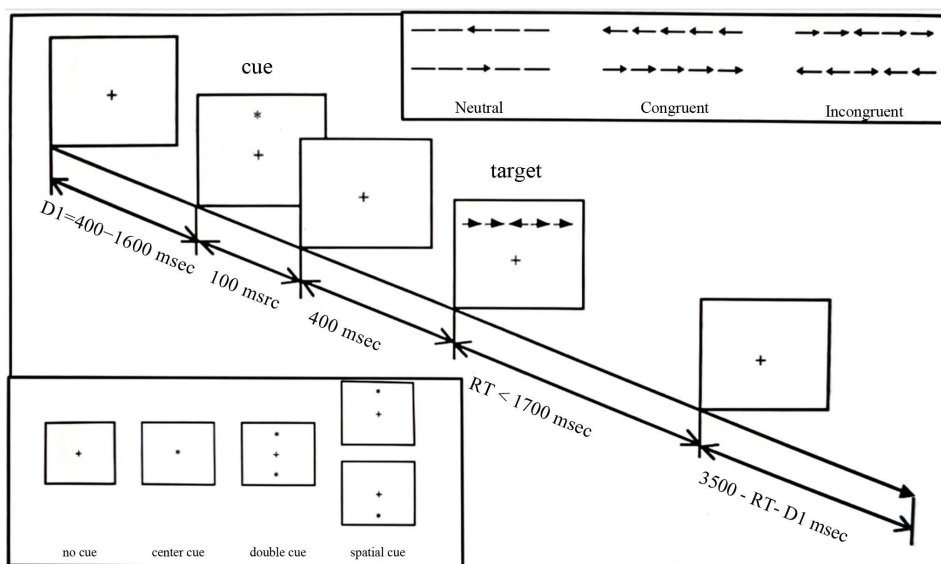


Figure 1. The flowchart of initial version ANT test

图 1. 初始版 ANT 测验流程图

### 2.2. ANT 衍生版本

ANT-I (Attention Network Test-Interaction)任务由 Callejas 及其同事在 2004 年首次进行研究报道

(Callejas et al., 2004)。相较于初始版 ANT 任务, ANT-I 任务主要进行以下修订: 在半数的试次中采用音调诱发警觉网络; 空间线索完全不提供信号信息; 去除了中性 Flanker 条件。这样设计使用视听双通道将警觉的定向网络分离, 音调线索用于评估警觉网络, “\*” 线索用于评估定向网络, 使得两个过程能够更加纯粹地分离开来。

Rueda 及其同事在研究儿童注意力时对初始版 ANT 进行了修订, 产生了儿童版 ANT (Rueda et al., 2004)。基于儿童注意力特点, 该任务中使用有向卡通“鱼形”图案代替箭头、正确反馈以动画表示、刺激和背景均为彩色, 以确保儿童兴趣和注意力足够集中进而顺利完成实验。相比于其他版本的 ANT, 该版本最大改变就是加入了反馈, 使儿童可以在任务中不断得到强化学习, 同时也能够探究儿童注意网络的短时时间变化。

基于许多学者对于警觉、定向和执行控制网络之间的相对独立性和相互作用的争议, Fan 等人于 2009 年报道了 ANT-R (Attention Network Test-Revised) 任务, 重点用于探究网络之间的整合和相互作用 (Fan et al., 2009)。不同于初始版 ANT, ANT-R 任务进行了细微且巧妙地调整: 将每个试次的 5 个箭头整合在一个长方形框中, 且出现的位置为“+”注视点的左右两侧, 这一微小的调整巧妙地引入了空间 Stroop 效应, 即在目标箭头与周围 4 个箭头比较的基础上, 加入了与长方形空间位置比较的冲突效应; 空间线索也分为有效和无效两种, 以将定向功能中的脱离、转移和投入过程外显出来; 此外, 线索和目标刺激之间的时间间隔也并不是固定的, 而是被随机等概率地分为 0、400 和 800 毫秒。三线索、两冲突、三间隔条件下的反应时进行运算即可获得网络间丰富的相互作用 (Xuan et al., 2016)。

此外, 还有主要用于视觉障碍人群注意网络测量的听觉版 ANT 任务、用于探究睡眠剥夺与驾驶对注意网络影响的 ANT 任务 (Roca et al., 2012, 2013) 和测量大脑偏侧化的 ANT (吴越, 2020) 等。

ANT 及其丰富的衍生版任务成为了注意网络研究中最经典的范式, 实现了对不同人群的注意网络及其子网络的功能和相互作用, 从不同感官通道等进行综合评估, 现已被广泛用于认知障碍、精神分裂症、抑郁症、注意缺陷障碍以及特殊岗位人群注意功能评估中 (Wang et al., 2023; Pultsina et al., 2022; Francis et al., 2023)。传统对于 ANT 的评估手段主要使用行为学方法, 随着近年来认知神经科学的迅猛发展, 新技术新方法的应用是对注意网络的研究更加深入。

### 3. 注意网络的评估方法

基于注意网络理论和注意网络测验, 国内外许多学者使用多种测量和评估方法, 并从多模态角度展开了对注意网络的解剖学结构、行为学特点和神经生理学机制等研究, 以下分别从行为学、脑电、核磁共振、眼动以及生物化学方面对注意网络评估方法和结果进行综述。

#### 3.1. 行为学评估

##### 3.1.1. 常用指标及计算方法

行为学结果分析是传统常用的分析方法, 根据心理物理法测量原理, 分别测量不同类型的提示线索、冲突效应和线索 - 刺激间隔条件下的反应时和正确率, 通过运算可以获得子网络处理效率以及网络和效应间的相互作用。常用的指标如表 1 所示:

**Table 1.** Common indicators and calculation methods for ANT test

**表 1.** ANT 测验常用指标及计算方法

评估指标	计算方法
Eff <sub>alerting</sub>	$RT_{no-cue} - RT_{double-cue}$

续表

Eff <sub>orienting</sub>	$RT_{no-cue} - RT_{spatial-cue}$
Eff <sub>executive control</sub>	$RT_{incon} - RT_{con}$
Validity	$RT_{invalid-cue} - RT_{valid-cue}$
Flanker Effect	$RT_{Fl-incon} - RT_{Fl-con}$
Location Effect	$RT_{Lo-incon} - RT_{Lo-con}$

注: Eff<sub>alerting</sub>: 警觉网络效率, Eff<sub>orienting</sub>: 定向网络效率, Eff<sub>executive control</sub>: 执行控制网络效率, Validity: 线索有效性, Flanker Effect: Flanker 效应, Location Effect: 位置效应, RT: 反应时, no-cue: 无线索, double-cue: 双线索, spatial-cue: 空间线索, con: 一致情况, incon: 不一致情况, valid-cue: 有效线索, invalid-cue: 无效线索, Fl-con: Flanker 一致情况, Fl-incon: Flanker 不一致情况, Lo-con: 位置一致情况, Lo-incon: 位置不一致情况(Fan et al., 2009)。

### 3.1.2. 速度——准确性权衡特点

由于在 ANT 任务中要求被试既快又准地对于目标刺激进行反应, 个体可能在“速度——准确性权衡”方面呈现不同的特点(Hudson et al., 2020; Seli et al., 2012)。Posner 和 Petersen 在研究中发现, 在处于高度警觉状态时, 个体更倾向于牺牲一定的准确率来换取对目标的更快反应, 其反应时显著降低但错误率随之增加(Posner & Petersen, 1990)。

### 3.1.3. 子网络相互作用

Fan 等使用初始版 ANT 任务研究发现, 三个子网络得分之间无显著性差异, 故 Fan 等人认为子网络之间是相对独立的(Fan et al., 2002), 从实证研究中证实了 Posner 的理论构想。然而, 综合了 1129 名被试的一项元分析表明(Macleod et al., 2010), 线索条件与 Flanker 条件之间具有相互作用。那么就有理由推测由线索条件反应时计算得到的警觉和定向网络与由 Flanker 条件计算得到的执行控制网络效率间存在一定的相互作用(Ishigami & Klein, 2010)。较高的警觉程度会引发被试更大的 Flanker 冲突, 表现为执行控制功能下降; 有效的空间线索提高了执行控制的效率, 而无效的线索干扰了执行控制。

### 3.1.4. 年龄发展特点

研究者使用儿童版 ANT 任务探究了注意网络随个体心理发展的变化关系, 发现三个子网络具有不同的变化特点: 警觉网络效率随着年龄增长不断提高, 定向网络效率在 10 岁左右达到高峰, 执行控制网络效率在 6~7 岁之间呈上升趋势。同时, 有研究发现, 10 岁儿童在 ANT 任务中几乎能与成年人保持同样的正确率, 但其平均反应时较成年人更长, 反映了儿童可能在大脑发育和认知资源上仍有发展空间(de Souza Almeida et al., 2021; 杨青, 谢悦悦, 2017)。

### 3.1.5. 时间效应特点

使用 ANT-R 任务对于线索 - 刺激间隔(Stimulus Onset Asynchrony, SOA)进行操控的研究发现, 注意定向在间隔较短时产生易化效应, 线索化的位置缩短了反应时间; 反之, 间隔较长时候则出现返回抑制(Inhibition of Return, IOR)的现象, 对线索化位置上靶刺激的反应滞后于非线索化位置。300 ms 是双阶段效应的分界点, 这一现象被认为对提高注意选择效率具有积极意义(唐晓雨, 王凌云, 张明, 2012)。同时, Fan 通过系列研究发现, 警觉和执行控制网络之间的相互作用在线索 - 刺激间隔为 400 ms 左右较为明显。基于对两个网络重叠脑区的研究, Fan 等将这一现象解释为两个网络在该条件下对于有限注意资源的竞争作用(Fan et al., 2007)。同样使用注意资源理论解释的还包括听觉线索对于视觉定向和冲突加工的影响等现象(Fan et al., 2009)。



## 3.2. 脑电评估

事件相关电位(Event-Related Potentials, ERP)是研究认知活动和认知神经功能的重要方法。它具有高时间分辨率和锁时特性,反映了大脑在特定任务和感兴趣事件下的反应。ERP 可以提供关于人脑如何处理信号和准备采取行动的信息,在揭示认知的过程方面具有较大优势(Helfrich & Knight, 2019)。

### 3.2.1. 时域特点

脑电的时域分析研究表明,P1、N1、N2、P3 以及 CNV、定向负波等成分均可以反映注意网络相关功能和过程,是描述注意网络特点、揭示其大脑神经机制的有效指标。

P1 通常起始于刺激后的 60~90 ms 左右,并于 100~130 ms 时在侧向枕叶电极处检测到最大值。一般认为,P1 代表视觉注意的早期处理过程,在高警戒状态时其波幅增加,反映了注意资源投入的总量大小(Williams et al., 2016)。同时,P1 在有效线索的定向过程中也显示出较大波幅,这可能反映了大脑对偏侧化空间信息加工的过程(Williams et al., 2016)。

N1 为 P1 之后的第一个负波成分,大约出现在刺激呈现之后的 150~200 ms,同样被认为是视觉注意的早期成分。研究表明,警戒状态下在顶叶可以检测到显著增加的 N1 波幅,与之前发现的警觉线索后目标早期注意处理增强一致(Neuhaus et al., 2011)。这可能是在高警戒状态下,被试调用了更多的注意资源所导致(史新广,冯文锋,冯成志, 2022)。定向增强中的 N1 则主要位于枕叶和顶枕区域(Neuhaus et al., 2011)。

N2 成分为刺激出现 200~300 ms 后呈现的负波,根据刺激感官通道的不同具有不同的优势脑区,视觉刺激主要分布在大脑中后部区域,听觉刺激主要分布在中央区的位置(Groom & Cragg, 2015)。根据 Groom 等人的报道,N2 主要反映了执行控制加工的第一阶段——冲突监测(Groom & Cragg, 2015)。在评估不一致信息时,个体需要投入更多的认知资源,表现为 N2 的波幅更大(Zheng et al., 2022)。

执行控制加工的第二个阶段——冲突解决主要体现在 P3 成分的变化上。P3 被认为是 ERP 的第一个内源性成分,是在刺激出现后 300 ms 左右的正向诱发电位(Helfrich & Knight, 2019)。Isreal 等人最早使用注意资源理论解释 P3 反映大脑的注意力过程(Isreal et al., 1980)。研究表明,P3 可以分为 P3a(额叶区域广泛分布)和 P3b(颞中回及顶叶区域广泛分布)两个子成分,分别代表刺激发生后的感知和反应阶段(Polich, 2007),同时也揭示了随意和非随意两种注意类型的电生理机制。

以上脑电时域成分贯穿了注意的整个过程,并在不同的注意子网络中具有不同特征,可能具有以下意义:1) 早期注意分配。早期成分的波幅和潜伏期变化可以反映个体在视觉刺激呈现初期的注意分配情况,当个体对某个视觉刺激给予投入更多的注意资源时,相应成分的波幅可能会增大,潜伏期可能会缩短。2) 感觉门控机制。特征成分的出现可能代表了感觉门控机制,即大量的外界信息作为刺激输入大脑时,不同成分可能体现着大脑筛选和过滤重要信息的活动,以便进行后续的更为深入的加工处理。3) 跨通道整合作用。不同的脑电成分代表着不同的认知加工通道和过程,而这些通道和过程并不是独立的。不同的脑电成分可能实现跨通道的整合作用,对于实现复杂的认知功能具有重要意义。

### 3.2.2. 时频特点

除上述时域特征外,注意网络测验还可以引发被试一定频段内脑电节律性活动的变化,这些事件相关频谱变化被称为事件相关同步化(Event-Related Synchronization, ERS)和事件相关去同步化(Event-Related Desynchronization, ERD)。时频分析同时保留了时间、频率和能量方面的信息。Fan 使用高密度脑电对注意网络任务诱发的神经振荡和功率谱进行探究,发现了在警觉线索提示后 200~450 ms 时  $\theta$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  频段功率减弱;在空间线索呈现后 200 ms 左右  $\gamma$  频段功率增强,这可能揭示了在空间定向过程中大脑对刺激即将出现的位置的准备和预期过程;在不一致的 Flanker 冲突时,执行控制网络在刺激出现 400 ms 内呈现出  $\gamma$  频段的 ERS,随后  $\beta$  和  $\gamma$  频段出现 ERD;同时,反应之前所有频段的功率低于反应之后,这

表明, 注意的每个功能子网络均具有特定的神经振荡模式和时间进程(王铄辰, 陈奥博, 曹成龙, 2021)。

通过对注意网络脑电监测的时频特征进行分析, 我们可以更深入地理解大脑注意网络的动态变化和神经机制。这些特征一方面反映了大脑对外部刺激的响应和认知资源的分配情况, 另一方面还揭示了大脑内部不同脑区之间的同步和整合过程。这对于我们理解注意网络的脑神经机制、优化注意训练方案以及开发相关的神经调控技术具有重要意义。

### 3.3. 磁共振评估

功能磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)是一种非侵入性、无放射性观察大脑神经活动的技术, 具有优良的空间分辨率(Minhas & Oliver, 2022)。fMRI 的发展极大地推动了认知神经科学的发展(Bigler, 2014)。

#### 3.3.1. 警觉网络

许多研究使用功能磁共振成像技术对注意网络的神经机制进行探索, 发现大脑皮质(如枕叶、额叶和顶叶皮层)(Kam et al., 2020; Capotosto et al., 2023)及皮质下区域(如上丘和丘脑枕核)(Mu et al., 2023)等结构广泛参与到注意过程中, 不同脑区结构和功能的整合共同保证了注意到的信息优先处理。现有研究认为, 脑干的觉醒系统对于维持警觉状态至关重要, 但对于偏侧化大脑半球的功能却得到不一致的结论。许多研究表明了右侧大脑半球可能发挥更大的调控功能, 在同侧的额叶、顶叶和丘脑区域显示出更大的激活效应(Galvaó-Carmona et al., 2014)。Petersen 等将这种偏侧化的差异解释为固有警觉(本身维持)和相位性警觉(外部线索或者信号引发)的差异(Petersen & Posner, 2012)。

#### 3.3.2. 定向网络

基于对注意网络定向子网络的研究, Posner 和 Petersen 于 1990 年(Posner & Petersen, 1990)提出了上丘和丘脑枕核在注意控制和注意资源分配中的作用, 后续被许多研究不断证实。现在普遍认为, 定向解离过程主要由顶叶参与, 中脑回路和上丘主要参与定向转换过程, 而定向投入则主要由丘脑枕核参与调控(Fiebelkorn & Kastner, 2020; 赵晓月, 唐丹丹, 2015)。

根据线索和刺激类型之间的不同组合关系, 内源性定向和外源性定向分别激活背侧注意网络和腹侧注意网络。背侧注意网络(Dorsal Attention Network, DAN)又称视空间注意网络(Visuospatial Attention Network), 主要包括顶内沟(IPS)和额眼区(FEF), 参与到自上而下的注意选择和定向过程(Vossel et al., 2014)。当个体获得了线索所提示的刺激的物理信息时, 由目标驱动背侧注意网络被广泛激活, 个体通过意志努力维持较高的专注状态, 在行为学表现为反应时缩短, 伴或不伴有正确率提高(速度 - 准确性权衡)。腹侧注意网络主要位于右侧大脑半球, 具有明显的偏侧化特点(Clarke et al., 2022)。颞顶联合区(TPJ)和腹侧额皮质(VFC)在其中发挥重要作用, 参与显著性未知刺激所引发的自下而上的注意过程, 且具有跨感觉通道的一致性(Corbetta et al., 2008)。该过程由刺激驱动, 当线索无效时, 被试需要打破原来位置的注意力聚焦并切换到实际位置; 或当刺激强度足够大时, 即使原本投入于目标导向的注意资源也会被吸引过来, 以实现突然发生的或具有危险情况的有效应对(Wu et al., 2022)。背侧和腹侧注意网络结构和功能之间存在分离与整合, 脑区之间通过竞争性抑制和协同以及反馈环路灵活调配注意资源, 共同实现注意的复杂功能。

#### 3.3.3. 执行控制网络

研究表明, 当被试经历 Flanker 冲突时, 其相关脑区激活顺序为左侧前额叶、中前区、右侧前额叶等区域。前扣带回也参与到执行控制网络的调控中来(Sarrias-Arrabal et al., 2023)。根据冲突管理理论, 冲突信息在左侧前额叶被有效监测, 随后传入大脑中前区进行信息整合和认知资源分配调控, 最后传入右侧

前额叶进行冲突解决(赵晓月, 唐丹丹, 2015)。

虽然不同功能子网络分别具有独有的调控脑区,但值得注意的是,额顶控制网络在三个子网络中发生了一定的重叠激活,得到了许多学者的研究证实(Xuan et al., 2016; Vázquez-Marrufo et al., 2014)。扣带回皮层也广泛参与到注意过程中,对于不确定性信息的处理发挥重要作用(Sadaghiani & D'Esposito, 2015)。注意力聚焦的客体进入意识状态时可能激活了扣带回皮层和中线皮层的连接(Dehaene & Changeux, 2011),反映了作为反应预期的警觉功能;而扣带回皮层与外侧额叶区的协同也参与到冲突解决的执行控制过程之中(Markett et al., 2022)。这可能是子网络间相互作用的神经机制,也为行为学数据计算得到的相互作用指标提供了影像学证据。

综上,磁共振技术可以利用大脑神经元在活动过程中血液动力学等信息的差异,将兴奋脑区显现出来,并已实现将解剖结构、物质代谢、能量变化等方面进行统合,具有以下重要意义:1) 注意等认知功能的评估。磁共振特征的变化可以反映个体注意网络的功能状态,如:功能连接的强度和模式可以反映信息处理能力和神经网络的协调性,脑区激活的强度和范围可以用来评估个体的注意力集中程度和认知资源分配情况。2) 神经精神疾病的诊断和效果评估。磁共振特征的异常变化可能与神经精神疾病(如注意缺陷多动障碍、抑郁症、精神分裂症等)的发生和发展密切相关。通过 fMRI 检查,可以有助于患者注意功能的评估以及辅助医生进行早期诊断和制定治疗方案,并通过观察患者在康复过程中脑区激活和功能连接的变化,可以评估注意干预的有效性和调整干预策略。

### 3.4. 眼动评估

眼动技术,又被称为视线追踪(Eye Tracking, ET)技术,是研究如何能够即时、准确、无接触地追踪视觉运动过程的新兴技术,可以对被试认知加工特性(如感知觉特性、注意分配和转换)、情绪特征(如紧张度、强度、稳定性)、行为特征(如搜索模式、信息提取策略和效率、对特定客体的偏好)进行有效衡量(Carter & Luke, 2020; Valtakari et al., 2021)。综合现有研究,不同的注意类型、不同的线索条件等分别具有不同的眼动特点,不同的研究获得了不完全一致的结果。

眼动特征可以反映个体在注意网络任务中的认知功能状态。例如,注视点分布和注视时间可以评估个体的注意力集中程度和认知资源分配情况;眼跳幅度和速度可以评估个体的注意转移效率和灵活性。研究表明,外源性注意存在注意转移,易于通过眼跳指标对其进行捕捉,内源性注意转移可能也需要眼球运动系统的参与(Lowet et al., 2018; 桂婷, 杨安民, 孙嘉伦等, 2022),但 Remington 等认为两种注意类型并不一定都需要注视点的转移(Remington, 1980), Smith 和 Schenk 的研究也认为内源性注意可以独立于动眼神经而执行功能(Smith & Schenk, 2012),并可以通过无眼动的视野范围内整体知觉加工实现(Casteau & Smith, 2020)。对于内源性眼跳和注意转移的研究结论也存在一定的争议。当目标刺激的位置与内源性眼跳准备的方向一致时,被试的反应更加迅速,从而认为内源性眼跳前也存在注意转移,而也有学者认为内源性眼跳与注意转移是相互独立的(王一楠, 宋耀武, 2011; Hunt & Kingstone, 2003)。余芬芬等人使用内源性和外源性注意范式考察注意类型与注意转移准确性的关系。结果显示,在有效线索条件下,内、外源性注意对眼跳精确度具有显著影响,外源性注意引导下的注意转移准确性更高;而在无效线索条件下,两个类型的注意则对眼跳距离具有显著影响,外源性注意引导下的注意转移准确性变低,提示眼跳可以作为监测和评估内、外源性注意的指标(余芬芬, 曹晓华, 田学红等, 2007)。

综上,眼动特征在注意网络研究中的意义主要体现在认知功能评估、用户行为分析、神经精神疾病的诊断等几个方面。但值得注意的是,眼动技术对于注意网络的评估结果在很大程度上受到个体认知加工策略和眼动模式的影响。对于注意网络与眼动的复杂关系还需要更多深入的研究进行探索。



### 3.5. 生物化学评估

从神经生理学的角度来讲,目前普遍认为警觉功能主要由蓝斑-去甲肾上腺素能系统(Locus Coeruleus-Norepinephrine, LC-NE)参与调控(Thiele & Bellgrove, 2018);定向网络由胆碱能系统参与功能调控(Ruiz et al., 2021; Klinkenberg et al., 2011);执行控制网络由多巴胺能系统参与调控(陈晨, 张英, 刘嘉, 2018)。不同的神经递质在不同大脑区域和特定细胞上具有特异性受体,表现出结构和功能上的独特性。

然而随着研究进展,越来越多的证据表明神经递质和子网络之间的关系并不完全是一一对应的。Sara 等人的研究显示,同一种神经递质也可能同时影响和调节多个注意过程,表现在注意子网络功能之间的协同和拮抗作用(Sara & Bouret, 2012)。Naicker 等人发现,抗胆碱药物东莨菪碱可能潜在地影响胆碱能系统和多巴胺系统的平衡,同时对定向和执行控制网络产生影响(Naicker et al., 2016)。此外,一种神经递质的生理效应也并不是一成不变的,这可能受到机体内环境和递质浓度的影响。例如:Grace 等人发现了多巴胺的持续释放可以维持神经回路的正常功能,而瞬时发放导致短期内浓度的迅速变化可能与特定的神经生理活动有关(Grace et al., 2007)。

综合现有研究,注意网络的生物化学评估涉及神经递质释放与再摄取、受体与信号转导、基因表达与调控等机制和过程,对于认知功能评估、药物研发、个性化治疗等具有重要意义。值得注意的是,虽然各网络具有其主要的调控神经递质,但各种神经递质的物化特性以及平衡均会对三个网络产生不同程度的调控作用,共同协调并维持整体注意网络的功能。

## 4. 总结与展望

注意作为重要的认知活动之一,是伴随着感知觉、记忆、思维、想象等心理过程的一种共同的心理特征。基于注意网络理论,注意网络测验及其变式巧妙地测量了警觉、定向和执行控制三个子网络功能和效率,并可以有效探究其间的相互作用。此外,认知神经科学技术与研究方法的促进了对于注意网络的研究。但我们要注意到的是,每种技术方法都有其优势与不足。行为学方法虽然是评估任务绩效和能力水平的“金指标”,但无法揭示个体的神经生理学机制;脑电技术具有优良的时间分辨率,但由于“容积传导效应”,其空间分辨率较为有限;磁共振技术对于大脑结构和脑区活动具有良好的研究效果,可以在时间和空间分辨率上与脑电技术优势互补;眼动技术可以较好地分析眼球“看哪里、看多久、怎么看”等运动特点,但受制于精确度及干扰性等问题;生物化学技术可以通过对递质等代谢物质的分析来阐明大脑神经活动的分子机制和相关靶点,但同时对分析方法等提出较高要求。

基于现有研究和各种评估方法的优缺点,研究者逐步考虑综合使用多模态技术方法从不同角度对大脑的结构和功能进行综合评估,有助于揭示大脑神经活动和心理过程的外显特点和内在联系。经过二十余年的发展,EEG-fMRI 技术已经相对成熟并处于认知多模态神经成像的前沿,并显示出深入理解认知神经机制和指导临床干预的巨大潜力(Cichy & Oliva, 2020)。使用 EEG-fMRI 技术, Yin 等人发现了在注意力控制网络中,感觉运动皮层的  $\mu$  节律的功率与 BOLD 呈负相关(Yin et al., 2016); Liu 等人在视觉空间注意中发现半球 alpha 功率和跨半球 Alpha 偏侧化与 BOLD 信号相关,涉及 IPS、前额视区、DMN 网络以及 dACC/MPFC 和 DLPFC 等脑区,揭示了注意调制机制和节律耦合的特点(Liu et al., 2014)。同样地,脑电图和视线追踪技术的同步监测也在认知品质和行为特点的研究以及临床实践中获得广泛应用(Scharinger et al., 2020; Moghadami et al., 2021)。Louisa 等人的研究使用同步眼动追踪和脑电图技术发现了前额叶在维持注视和扫视抑制过程中的作用,并对外显性和内隐性注意转移的神经生理学和眼动特点进行比较(Kulke et al., 2016); Simon 等人认为脑电图  $\alpha$  活动和眼球直径是内源性注意的时间敏感指标,并在研究中发现在了内源性注意定向过程中,大脑  $\alpha$  功率与瞳孔直径呈正相关,表现出  $\alpha$  频段的较低不同步性和瞳孔直径较大和眼跳减少等特点。这可能揭示了一种保护内部认知不受无关感觉信息影响的神经

经生理门控机制(Ceh et al., 2020)。以上多模态方法的综合使用将使注意能力研究逐渐深入。

多模态技术作为一个非常活跃的研究领域,既有成熟的应用,也有处于起步阶段的研究,未来前景广阔。正如 Tracy Warbrick 所讲,脑电、视线追踪、功能磁共振成像等多模态技术的综合应用可以提供丰富的关于大脑的神经动力学信息,从而促进对脑功能的更好理解,而这可能是单一方法所无法达到的(Warbrick, 2022)。在今后的研究中,可以将脑电、功能磁共振成像等认知神经科学技术与传统的行为学分析方法相结合,在个体执行注意网络任务时,同步采集大脑信号指标(如电信号、血流信号)、任务指标(如反应时、正确率)、眼动行为指标(如注视轨迹、注视时长、瞳孔直径)、生理指标(如心率变异性、神经递质)等综合判定注意网络的功能结构、解剖定位以及特定的行为模式,实现多模态之间时空特点的交叉互补,以推动对注意网络更加全面和深入的理解,为提升注意网络功能提供理论和实证依据。

## 基金项目

中国人民解放军空军军医大学“快速响应”项目(2023KXKT061);中国人民解放军军事类研究生资助项目(JY2023C199);中国人民解放军空军装备综合研究重点项目(KJ2022A000415)。

## 参考文献

- 陈晨, 张英, 刘嘉, 等(2018). 多巴胺系统基因对注意网络的调控作用. *心理科学*, 41(1), 24-30.
- 陈雪江, 朱燕辉(2010). 注意网络的神经机制. *中国医药指南*, 8(34), 44-46.
- 桂婷, 杨安民, 孙嘉伦, 等(2022). 线索有效性对社会性注意和外源性注意的影响. *生物化学与生物物理进展*, 49(3), 584-590.
- 荆秀娟, 王一峰(2015). 注意网络间的关系及其心理与生理机制. *心理科学进展*, 23(9), 1531-1539.
- 彭聃龄, 主编(2019). *普通心理学*(第五版). 北京师范大学出版社.
- 史新广, 冯文锋, 冯成志(2022). 不同神经活动类型大学生注意网络的差异及神经机制. *心理科学*, 45(2), 258-267.
- 唐晓雨, 王凌云, 张明(2012). 掩蔽线索引发的注意定向——易化和抑制. *应用心理学*, 18(3), 204-212, 248.
- 王钰辰, 陈奥博, 曹成龙, 等(2021). 事件相关电位技术在人脑注意网络研究中的应用进展. *中国临床神经外科杂志*, 26(12), 959-963.
- 王一楠, 宋耀武(2011). 内源性眼跳与注意转移关系研究述评. *心理与行为研究*, 9(2), 154-160.
- 吴越(2020). *注意网络偏侧化发育发展的研究*. 硕士学位论文, 合肥: 安徽医科大学.
- 杨青, 谢悦悦(2017). 儿童注意网络的发展特点. *中国健康心理学杂志*, 25(5), 797-800.
- 余芬芬, 曹晓华, 田学红, 等(2007). 注意转移准确性的眼动研究. 见 *第十一届全国心理学学术会议论文摘要集* (p. 244).
- 张立伟, 杨业兵, 赵宁, 等(2019). 睡眠剥夺对注意定向网络功能连接的影响. *空军医学杂志*, 35(2), 93-96.
- 赵晓月, 唐丹丹(2015). 冲突适应过程中的神经信息传递机制. *心理技术与应用*, (5), 10-19.
- Ben Azouz, O., Dellagi, L., Kebir, O., & Tabbane, K. (2009). Le concept d'attention [The Concept of Attention]. *La Tunisie medicale*, 87, 680-684.
- Bigler, E. D. (2014). Magnetic Resonance Imaging in the Evaluation of Cognitive Function. *Pediatric Blood & Cancer*, 61, 1724-1728. <https://doi.org/10.1002/pbc.25110>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and Communication*. Pergamon.
- Callejas, A., Lupiáñez, J., & Tudela, P. (2004). The Three Attentional Networks: On Their Independence and Interactions. *Brain and Cognition*, 54, 225-227. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.02.012>
- Capotosto, P., Sulpizio, V., Galati, G., & Baldassarre, A. (2023). Visuo-Spatial Attention and Semantic Memory Competition in the Parietal Cortex. *Scientific Reports*, 13, Article No. 6218. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33533-0>
- Carlisle N. B. (2019). Flexibility in Attentional Control: Multiple Sources and Suppression. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, 92, 103-113.
- 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>
- Casteau, S., & Smith, D. T. (2020). Covert Attention Beyond the Range of Eye-Movements: Evidence for a Dissociation between Exogenous and Endogenous Orienting. *Cortex*, *122*, 170-186. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.11.007>
- Ceh, S. M., Annerer-Walcher, S., Körner, C., Rominger, C., Kober, S. E., Fink, A. et al. (2020). Neurophysiological Indicators of Internal Attention: An Electroencephalography-Eye-Tracking Coregistration Study. *Brain and Behavior*, *10*, e01790. <https://doi.org/10.1002/brb3.1790>
- Cichy, R. M., & Oliva, A. (2020). A M/EEG-fMRI Fusion Primer: Resolving Human Brain Responses in Space and Time. *Neuron*, *107*, 772-781. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.07.001>
- Clarke, S., Farron, N., & Crottaz-Herbette, S. (2022). Choosing Sides: Impact of Prismatic Adaptation on the Lateralization of the Attentional System. *Frontiers in Psychology*, *13*, Article 909686. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.909686>
- Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The Reorienting System of the Human Brain: From Environment to Theory of Mind. *Neuron*, *58*, 306-324. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.04.017>
- de Souza Almeida, R., Faria Jr., A., & Klein, R. M. (2021). On the Origins and Evolution of the Attention Network Tests. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *126*, 560-572. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.028>
- Dehaene, S., & Changeux, J. (2011). Experimental and Theoretical Approaches to Conscious Processing. *Neuron*, *70*, 200-227. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.03.018>
- Fan, J., Gu, X., Guise, K. G., Liu, X., Fossella, J., Wang, H. et al. (2009). Testing the Behavioral Interaction and Integration of Attentional Networks. *Brain and Cognition*, *70*, 209-220. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.02.002>
- Fan, J., Kolster, R., Ghajar, J., Suh, M., Knight, R. T., Sarkar, R. et al. (2007). Response Anticipation and Response Conflict: An Event-Related Potential and Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *The Journal of Neuroscience*, *27*, 2272-2282. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3470-06.2007>
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the Efficiency and Independence of Attentional Networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *14*, 340-347. <https://doi.org/10.1162/089892902317361886>
- Federico, F., Marotta, A., Martella, D., & Casagrande, M. (2016). Development in Attention Functions and Social Processing: Evidence from the Attention Network Test. *British Journal of Developmental Psychology*, *35*, 169-185. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12154>
- Fiebelkorn, I. C., & Kastner, S. (2020). Functional Specialization in the Attention Network. *Annual Review of Psychology*, *71*, 221-249. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-103429>
- Francis, A. M., Bissonnette, J. N., Hull, K. M., Leckey, J., Pimer, L., Lawrence, M. A. et al. (2023). Measuring the Attention Networks and Quantitative-Electroencephalography Correlates of Attention in Depression. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, *333*, Article ID: 111661. <https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2023.111661>
- Galvao-Carmona, A., González-Rosa, J. J., Hidalgo-Muñoz, A. R., Páramo, D., Benítez, M. L., Izquierdo, G., & Vázquez-Marrufo, M. (2014). Disentangling the Attention Network Test: Behavioral, Event Related Potentials, and Neural Source Analyses. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, Article 813. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00813>
- Grace, A. A., Floresco, S. B., Goto, Y., & Lodge, D. J. (2007). Regulation of Firing of Dopaminergic Neurons and Control of Goal-Directed Behaviors. *Trends in Neurosciences*, *30*, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.03.003>
- Groom, M. J., & Cragg, L. (2015). Differential Modulation of the N2 and P3 Event-Related Potentials by Response Conflict and Inhibition. *Brain and Cognition*, *97*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.04.004>
- Grossberg, S. (2021). Attention: Multiple Types, Brain Resonances, Psychological Functions, and Conscious States. *Journal of Integrative Neuroscience*, *20*, 197-232. <https://doi.org/10.31083/j.jin.2021.01.406>
- Helfrich, R. F., & Knight, R. T. (2019). Cognitive Neurophysiology: Event-Related Potentials. *Handbook of Clinical Neurology*, *160*, 543-558. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64032-1.00036-9>
- Hudson, A. N., Hansen, D. A., Hinson, J. M., Whitney, P., Layton, M. E., DePriest, D. M. et al. (2020). Speed/Accuracy Trade-Off in the Effects of Acute Total Sleep Deprivation on a Sustained Attention and Response Inhibition Task. *Chronobiology International*, *37*, 1441-1444. <https://doi.org/10.1080/07420528.2020.1811718>
- Hunt, A. R., & Kingstone, A. (2003). Covert and Overt Voluntary Attention: Linked or Independent? *Cognitive Brain Research*, *18*, 102-105. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2003.08.006>
- Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2010). Repeated Measurement of the Components of Attention Using Two Versions of the Attention Network Test (ANT): Stability, Isolability, Robustness, and Reliability. *Journal of Neuroscience Methods*, *190*, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.04.019>
- Isreal, J. B., Chesney, G. L., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1980). P300 and Tracking Difficulty: Evidence for Multiple Resources in Dual-Task Performance. *Psychophysiology*, *17*, 259-273. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1980.tb00146.x>
- Jefferies, L. N., Enns, J. T., & Di Lollo, V. (2017). The Exogenous and Endogenous Control of Attentional Focusing.

- Psychological Research*, 83, 989-1006. <https://doi.org/10.1007/s00426-017-0918-y>
- Kam, J. W. Y., Helfrich, R. F., Solbakk, A., Endestad, T., Larsson, P. G., Lin, J. J. et al. (2020). Top-Down Attentional Modulation in Human Frontal Cortex: Differential Engagement during External and Internal Attention. *Cerebral Cortex*, 31, 873-883. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa262>
- Klinkenberg, I., Sambeth, A., & Blokland, A. (2011). Acetylcholine and Attention. *Behavioural Brain Research*, 221, 430-442. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.11.033>
- Kulke, L. V., Atkinson, J., & Braddick, O. (2016). Neural Differences between Covert and Overt Attention Studied Using EEG with Simultaneous Remote Eye Tracking. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, Article 592. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00592>
- Liu, Y., Bengson, J., Huang, H., Mangun, G. R., & Ding, M. (2014). Top-down Modulation of Neural Activity in Anticipatory Visual Attention: Control Mechanisms Revealed by Simultaneous EEG-fMRI. *Cerebral Cortex*, 26, 517-529. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu204>
- Lowet, E., Gomes, B., Srinivasan, K., Zhou, H., Schafer, R. J., & Desimone, R. (2018). Enhanced Neural Processing by Covert Attention Only during Microsaccades Directed toward the Attended Stimulus. *Neuron*, 99, 207-214.e3. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.05.041>
- MacLeod, J. W., Lawrence, M. A., McConnell, M. M., Eskes, G. A., Klein, R. M., & Shore, D. I. (2010). Appraising the ANT: Psychometric and Theoretical Considerations of the Attention Network Test. *Neuropsychology*, 24, 637-651. <https://doi.org/10.1037/a0019803>
- Markett, S., Nothdurfter, D., Focsa, A., Reuter, M., & Jawinski, P. (2021). Attention Networks and the Intrinsic Network Structure of the Human Brain. *Human Brain Mapping*, 43, 1431-1448. <https://doi.org/10.1002/hbm.25734>
- Minhas, A. S., & Oliver, R. (2022). Magnetic Resonance Imaging Basics. In R. Sadleir, & A. S. Minhas (Eds.), *Electrical Properties of Tissues* (pp. 47-82). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-03873-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03873-0_3)
- Moghadami, M., Moghimi, S., Moghimi, A., Malekzadeh, G. R., & Fadardi, J. S. (2020). The Investigation of Simultaneous EEG and Eye Tracking Characteristics during Fixation Task in Mild Alzheimer's Disease. *Clinical EEG and Neuroscience*, 52, 211-220. <https://doi.org/10.1177/1550059420932752>
- Mu, S., Wu, H., Zhang, J., & Chang, C. (2023). Subcortical Structural Covariance Predicts Symptoms in Children with Different Subtypes of ADHD. *Cerebral Cortex*, 33, 8849-8857. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad165>
- Naicker, P., Anoopkumar-Dukie, S., Grant, G. D., Neumann, D. L., & Kavanagh, J. J. (2016). Central Cholinergic Pathway Involvement in the Regulation of Pupil Diameter, Blink Rate and Cognitive Function. *Neuroscience*, 334, 180-190. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.08.009>
- Neuhaus, A. H., Karl, C., Hahn, E., Trempler, N. R., Opgen-Rhein, C., Urbanek, C. et al. (2011). Dissection of Early Bottom-Up and Top-Down Deficits during Visual Attention in Schizophrenia. *Clinical Neurophysiology*, 122, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.06.011>
- Nobre, A. C., & van Ede, F. (2023). Attention in Flux. *Neuron*, 111, 971-986. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.02.032>
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years after. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 73-89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Polich, J. (2007). Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2128-2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- Posner, M. I. (2014). Attentional Mechanisms. In *Encyclopedia of the Neurological Sciences* (pp. 314-319). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809324-5.04323-6>
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25-42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Pultsina, K. I., Alekhin, A. N., Petrova, E. V., & Vorobieva, N. V. (2022). Effektivnost' setei vnimaniya i vyrazhennost' pozitivnoi i negativnoi simptomatiki pri shizofrenii [Efficiency of the Attention Networks and Severity of Positive and Negative Symptoms in Schizophrenia]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*, 122, 88-96. <https://doi.org/10.17116/jnevro202212202188>
- Remington, R. W. (1980). Attention and Saccadic Eye Movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 6, 726-744. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.6.4.726>
- Roca, J., Crundall, D., Moreno-Ríos, S., Castro, C., & Lupiáñez, J. (2013). The Influence of Differences in the Functioning of the Neurocognitive Attentional Networks on Drivers' Performance. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 1193-1206. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.09.032>
- Roca, J., Fuentes, L. J., Marotta, A., López-Ramón, M., Castro, C., Lupiáñez, J. et al. (2012). The Effects of Sleep Deprivation on the Attentional Functions and Vigilance. *Acta Psychologica*, 140, 164-176.



- <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.03.007>
- Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P. et al. (2004). Development of Attentional Networks in Childhood. *Neuropsychologia*, *42*, 1029-1040. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.12.012>
- Ruiz, N. A., Thieu, M. K., & Aly, M. (2021). Cholinergic Modulation of Hippocampally Mediated Attention and Perception. *Behavioral Neuroscience*, *135*, 51-70. <https://doi.org/10.1037/bne0000405>
- Sadaghiani, S., & D'Esposito, M. (2014). Functional Characterization of the Cingulo-Opercular Network in the Maintenance of Tonic Alertness. *Cerebral Cortex*, *25*, 2763-2773. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu072>
- Sara, S. J., & Bouret, S. (2012). Orienting and Reorienting: The Locus Coeruleus Mediates Cognition through Arousal. *Neuron*, *76*, 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.09.011>
- Sarrias-Arrabal, E., Izquierdo-Ayuso, G., & Vázquez-Marrufo, M. (2023). Attentional Networks in Neurodegenerative Diseases: Anatomical and Functional Evidence from the Attention Network Test. *Neurología (English Edition)*, *38*, 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.nrleng.2020.05.022>
- Scharinger, C., Schüller, A., & Gerjets, P. (2020). Using Eye-Tracking and EEG to Study the Mental Processing Demands during Learning of Text-Picture Combinations. *International Journal of Psychophysiology*, *158*, 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.09.014>
- Seli, P., Cheyne, J. A., & Smilek, D. (2012). Attention Failures versus Misplaced Diligence: Separating Attention Lapses from Speed-Accuracy Trade-Offs. *Consciousness and Cognition*, *21*, 277-291. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.09.017>
- Smith, D. T., & Schenk, T. (2012). The Premotor Theory of Attention: Time to Move On? *Neuropsychologia*, *50*, 1104-1114. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.01.025>
- Thiele, A., & Bellgrove, M. A. (2018). Neuromodulation of Attention. *Neuron*, *97*, 769-785. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.01.008>
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*, *12*, 97-136. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90005-5)
- Valtakari, N. V., Hooge, I. T. C., Viktorsson, C., Nyström, P., Falck-Ytter, T., & Hessels, R. S. (2021). Eye Tracking in Human Interaction: Possibilities and Limitations. *Behavior Research Methods*, *53*, 1592-1608. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01517-x>
- Van Vleet, T. M., Chen, A., Vernon, A., Novakovic-Agopian, T., & D'Esposito, M. T. (2014). Tonic and Phasic Alertness Training: A Novel Treatment for Executive Control Dysfunction Following Mild Traumatic Brain Injury. *Neurocase*, *21*, 489-498. <https://doi.org/10.1080/13554794.2014.928329>
- Vázquez-Marrufo, M., Galvao-Carmona, A., González-Rosa, J. J., Hidalgo-Muñoz, A. R., Borges, M., Ruiz-Peña, J. L. et al. (2014). Neural Correlates of Alerting and Orienting Impairment in Multiple Sclerosis Patients. *PLOS ONE*, *9*, e97226. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097226>
- Vossel, S., Geng, J. J., & Fink, G. R. (2013). Dorsal and Ventral Attention Systems: Distinct Neural Circuits But Collaborative Roles. *The Neuroscientist*, *20*, 150-159. <https://doi.org/10.1177/1073858413494269>
- Wang, Y., Zhou, Y., Zhang, X., Wang, K., Chen, X., & Cheng, H. (2023). Orienting Network Impairment of Attention in Patients with Mild Traumatic Brain Injury. *Behavioural Brain Research*, *437*, Article ID: 114133. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2022.114133>
- Warbrick, T. (2022). Simultaneous EEG-fMRI: What Have We Learned and What Does the Future Hold? *Sensors*, *22*, Article 2262. <https://doi.org/10.3390/s22062262>
- Williams, R. S., Biel, A. L., Wegier, P., Lapp, L. K., Dyson, B. J., & Spaniol, J. (2016). Age Differences in the Attention Network Test: Evidence from Behavior and Event-Related Potentials. *Brain and Cognition*, *102*, 65-79. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.12.007>
- Wu, L., Chen, Y., Liu, X., Fang, P., Feng, T., Sun, K. et al. (2022). The Influence of Job Burnout on the Attention Ability of Army Soldiers and Officers: Evidence from Erp. *Frontiers in Neuroscience*, *16*, Article 992537. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.992537>
- Xuan, B., Mackie, M., Spagna, A., Wu, T., Tian, Y., Hof, P. R. et al. (2016). The Activation of Interactive Attentional Networks. *NeuroImage*, *129*, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.01.017>
- Yin, S., Liu, Y., & Ding, M. (2016). Amplitude of Sensorimotor Mu Rhythm Is Correlated with BOLD from Multiple Brain Regions: A Simultaneous EEG-fMRI Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, Article 364. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00364>
- Zheng, L., Yuan, S., Wu, X., & Sun, T. (2022). Conflict Adaptation Effect on Numerical Inductive Reasoning: An ERP Study. *Perceptual and Motor Skills*, *129*, 1658-1671. <https://doi.org/10.1177/00315125221121185>