

抑制、刷新、转换之间的关系：基于序列并行加工模型假说

田民基, 高鑫, 班吉敏, 韩思宇

西北师范大学心理学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年9月19日; 录用日期: 2024年10月25日; 发布日期: 2024年11月7日

摘要

执行功能是个体认知能力的核心, 决定高级心理功能的实现。并且执行功能训练已被广泛运用到情绪障碍个体的治疗康复、脑损伤个体的认知恢复、中小学生的认知能力训练等方面。理解执行功能的内部结构和运作机制对于研究个体认知过程具有重大意义。2000年, Miyake等提出了执行功能的分离联系模型, 自此以后关于执行功能的研究均建立在这一模型的基础上。但此模型并不能完全解释执行功能子功能之间的内部结构和运行机制, 使得我们难以解释执行功能训练产生迁移效果以及部分执行功能训练改善效果不显著的原因。为此, 文章通过对执行功能的子功能(抑制、刷新、转换)在信息相关电位、脑成像研究的基础上进行梳理, 对抑制、刷新、转换的关系进行探索, 根据认知加工的信息处理理论提出了执行功能的序列并行加工模型假说, 补充和完善Miyake的分离联系模型, 以便更好地理解执行功能子功能之间的内部关系以及作用机制。未来可以从收集fMRI、执行功能发展的年龄变化、子功能伴随比例的角度去进一步完善这一理论模型。

关键词

执行功能, 抑制, 刷新, 转换, 序列并行

The Relationship between Inhibition, Updating, and Shifting: Based on the Hypothesis of Sequential Parallel Processing Model

Minji Tian, Xin Gao, Jimin Ban, Siyu Han

School of Psychology, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu

Received: Sep. 19th, 2024; accepted: Oct. 25th, 2024; published: Nov. 7th, 2024

文章引用: 田民基, 高鑫, 班吉敏, 韩思宇(2024). 抑制、刷新、转换之间的关系: 基于序列并行加工模型假说. 心理学进展, 14(11), 53-65. DOI: 10.12677/ap.2024.1411764

Abstract

Executive function is the core of individual cognitive ability and determines the realization of advanced mental functions. Executive function training has been widely used in the treatment and rehabilitation of individuals with emotional disorders, the cognitive recovery of individuals with brain injuries, and the cognitive training of primary and secondary school children, etc. Comprehending the internal structure and operational mechanism of executive functions holds great significance for researching individual cognitive processes. In 2000, Miyake et al. put forward the dissociated and associated model of executive functions, and since then, studies on executive functions have all been based on this model. However, this model fails to fully elucidate the internal structure and operational mechanisms among the subfunctions of executive functions, making it challenging to explain the reasons for the transfer effects of executive function training and the insignificant improvement in some executive function training. For this reason, this paper, based on the studies of the subfunctions of executive functions (inhibition, updating, and shifting) in information-related potentials and brain imaging, explores the relationships between inhibition, updating, and shifting. According to the information processing theory of cognitive processing, a hypothesis of the sequential parallel processing model of executive functions is proposed to supplement and perfect Miyake's dissociated and associated model in order to better understand the internal relationships and functional mechanisms among the subfunctions of executive functions. In the future, this theoretical model can be further refined from the perspectives of collecting fMRI, age change in executive function development, and the proportion of subfunctions.

Keywords

Executive Function, Inhibition, Updating, Shifting, Sequence Parallel

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

执行功能是个体为了实现特定的目标,使用较高的认知能力来参与、指导和协调较低的认知过程的能力(Miyake et al., 2000; Zelazo, 2004)。执行功能决定高级心理功能的实现,对流体智力(韩燕,徐芬,2020; Anderson, 2017; De Stasio et al., 2014)、决策(Colautti et al., 2023; Dorman et al., 2022)、情绪(高鑫,刘蕊,2022; Pizzie et al., 2020)等方面有重要的影响。执行功能作为个体认知能力的核心,自被提出后便常用来标定个体的认知能力。在研究异常与正常个体认知能力时,均围绕个体的执行功能而展开。理解执行功能的内部结构和运作机制对于研究个体认知过程具有重大意义。Miyake 提出了执行功能的分离联系模型,即执行功能存在抑制、刷新、转换三个在形式上相互分离又在功能上相互联系的核心成分(Diamond, 2013; Miyake et al., 2000)。在此模型提出后,人们对执行功能的内部结构有了初步的认识,研究者在考察执行功能时,通常先分别测量抑制、刷新、转换,然后以三个子功能的总成绩来标定个体执行功能的水平(Damme et al., 2019; Engelhardt et al., 2019)。自这一模型提出后,关于执行功能的研究均建立在这一模型的基础上。

Miyake 所提出的执行功能分离联系模型虽然给研究者提供了一个研究执行功能与个体认知过程的视角,使人们对执行功能的内部结构有了初步认识,但这一理论模型并不完善,无法完全解释执行功能的

内部结构与运作机制。并且执行功能训练已被广泛运用到情绪障碍个体的治疗康复、脑损伤个体的认知恢复、中小学生的认知能力(学习、记忆、决策)训练等方面。了解执行功能的内部结构和运作机制有助于我们选择和编制更合适的认知训练方法去恢复和训练个体的认知能力。随着执行功能训练被广泛应用,一些研究发现,执行功能的训练及其迁移效果并不一致,一些执行功能训练并没有对个体产生改善效果(郭丽月等, 2018; 韩燕, 徐芬, 2020)。已有的理论难以解释这一现象的原因,因此我们需要一个新的理论模型补充 Miyake 的分离联系模型,解释执行功能的内部结构与运作机制,进而指导选择、编制执行功能训练,提高执行功能训练的训练效果。

认知的信息处理理论为研究执行功能内部结构及其作用机制提供了理论支持。该理论将人类的认知加工过程比作计算机的信息处理过程,主要包括输入(编码)、信息处理(存储)、输出三个序列阶段。这一理论解释了单一的认知加工过程(信息加工过程),可以很好地帮助研究者理解个体基础认知能力——执行功能的内部结构及其作用机制。并且随着事件相关电位、功能磁共振成像、近红外光频图谱分析等新技术被广泛应用于心理学研究中,为执行功能内部结构及其作用机制的研究提供了新的方法。本综述拟通过对执行功能的子功能的信息相关电位、脑成像的研究进行梳理,对抑制、刷新、转换的关系进行探索,根据认知加工的信息处理理论提出了执行功能的序列并行加工模型假说,补充和完善 Miyake 的分离联系模型,以便更好地理解执行功能子功能之间的内部关系以及作用机制。

2. 执行功能的分离联系模型

Miyake 借鉴 Baddeley 所提出的工作记忆的模型,通过对常用的执行功能测量范式进行潜变量分析,发现这些测量结果存在三个稳定的潜在维度。这三个维度在形式上彼此分离,但在作用上又存在较为紧密的联系,由此 Miyake 提出了执行功能的分离联系模型,即执行功能存在三个既分离又联系的核心子功能——抑制、刷新、转换。Miyake 发现,在一些研究中,不同被试在不同执行功能任务之间的表现存在一定的矛盾。例如,一些患者在 WCST 上表现很差,而在 TOH 上可能成绩较好,而另一些患者则可能表现出相反的情况,这表明执行功能可能不是完全单一的,它存在不同的有效成分。根据这一现象,不同研究者提出了不同的执行功能的结构模型。但在之后研究中发现,这些子功能并非完全独立。一些研究者发现,在完成特定的认知任务中,被试不可避免地需要使用一些其他的执行功能子成分来帮助完成这一认知任务,因此,执行功能的子功能并不能完全独立,它们在功能上相互联系(Miyake et al., 2000)。基于此, Miyake 通过对常用的执行功能任务进行潜变量分析,发现了执行功能存在三个稳定的子功能——抑制、刷新、转换。并由此提出了执行功能的分离转换模型。分离联系模型的提出使得后续研究者可以初步认识到执行功能的功能结构,并且在此之后关于执行功能的研究往往都基于这一模型而进行(Miyake et al., 2000)。

Best & Miller (2010)等人从发展的视角对儿童青少年的执行功能进行了评估与跟踪研究。通过对认知与神经生理的评估概述了儿童青少年抑制、刷新、转换三个子功能的发展与变化(Best & Miller, 2010)。Diamond (2013)详细概述了抑制、刷新、转换的发展过程、研究手段以及三者与流体智力、意志控制、注意分配的关系。并且从发展的角度对三者的关系进行了假设(Diamond, 2013)。Diamond 认为抑制和刷新出现时间最早,是相互支持的关系。相比之下,转换则出现最晚,转换功能是在抑制和刷新发展的基础上出现的,是更为复杂,更为高级的心理功能。Best 与 Diamond 等人的研究充实了 Miyake 所提出的执行功能分离联系模型。

3. 抑制、刷新、转换的研究现状

关于抑制、刷新、转换的研究存在一个不平衡的状况。相较于抑制和刷新而言,转换的研究较少且

起步较晚(黄挚靖, 李旭, 2021)。近些年来大量的研究者将目光投向转换。例如, Best 等人在研究儿童执行功能发展时发现, 转换功能相较于抑制和刷新功能在儿童执行功能发展过程中出现得更晚, 并且转换功能的出现是基于抑制和转换功能的发展(Best & Miller, 2010)。Kray 等人对 20 名多动症儿童进行转换训练, 结果发现转换训练提高了儿童的抑制能力和言语工作记忆能力(Kray et al., 2012)。任务转换训练可以降低个体的转换代价、提高其他认知任务的成绩, 有较好的迁移效果(王梓宇等, 2019)随着对转换功能的研究深入, 使得探究抑制、刷新、转换功能之间关系成为可能。

而对于 ERPs、fMRI 的研究给三者之间关系的研究提供了新视角。例如, 孙天义等(2011)采用任务转换范式探究可预测和不可预测条件下, 任务转换的 ERPs 证据, 结果发现, 在可预测条件下, 任务转换先后单独由颞区和顶区负责。在不可预测条件下, 任务转换则同时激活左侧额区和右侧额区(Xu et al., 2011)。许多研究发现 dlPFC (背外侧前额叶)在刷新功能起作用中有着重要影响(Chai et al., 2018; Demanet et al., 2016; León-Domínguez et al., 2015)。一项研究发现抑郁症患者与健康对照组相比, 与抑制功能高度相关的脑区(额下回、dlPFC 和 vlPFC)激活减少(Siegle et al., 2007)。

本综述旨在基于 Miyake 的分离联系模型的基础上根据信息处理理论提出序列并行加工模型, 用以解释执行功能, 抑制、刷新、转换之间的关系及其作用机制。此模型中, 序列是指执行功能各子功能存在一个作用顺序, 即抑制最先起作用, 抑制相较于其他两个子功能处于更为基础的地位, 执行功能的正常运作需要以抑制为作用基础, 抑制分心干扰, 确保任务相关信息可以进入认知加工过程(信息处理理论中的信息筛选输入阶段); 接下来是刷新, 刷新的实现需要以抑制为基础, 始终将注意放在新的任务刺激上, 接受新的刺激、抛弃旧的刺激(信息处理过程); 最终在抑制、刷新的基础上, 转换才得以实现, 进而支持个体完成认知任务(输出反应阶段); 并行是指在执行功能运作时, 执行功能各子功能起作用并不是简单的出现完成, 然后立刻消失, 而是以一种功能背景的形式存在, 支撑整个执行功能的运作, 促成个体完成复杂认知任务。因此在接下来的阐述中, 我们需要根据分离联系模型的框架, 抑制、刷新、转换三者脑成像的角度对序列并行加工模型理论进行论述。

3.1. 抑制

抑制是指在容量有限的认知系统中, 对与任务无关的内部或外部刺激进行控制的能力(Lemire-Rodger et al., 2019; Monnart et al., 2016) (输入编码阶段)。它可以停止正在加工的无关刺激, 控制无关刺激对任务的干扰(滕静等, 2018; Hasher & Zacks, 1988)。抑制在执行功能结构被提出后就得到很多研究者的关注, 在执行功能的三个子功能中也是研究最多的部分。根据对抑制的解释, 我们可以把认知加工过程中, 早期的信息筛选理解为一种抑制过程, 即在早期的信息筛选中, 我们需要抑制无关信息(分心刺激), 引导注意集中在任务上, 使得与任务相关的刺激进入认知加工过程。以往研究支持了这一观点, 有研究发现抑制任务与脑电的早期成分 N1、P1 有显著联系(Debruille et al., 2019; Pires et al., 2014; Rivera-Rodriguez et al., 2021)。Natale 认为在进行抑制任务时触发的 P1 成分可能代表了对刺激的视觉加工(Vázquez-Marrufo., 2021), 而 N1 成分则可能是与注意的定向有关的 ERP 成分(Natale et al., 2006)。从认知加工的过程来讲, N1、P1 可以被认为处于个体认知加工过程最早的阶段, 信息的筛选阶段(编码输入阶段)。Liu (2011)等人使用听觉双击任务研究了不同智力水平儿童的感觉门控加工能力, 使用由任务引发的 P50 的波幅作为个体感觉门控加工能力的脑电指标。P50 被证实与个体的抑制启动、强度有关(Liu et al., 2011)。

尽管已有研究表明, 抑制发生在认知加工的早期, 但也有研究发现 N2、P3、N450、LPC 也参与了抑制的加工(Ding et al., 2023; Pires et al., 2014)。与其他执行功能子成分相比, 在进行抑制任务时 N2 (主要是 N2b)、P3 (主要是 P3a) (Linnavalli et al., 2022)会有更高的波幅产生(Maguire et al., 2009)。N2、P3 反映的过程并不相同, N2 反映的是模式特异性且独立于运动加工的冲突过程, 而 P3 反映的是模态非特异性且

反映运动加工的抑制过程。这些成分主要与控制加工有关(Dimoska et al., 2006; Kok et al., 2004)。以往研究发现, N450、LPC 成分与语义抑制有关(Chang et al., 2022)。其中, N450 可能反映了对单词信息的抑制, 而 LPC 则反映了对单词的语义加工或知觉冲突(Pires et al., 2014)。抑制在 ERPs 的早期、中期、晚期均有排布, 这表明抑制并非是以一过式的形式运行, 而是以一种持续的方式进行运作。

综上所述, 抑制是一种出现在认知加工过程中最早期的执行功能成分, 在抑制进行运作后并非立即消失, 它会一直持续, 在认知加工的诸多阶段起作用, 抑制分心刺激, 使得注意可以持续保存在任务之上, 认知加工过程正常进行。

3.2. 刷新

刷新是指在复杂任务中不断刷新信息, 接受新信息, 抛弃旧信息以维持任务进行的能力(黄攀靖, 李旭, 2021; Castagna et al., 2019)(信息处理阶段)。Diamond (2013)提出: 抑制和刷新是执行功能中更为基础的成分, 也是执行功能发展中最早出现的成分。

3.2.1. 刷新晚于抑制出现的证据

Diamond 等人使用 A 非 B 实验对婴儿进行了测试, 发现婴儿在 4~7 个月时就开始了抑制和刷新的发展(Diamond, 1990; Diamond, 2013; Diamond, 2020), 同时, 抑制和刷新功能在功能上存在相互支持。

一方面, 抑制对刷新的支持。在处理多个事件或任务时, 个体必须能够抵制其他事件或任务的干扰, 将思维只专注于一件事情或任务之上。在进行一个全新的任务时, 个体需要抑制进行重复的、旧的思维模式, 以新的、创造性的方式重新组合观念和事实。当抑制失败时, 思维可能会游移不定, 注意难以维持在新任务上, 难以帮助刷新任务的运行。Roberts 等人研究发现, 酒精的滥用会导致个体抑制功能的损伤(Stock et al., 2023), 使得个体的注意力难以维持在任务上, 最终导致个体刷新任务成绩变差(Roberts et al., 2014)。有一些对焦虑人群进行的研究, 发现焦虑人群抑制能力的减弱使得焦虑人群调控优势反应的能力降低, 注意很难从威胁信息上脱离(郝爽等, 2018; Berggren & Derakshan, 2013), 从而导致个体刷新能力降低。

另一方面刷新对抑制的支持。在进行认知加工任务时, 个体必须始终将思维集中在任务目标上, 使得与任务相关的信息不断进入到加工过程。通过新信息的指导, 了解接下来的过程中, 哪些信息是与任务相关的, 哪些是需要抑制的。Moher 和 Egeth 采用简单的视觉搜索任务研究了反应抑制。在该任务中, 被试被提示一个分心物的颜色, 然后对目标刺激进行搜索。分心刺激的线索进入使得对目标的搜索成本增加(Moher & Egeth, 2012; Muhl-Richardson et al., 2022)。抑制的内容需要刷新的新内容来进行指导(Diamond, 2013), 大量研究表明工作记忆中的内容对个体的抑制任务有指导作用(Downing, 2000; Moher & Egeth, 2012)。但从 Diamond 的论述来看, 他只关注到了抑制和刷新意识层面的主动加工过程。而抑制不仅存在意识层面的加工过程, 还存在一部分无意识的自动加工过程(Collette et al., 2009)。与需要意识参与的有意抑制相比, 无意抑制更为迅速且出现时间更早(Pires et al., 2014)。

从以上论述来看, 抑制存在于有意加工和无意加工两个认知加工过程中, 而刷新只存在于意识加工过程中, 并且刷新的完成需要抑制的参与, 这可以表明抑制是早于刷新起作用的。并且在以往研究表明中, P3 可以很好地反应个体的刷新能力(Zhang et al., 2018), 这显然晚于可以代表个体抑制能力的 P2、N1、P50 (Liu et al., 2011; Rivera-Rodriguez et al., 2021)。

3.2.2. 刷新中并行有抑制的证据

赵鑫等人研究发现, 刷新训练效应导致被试的额叶 P300 波幅的增加、P200 波幅降低。P300 被认为反映了对信息进行刷新的能力(Rac-Lubashevsky & Kessler, 2019); P200 被认为反映了对不相关信息

进行抑制的能力(Zhao et al., 2013)。周仁来等研究者采用刷新任务,训练个体的流体智力,结果发现在 go/no go 任务中刷新任务训练导致 P200 的波幅降低,这意味着刷新训练提高个体流体智力的原因可能与个体抑制能力提高有关(Zhou & Sheng, 2018)。这种刷新训练后提高个体抑制水平的现象可能是由于刷新训练的任务中伴随有抑制成分所造成的。从认知加工过程而言,个体在进行刷新任务时需要不断地进行信息的筛选、抑制无关信息,使得与任务相关的信息可以进入认知加工过程中。抑制作为一个认知加工过程的门阀(Liu et al., 2011)存在,它的出现可以激活刷新功能;与此同时,刷新任务中亦伴随抑制,刷新任务的完成需要抑制功能的支撑。已有研究发现,老年人刷新功能的衰退与抑制功能的衰退有很大关系(Hedden & Park, 2001; Solesio-Jofre et al., 2012)。并且,刷新训练可以带来个体抑制功能的改善(Zhao et al., 2013; Zhou & Sheng, 2018)。因此,我们认为刷新中并行有抑制。

综上所述,在执行功能起作用的过程中,刷新功能出现晚于抑制,并且在进行刷新时,抑制并不会消失,抑制会以功能背景的形式支持刷新的完成。在认知加工过程中,刷新功能处于信息的整合处理的地位,需要不停地将新信息放入加工过程,提出旧信息。这意味着需要抑制不停地进行信息的筛选,直到认知任务的结束。

3.3. 转换

转换是指从一个认知任务或目标转换到另一个认知任务或目标上的过程(Collette & Van Der Linden, 2002; Spaniol & Danielsson, 2022)(输出阶段),转换功能的研究相较于抑制功能和刷新功能更少一些,这也是导致执行功能各子功能之间关系的研究较少的原因之一。

3.3.1. 转换晚于抑制、刷新的证据

Diamond 认为转换相较于抑制和刷新而言,转换功能是在个体拥有一定抑制能力和刷新能力之后,并在此基础上产生的更为高级且更为复杂的心理认知成分或心理认知过程(Best & Miller, 2010; Diamond, 2013)。也就是说,在个体认知发展过程中,转换是出现最晚的执行功能子功能。

Diamond、Best 等研究者认为,转换任务的完成,首先需要停止对之前任务的加工(抑制)、学习新任务的规则(刷新),使用新任务的规则指导个体抑制之前任务相关的信息和其他的任务无关信息进入认知加工过程,最终完成转换任务。从认知加工的角度来看,个体首先筛选了与任务相关的信息(抑制,输入编码阶段),对输入的信息进行了整理(刷新,信息整理阶段),最终完成了从当前任务转换到下一任务的心理过程(对已处理的信息进行了反应,输出阶段)。有研究者使用带线索的转换任务从 ERP 的角度研究了任务准备,他们将任务准备分为了两个阶段:任务目标激活阶段、任务规则激活阶段(De Baene & Brass, 2014)。这也为 Diamond、Best 等研究者的假设提供了证据。首先,与任务目标激活最为相关的 ERP 成分为早期的额叶成分 P2。这一成分被广泛认为与对无关任务的抑制有关(Wylie et al., 2009; Zhao et al., 2020)。在这一阶段,为激活任务目标,个体需要抑制与任务目标无关的信息,使得任务目标得以激活。其次,与在任务规则激活最为相关的 ERP 成分为晚期顶叶正成分 P3(主要为 P3b),而这一成分被广泛认为与刷新有关(Zhao et al., 2013)。新任务规则的激活可以被认为是一个刷新任务的过程:个体想要学习到新的任务规则首先需要抛弃之前的任务规则,使得新的任务规则可以进入到认知加工过程,最终完成新任务规则的激活。以往关于转换的研究中常使用 P3a、SPP (sustained parietal positivity, 持续性顶正性波)作为对转换功能的代表成分(Lange et al., 2016)。其中 P3a 被认为是转换功能的任务线索在脑电成分上的反映,实验中 P3a 被报告为对转换线索(即,该信号的出现表明规则必须被改变)和首次重复线索(该信号出现表明正确的规则已经被识别并且处于维持阶段)的反应增加。而 SPP 被普遍认为可以标识转换功能的发生(Jamadar et al., 2010; Karayanidis, 2010; Lavric et al., 2008)。但从对 P3a 的描述上来看,它似乎更像是一个

刷新成分,对规则信息进行认知的加工。而 SPP 波似乎相比于 P3a 更为纯粹,也更加具有代表性。作为晚期正成分的 SPP 要晚于抑制的代表成分 N1、P2、P50,刷新的代表成分 P3 出现。

3.3.2. 转换中并行有抑制和刷新的证据

在个体认知发展过程中,转换是出现最晚的执行功能子功能。Diamond 认为转换功能的实现需要抑制功能和刷新功能来支撑的,因此,我们可以认为转换任务实现过程中伴随有抑制和转换成分,并且转换功能是出现在抑制和刷新功能之后的执行功能子功能(Diamond, 2013)。

转换是指从一个认知任务或目标转换到另一个认知任务或目标上的过程。因此,个体在进行转换任务时,必须在大脑中抑制无关任务的激活,并保持当前任务的激活,以实现对新目标的激活(Garon et al., 2008)。从认知加工过程而言,转换功能确实是更复杂,更高级的心理过程,转换任务的完成本身就需要其他执行功能的成分参与(Karbach & Unger, 2014; Kiesel et al., 2010),例如注意的维持、任务设置的重构、刷新任务目标、对任务规则的选择加工和抑制等(Yeung et al., 2006)。以往研究发现,相较于刷新训练、抑制训练,转换训练会带来更多的迁移(Melby-Lervåg & Hulme, 2013; Shipstead et al., 2012),转换训练可以使得个体的抑制功能和刷新功能都得到一定程度的提升(王梓宇等, 2019)。宋倩等人对未服药的抑郁症患者进行了转换功能研究,发现这些抑郁症患者相较于对照组而言,其 P2、N2、P3、PSP 存在显著差异。这表明抑郁症患者对负性刺激存在转换功能受损,反映早期冲突抑制阶段(P2、N2)和后期任务准备阶段(P3、PSP)的脑电成分异常可能是抑郁症患者转换功能受损的电生理基础(宋倩等, 2023)。综上所述,转换功能中是伴随有抑制成分和刷新成分的。

此外,有研究表明,抑制涉及右外侧和上内侧前额叶、双侧顶下小叶、右中颞叶和右下颞叶以及腹侧视觉加工区域(Lemire-Rodger et al., 2019)。而刷新被证明与外侧前额叶皮层、顶下小叶、内侧后顶叶皮层、额极、眶额皮质有紧密的联系(Hong et al., 2022)。而转换功能则与更为广泛的脑区有联系,包括双侧背外侧前额叶、楔前叶、扣带回、上内侧额叶、右侧楔前叶、左侧顶下小叶、双侧颞叶外侧、右侧丘脑(Lemire-Rodger et al., 2019)。从任务激活的脑区来看,似乎抑制激活脑区少,刷新次之,而转换最多,并且有较大的重叠,这也为并行提供了脑成像学上的支持。

4. 序列并行加工模型

根据以上论述,本综述提出执行功能的序列并行加工模型,来解释执行功能的内部结构和作用机制。如图 1 所示,个体在进行复杂任务的加工过程中,需要执行功能的参与,执行功能在起作用时需要遵循以下的机制:

第一,在认知加工过程中,个体需要对信息进行筛选,抑制无关信息,确保与任务相关的信息可以进入到认知加工过程。抑制一直持续到整个认知任务的完成,确保无关信息不会干扰到当前任务,注意会一直保持在当前任务上。已有研究表明抑制任务与脑电的早期成分 N1、P1 有显著联系(Debruille et al., 2019; Pires et al., 2014; Rivera-Rodriguez et al., 2021)。Senn 等人研究发现,抑制和工作记忆相互关联并预测复杂任务表现(Best & Miller, 2010; Senn et al., 2004)。

第二,在抑制之后,刷新开始起作用。刷新主要出现在个体的意识层面,而抑制还有一部分存在于个体的无意识层面,这表明抑制是早于刷新存在的(Collette et al., 2009)。同时,刷新和抑制是一种伴随的关系,抑制是一个信息的门阀,先对信息进行初步的筛选,使得与任务相关的信息进入到认知加工过程中。然后,刷新开始对进入认知加工过程中的信息进行加工,将旧信息抛离认知加工过程,使得新信息进入认知加工过程中。刷新和抑制相互伴随一起支撑认知任务的完成。

第三,在抑制、刷新之后,转换最终开始作用。Diamond、Best 等研究者认为,转换任务的完成,首

先需要停止对之前任务的加工(抑制)、学习新任务的规则(刷新),使用新任务的规则指导个体抑制之前任务相关的信息和其他的任务无关信息进入认知加工过程,最终完成转换任务(Best & Miller, 2010; Diamond, 2013)。有研究者使用带线索的转换任务从 ERP 的角度研究了任务准备,他们将任务准备分为了两个阶段:任务目标激活阶段、任务规则激活阶段(De Baene & Brass, 2014),而这一研究与 Diamond、Best 的论述相似,并且提供了实证研究。转换训练可以使得个体的抑制功能和刷新功能都得到一定程度的提升(王梓宇等, 2019)。

综上所述,可以认为执行功能各子功能之间的关系是一个序列并行的关系,即在执行功能运作时,执行功能各子功能存在一个作用顺序——抑制最先起作用,接下来是刷新,最终在抑制、刷新的基础上,转换才得以实现,进而各子功能之间相互配合,支持个体完成认知任务(序列);执行功能各子功能起作用并不是简单地出现完成抑制、刷新、转换任务就立刻消失,而是以一种功能背景的形式存在,维持执行功能的整体运作,进而支撑复杂认知任务的完成(并行)。在执行功能任务中,抑制处于最基础的地位,任务复杂程度最低,因此反应时最短。刷新相较于抑制而言,任务复杂程度提升,因此反应时间相较于抑制更长。转换相较于抑制、刷新而言,任务复杂程度最高,因此反应时最长。(见图 1)

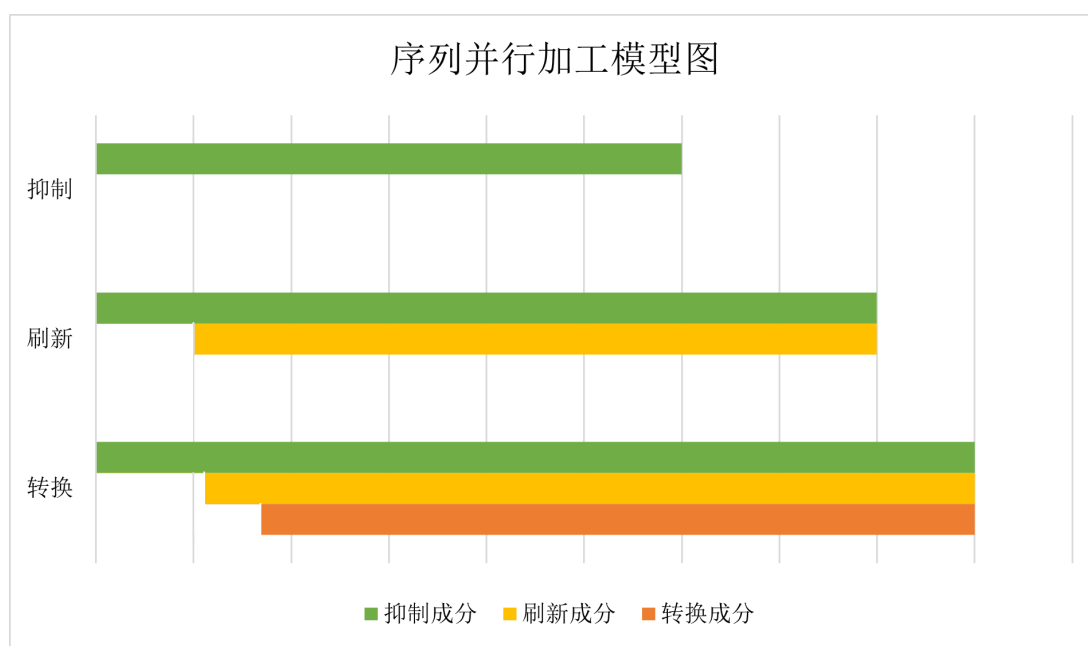


Figure 1. Diagram of the sequential parallel processing model

图 1. 序列并行加工模型图

5. 总结与展望

本文梳理了执行功能三个子成分——抑制、刷新、转换以及三者之间关系的研究,提出了关于执行功能的序列并行加工模型用以解释执行功能的内部关系以及作用机制。序列并行加工模型可以很好地帮助我们理解执行功能训练所带来的迁移效果以及为何部分执行功能训练效果并不明显。

序列并行加工理论认为,抑制、刷新、转换存在一个作用顺序,并且三者起作用并不是简单地出现完成抑制、刷新、转换任务就立刻消失,而是以一种功能背景的形式存在,维持执行功能的整体运作,支撑整个认知任务的完成。也就是转换任务的完成需要刷新和抑制的支持,刷新任务的完成需要抑制的支持。这解释了为什么抑制训练、刷新训练、转换训练会出现相互之间的训练迁移效果,但是,考虑到

伴随比例的问题,这种迁移效果可能有时显著,有时并不明显;将这种解释放在执行功能训练造成的其他高级认知功能的改善上也同样适用。以流体智力为例,已有研究发现刷新与流体智力存在部分脑区的共用(Santarnecchi et al., 2021),所以刷新训练可以很好地提高个体的流体智力。而抑制和转换训练对流体智力的改善存在争议,我们需要考虑抑制与转换训练对刷新功能所带来的改善,转换训练中包含刷新成分的比例问题。

执行功能常被用来研究、改善特殊人群的认知功能。以焦虑和抑郁为例,考虑执行功能的序列性可以帮助我们理解焦虑、抑郁为何会造成执行功能的全面损伤(Contreras-Osorio et al., 2022; Sun et al., 2023)。焦虑和抑郁个体存在对于负性情绪的认知偏好(彭顺等, 2019; Hou et al., 2021; Li et al., 2019),抑制作为执行功能中第一个起作用的成分,它在整个认知过程中起着信息筛选作用。结合认知资源有限理论,我们可以认为焦虑和抑郁个体的抑制功能不足以完全抑制负性情绪刺激,负性情绪刺激进入到认知加工过程中,消耗了大量的认知资源,导致进行刷新和转换认知资源不足,最终造成了焦虑、抑郁个体的执行功能损伤。从这一角度来考虑,可能在对焦虑或抑郁这些受情绪影响的个体进行执行功能的干预时,选择抑制训练就可以取得很好的效果。相比抑制训练,使用转换训练则效果可能并不理想,一方面,转换训练中伴随有抑制成分,转换训练本身就可以带来抑制功能的改善;另一方面,考虑到转换训练中抑制成分的比例问题,可能转换训练中的抑制成分有限,并不如单纯的抑制训练纯粹,带来抑制功能的改善有限,最终造成的执行功能的改善有限。

序列并行加工模型,这一理论仍有许多需要完善和进一步论述的地方。未来研究可以从以下几方面开展研究。

第一,补充相关的 fMRI 证据。本综述主要从事件相关电位的角度对模型进行论述,ERP 有较好的时间分辨率,可以很好地解释执行功能各子功能的序列性。但在并行性上,使用 ERP 成分就难以进行全面地解释。对于执行功能子功能的并行特点,我们需要考虑三者在工作态,脑区的重叠。fMRI 有较好的空间识别性。使用 fMRI 可以更为清晰地观察到认知任务中的脑区激活以及激活水平,通过对比三者的激活脑区可以更有力地解释三者之间的并行性。

第二,各项子功能的发展。在综述中也提到了执行功能各子功能在发展上存在一个时序性。本综述主要以脑成像的研究作为论述该模型的依据,更多的是从当下的认知加工过程来分析,这一模型可以解释发展成熟的成年人的执行功能特点。而青少年儿童发展并不成熟,执行功能子功能并未完全分化,这也导致青少年执行功能特点与成年人存在差异,因此未来需要从个体不同年龄段子功能的发展变化趋势来对三者之间的关系进行进一步的探索。

第三,伴随比例的问题。有研究发现,个体的刷新和抑制能力有着显著的相关,转换训练可以使个体刷新、抑制功能水平显著提高,但抑制、刷新训练则对转换功能提升不明显(王梓宇等, 2019)。这也提示我们需要考虑在一个转换任务中伴随有多大比例的刷新、抑制成分?刷新任务中有多大比例的抑制成分?我们可以考虑在任务态下,个体三种任务的脑区激活以及激活水平,以此数据为来考虑三者并行的比例问题。

致 谢

首先感谢我的论文指导老师高鑫老师的指导与帮助。从有一些想法,到逻辑的构建、文章的写作、语句的斟酌,每一步都离不开高老师的指导与帮助。一篇论文的出现真的很难,需要反复的论证,反复的修改,有时候甚至需要把已经构建好的内容推翻重来。数十次甚至上百次的修改才能最终完成一篇论文。其次感谢师姐们的帮助。在论文的论证过程中,韩思宇师姐帮助我重新梳理文章的脉络,提供一些写作的思路。并在文章投刊的过程中提供了帮助。最后感谢我的朋友梁伟松、卫伟杰、查云帆的鼓励与

支持。

参考文献

- 高鑫, 刘蕊(2022). 想象未来: 情景预见对跨期决策的影响机制. *应用心理学*, 28(4), 333-343.
- 郭丽月, 严超, 邓赐平(2018). 数学能力的改善: 针对工作记忆训练的元分析. *心理科学进展*, 26(9), 1576-1589.
- 韩燕, 徐芬(2020). 儿童青少年时期加工速度和执行功能在流体智力发展中的作用. *心理发展与教育*, 36(4), 394-405.
- 郝爽, 李萍, 王晓龙, 崔广伟, 何蔚祺(2018). 注意偏向训练对广泛性焦虑障碍负性情绪注意偏向的影响. *心理科学*, 41(4), 1003-1009.
- 黄挚靖, 李旭(2021). 抑郁症患者工作记忆内情绪刺激加工的特点及其机制. *心理科学进展*, 29(2), 252-267.
- 彭顺, 汪夏, 牛更枫, 张红坡, 胡祥恩(2019). 负面评价恐惧对社交焦虑的影响: 基于社交焦虑的认知行为模型. *心理发展与教育*, 35(1), 121-128.
- 宋倩, 郑凯莉, 丁紫夏, 杨会会, 罗兴伟, 蚁金瑶(2023). 首发未服药抑郁症患者对负性刺激转换功能受损的 ERPs 特征. *中国临床心理学杂志*, 31(1), 1-8, 15.
- 孙天义, 许远理, 郭春彦(2011). 任务转换的多脑区作用机制: 来自 ERP 的证据. *中国科学(生命科学)*, 41(11), 1121-1133.
- 滕静, 沈汪兵, 郝宁(2018). 认知控制在发散性思维中的作用. *心理科学进展*, 26(3), 411-422.
- 王梓宇, 孔子叶, 朱荣娟, 游旭群(2019). 任务转换训练和执行功能可塑性. *心理科学进展*, 27(10), 1667-1676.
- Anderson, M. (2017). Binet's Error: Developmental Change and Individual Differences in Intelligence Are Related to Different Mechanisms. *Journal of Intelligence*, 5, 24. <https://doi.org/10.3390/jintelligence5020024>
- Berggren, N., & Derakshan, N. (2013). Attentional Control Deficits in Trait Anxiety: Why You See Them and Why You Don't. *Biological Psychology*, 92, 440-446. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2012.03.007>
- Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A Developmental Perspective on Executive Function. *Child Development*, 81, 1641-1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Castagna, P. J., Calamia, M., Roye, S., Greening, S. G., & Davis, T. E. (2019). The Effects of Childhood Inattention and Anxiety on Executive Functioning: Inhibition, Updating, and Shifting. *ADHD Attention Deficit and Hyperactivity Disorders*, 11, 423-432. <https://doi.org/10.1007/s12402-019-00306-7>
- Chai, W. J., Abd Hamid, A. I., & Abdullah, J. M. (2018). Working Memory from the Psychological and Neurosciences Perspectives: A Review. *Frontiers in Psychology*, 9, Article 401. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00401>
- Chang, R., Wang, X., & Ding, J. (2022). Semantic Activation in Badminton Action Processing and Its Modulation by Action Duration: An ERP Study. *Brain Sciences*, 12, Article 1458. <https://doi.org/10.3390/brainsci12111458>
- Colautti, L., Iannello, P., Silveri, M. C., & Antonietti, A. (2023). Decision-Making under Ambiguity and Risk and Executive Functions in Parkinson's Disease Patients: A Scoping Review of the Studies Investigating the Iowa Gambling Task and the Game of Dice. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 23, 1225-1243. <https://doi.org/10.3758/s13415-023-01106-3>
- Collette, F., & Van der Linden, M. (2002). Brain Imaging of the Central Executive Component of Working Memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26, 105-125. [https://doi.org/10.1016/s0149-7634\(01\)00063-x](https://doi.org/10.1016/s0149-7634(01)00063-x)
- Collette, F., Germain, S., Hogge, M., & Van der Linden, M. (2009). Inhibitory Control of Memory in Normal Ageing: Dissociation between Impaired Intentional and Preserved Unintentional Processes. *Memory*, 17, 104-122. <https://doi.org/10.1080/09658210802574146>
- Contreras-Osorio, F., Ramirez-Campillo, R., Cerda-Vega, E., Campos-Jara, R., Martínez-Salazar, C., Reigal, R. E. et al. (2022). Effects of Physical Exercise on Executive Function in Adults with Depression: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, Article 15270. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215270>
- Damme, K. S. F., Kelley, N. J., Quinn, M. E., Glazer, J. E., Chat, I. K., Young, K. S. et al. (2019). Emotional Content Impacts How Executive Function Ability Relates to Willingness to Wait and to Work for Reward. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 19, 637-652. <https://doi.org/10.3758/s13415-019-00712-4>
- De Baene, W., & Brass, M. (2014). Dissociating Strategy-Dependent and Independent Components in Task Preparation. *Neuropsychologia*, 62, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.04.015>
- De Stasio, S., Fiorilli, C., & Di Chiacchio, C. (2014). Effects of Verbal Ability and Fluid Intelligence on Children's Emotion Understanding: Emotion Understanding. *International Journal of Psychology*, 49, 409-414.

- <https://doi.org/10.1002/ijop.12032>
- Debruille, J. B., Touzel, M., Segal, J., Snidal, C., & Renoult, L. (2019). A Central Component of the N1 Event-Related Brain Potential Could Index the Early and Automatic Inhibition of the Actions Systematically Activated by Objects. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 13, Article 95. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2019.00095>
- Demanet, J., Liefoghe, B., Hartstra, E., Wenke, D., De Houwer, J., & Brass, M. (2016). There Is More into ‘Doing’ than ‘Knowing’: The Function of the Right Inferior Frontal Sulcus Is Specific for Implementing versus Memorising Verbal Instructions. *NeuroImage*, 141, 350-356. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.07.059>
- Diamond, A. (1990). Developmental Time Course in Human Infants and Infant Monkeys, and the Neural Bases of, Inhibitory Control in Reaching. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 608, 637-676. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1990.tb48913.x>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. (2020). Executive Functions. *Handbook of Clinical Neurology*, 173, 225-240. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64150-2.00020-4>
- Dimoska, A., Johnstone, S. J., & Barry, R. J. (2006). The Auditory-Evoked N2 and P3 Components in the Stop-Signal Task: Indices of Inhibition, Response-Conflict or Error-Detection? *Brain and Cognition*, 62, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.03.011>
- Ding, X., He, L., Geng, X., Zhao, X., He, Z., & Zhang, X. (2023). Altered Electrophysiology Mechanism Related to Inhibitory Control in Adults with Insomnia. *Frontiers in Neurology*, 14, Article 1271264. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1271264>
- Dorman, D. B., Sampson, A. L., Sacré, P., Stuphorn, V., Niebur, E., & Sarma, S. V. (2022). Decomposing Executive Function into Distinct Processes Underlying Human Decision Making. In *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)* (pp. 807-811). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMBC48229.2022.9871849>
- Downing, P. E. (2000). Interactions between Visual Working Memory and Selective Attention. *Psychological Science*, 11, 467-473. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00290>
- Engelhardt, L. E., Harden, K. P., Tucker-Drob, E. M., & Church, J. A. (2019). The Neural Architecture of Executive Functions Is Established by Middle Childhood. *NeuroImage*, 185, 479-489. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.024>
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive Function in Preschoolers: A Review Using an Integrative Framework. *Psychological Bulletin*, 134, 31-60. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.1.31>
- Hasher, L., & Zacks, R. T. (1988). Working Memory, Comprehension, and Aging: A Review and a New View. *Psychology of Learning and Motivation*, 22, 193-225. [https://doi.org/10.1016/s0079-7421\(08\)60041-9](https://doi.org/10.1016/s0079-7421(08)60041-9)
- Hedden, T., & Park, D. (2001). Aging and Interference in Verbal Working Memory. *Psychology and Aging*, 16, 666-681. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.16.4.666>
- Hong, C. J., Cody, D., Zhu, Y., Chen, S. H., Zhang, Y. Y., Yuan, H., & Yang, D. (2022). Mindfulness Intervention Improves Executive Functions of Depressed Individuals and Their Neural Mechanism. *Chinese Science Bulletin*, 67, 1821-1836. <https://doi.org/10.1360/TB-2022-0054>
- Hou, J., Zhu, Y., & Fang, X. (2021). Mobile Phone Addiction and Depression: Multiple Mediating Effects of Social Anxiety and Attentional Bias to Negative Emotional Information. *Acta Psychologica Sinica*, 53, 362-373. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1041.2021.00362>
- Jamadar, S., Hughes, M., Fulham, W. R., Michie, P. T., & Karayanidis, F. (2010). The Spatial and Temporal Dynamics of Anticipatory Preparation and Response Inhibition in Task-Switching. *NeuroImage*, 51, 432-449. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.01.090>
- Karayanidis, F. (2010). Advance Preparation in Task-Switching: Converging Evidence from Behavioral, Brain Activation, and Model-Based Approaches. *Frontiers in Psychology*, 1, Article 25. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00025>
- Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive Control Training from Middle Childhood to Adolescence. *Frontiers in Psychology*, 5, Article 390. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00390>
- Kiesel, A., Steinhauser, M., Wendt, M., Falkenstein, M., Jost, K., Philipp, A. M. et al. (2010). Control and Interference in Task Switching—A Review. *Psychological Bulletin*, 136, 849-874. <https://doi.org/10.1037/a0019842>
- Kok, A., Ramautar, J. R., De Ruiter, M. B., Band, G. P. H., & Ridderinkhof, K. R. (2004). ERP Components Associated with Successful and Unsuccessful Stopping in a Stop-Signal Task. *Psychophysiology*, 41, 9-20. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8986.2003.00127.x>
- Kray, J., Karbach, J., Haenig, S., & Freitag, C. (2012). Can Task-Switching Training Enhance Executive Control Functioning

- in Children with Attention Deficit/Hyperactivity Disorder? *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, Article 180. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00180>
- Lange, F., Seer, C., Loens, S., Wegner, F., Schrader, C., Dressler, D. et al. (2016). Neural Mechanisms Underlying Cognitive Inflexibility in Parkinson's Disease. *Neuropsychologia*, 93, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.09.021>
- Lavric, A., Mizon, G. A., & Monsell, S. (2008). Neurophysiological Signature of Effective Anticipatory Task-Set Control: A Task-Switching Investigation. *European Journal of Neuroscience*, 28, 1016-1029. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06372.x>
- Lemire-Rodger, S., Lam, J., Viviano, J. D., Stevens, W. D., Spreng, R. N., & Turner, G. R. (2019). Inhibit, Switch, and Update: A Within-Subject fMRI Investigation of Executive Control. *Neuropsychologia*, 132, Article ID: 107134. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107134>
- León-Domínguez, U., Martín-Rodríguez, J. F., & León-Carrión, J. (2015). Executive N-Back Tasks for the Neuropsychological Assessment of Working Memory. *Behavioural Brain Research*, 292, 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.06.002>
- Li, H., Yang, X., Zheng, W., & Wang, C. (2019). Emotional Regulation Goals of Young Adults with Depression Inclination: An Event-Related Potential Study. *Acta Psychologica Sinica*, 51, 637-647. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1041.2019.00637>
- Linnavalli, T., Lahti, O., Törmänen, M., Tervaniemi, M., & Cowley, B. U. (2022). Children's Inhibition Skills Are Associated with Their P3a Latency—Results from an Exploratory Study. *Behavioral and Brain Functions*, 18, Article No. 13. <https://doi.org/10.1186/s12993-022-00202-7>
- Liu, T., Xiao, T., Shi, J., & Zhao, L. (2011). Sensory Gating, Inhibition Control and Child Intelligence: An Event-Related Potentials Study. *Neuroscience*, 189, 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2011.05.009>
- Maguire, M. J., Brier, M. R., Moore, P. S., Ferree, T. C., Ray, D., Mostofsky, S. et al. (2009). The Influence of Perceptual and Semantic Categorization on Inhibitory Processing as Measured by the N2-P3 Response. *Brain and Cognition*, 71, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.08.018>
- Melby-Lervåg, M., & Hulme, C. (2013). Is Working Memory Training Effective? A Meta-Analytic Review. *Developmental Psychology*, 49, 270-291. <https://doi.org/10.1037/a0028228>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Moher, J., & Egeth, H. E. (2012). The Ignoring Paradox: Cueing Distractor Features Leads First to Selection, Then to Inhibition of To-Be-Ignored Items. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74, 1590-1605. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0358-0>
- Monnart, A., Kornreich, C., Verbanck, P., & Campanella, S. (2016). Just Swap Out of Negative Vibes? Rumination and Inhibition Deficits in Major Depressive Disorder: Data from Event-Related Potentials Studies. *Frontiers in Psychology*, 7, Article 1019. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01019>
- Muhl-Richardson, A., Tortosa-Molina, M., Recio, S. A., Parker, M. G., & Davis, G. J. (2022). Attenuating the 'Attentional White Bear' Effect Enhances Suppressive Attention. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 84, 2444-2460. <https://doi.org/10.3758/s13414-022-02560-w>
- Natale, E., Marzi, C. A., Girelli, M., Pavone, E. F., & Pollmann, S. (2006). ERP and fMRI Correlates of Endogenous and Exogenous Focusing of Visual-Spatial Attention. *European Journal of Neuroscience*, 23, 2511-2521. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2006.04756.x>
- Pires, L., Leitão, J., Guerrini, C., & Simões, M. R. (2014). Event-Related Brain Potentials in the Study of Inhibition: Cognitive Control, Source Localization and Age-Related Modulations. *Neuropsychology Review*, 24, 461-490. <https://doi.org/10.1007/s11065-014-9275-4>
- Pizzie, R. G., Raman, N., & Kraemer, D. J. M. (2020). Math Anxiety and Executive Function: Neural Influences of Task Switching on Arithmetic Processing. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 20, 309-325. <https://doi.org/10.3758/s13415-020-00770-z>
- Rac-Lubashevsky, R., & Kessler, Y. (2019). Revisiting the Relationship between the P3b and Working Memory Updating. *Biological Psychology*, 148, Article ID: 107769. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2019.107769>
- Rivera-Rodriguez, A., Sherwood, M., Fitzroy, A. B., Sanders, L. D., & Dasgupta, N. (2021). Anger, Race, and the Neurocognition of Threat: Attention, Inhibition, and Error Processing during a Weapon Identification Task. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 6, Article No. 74. <https://doi.org/10.1186/s41235-021-00342-w>
- Roberts, W., Miller, M. A., Weafer, J., & Fillmore, M. T. (2014). Heavy Drinking and the Role of Inhibitory Control of Attention. *Experimental and Clinical Psychopharmacology*, 22, 133-140. <https://doi.org/10.1037/a0035317>

- Santaracchi, E., Momi, D., Mencarelli, L., Plessow, F., Saxena, S., Rossi, S. et al. (2021). Overlapping and Dissociable Brain Activations for Fluid Intelligence and Executive Functions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 21, 327-346. <https://doi.org/10.3758/s13415-021-00870-4>
- Senn, T. E., Espy, K. A., & Kaufmann, P. M. (2004). Using Path Analysis to Understand Executive Function Organization in Preschool Children. *Developmental Neuropsychology*, 26, 445-464. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_5
- Shipstead, Z., Redick, T. S., & Engle, R. W. (2012). Is Working Memory Training Effective? *Psychological Bulletin*, 138, 628-654. <https://doi.org/10.1037/a0027473>
- Siegle, G. J., Thompson, W., Carter, C. S., Steinhauer, S. R., & Thase, M. E. (2007). Increased Amygdala and Decreased Dorsolateral Prefrontal BOLD Responses in Unipolar Depression: Related and Independent Features. *Biological Psychiatry*, 61, 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.05.048>
- Solesio-Jofre, E., Lorenzo-Lopez, L., Gutierrez, R., Lopez-Frutos, J. M., Ruiz-Vargas, J. M., & Maestu, F. (2012). Age-Related Effects in Working Memory Recognition Modulated by Retroactive Interference. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 67, 565-572. <https://doi.org/10.1093/gerona/glr199>
- Spaniol, M., & Danielsson, H. (2022). A Meta-Analysis of the Executive Function Components Inhibition, Shifting, and Attention in Intellectual Disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, 66, 9-31. <https://doi.org/10.1111/jir.12878>
- Stock, A., Wendiggensen, P., Ghin, F., & Beste, C. (2023). Alcohol-Induced Deficits in Reactive Control of Response Selection and Inhibition Are Counteracted by a Seemingly Paradox Increase in Proactive Control. *Scientific Reports*, 13, Article No. 1097. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28012-5>
- Sun, J., Wang, S., Mu, G., Liu, J., Su, R., Zhang, X. et al. (2023). Symptoms of Depression and Anxiety in Chinese Adolescents: Heterogeneity and Associations with Executive Function. *BMC Psychiatry*, 23, Article No. 410. <https://doi.org/10.1186/s12888-023-04810-z>
- Vázquez-Marrufo, M., del Barco-Gavala, A., Galvao-Carmona, A., & Martín-Clemente, R. (2021). Reliability Analysis of Individual Visual P1 and N1 Maps Indicates the Heterogeneous Topographies Involved in Early Visual Processing among Human Subjects. *Behavioural Brain Research*, 397, Article ID: 112930. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112930>
- Wylie, G. R., Murray, M. M., Javitt, D. C., & Foxe, J. J. (2009). Distinct Neurophysiological Mechanisms Mediate Mixing Costs and Switch Costs. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 105-118. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21009>
- Xu, Y., Sun, T., & Guo, C. (2011). Functional Mechanism of Multiple Cerebral Cortices on Task Switching: An ERP Study. *Scientia Sinica Vitae*, 41, 1121-1133. <https://doi.org/10.1360/052011-490>
- Yeung, N., Nystrom, L. E., Aronson, J. A., & Cohen, J. D. (2006). Between-Task Competition and Cognitive Control in Task Switching. *The Journal of Neuroscience*, 26, 1429-1438. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3109-05.2006>
- Zelazo, P. D. (2004). The Development of Conscious Control in Childhood. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.11.001>
- Zhang, H., Chang, L., Chen, X., Ma, L., & Zhou, R. (2018). Working Memory Updating Training Improves Mathematics Performance in Middle School Students with Learning Difficulties. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, Article 154. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00154>
- Zhao, X., Wang, H., & Maes, J. H. R. (2020). Training and Transfer Effects of Extensive Task-Switching Training in Students. *Psychological Research*, 84, 389-403. <https://doi.org/10.1007/s00426-018-1059-7>
- Zhao, X., Zhou, R., & Fu, L. (2013). Working Memory Updating Function Training Influenced Brain Activity. *PLOS ONE*, 8, e71063. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071063>
- Zhou, R., & Sheng, A. (2018). Working Memory Updating Training Improves Children's Fluid Intelligence: An Evidence from ERPs. *International Journal of Psychophysiology*, 131, S179. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.07.470>