

唤醒水平变化对执行功能的影响及调节机制

李 琴¹, 陈小异¹, 蒋 军^{2*}

¹重庆师范大学教育科学学院, 重庆

²陆军军医大学(第三军医大学)医学心理系基础心理学教研室, 重庆

收稿日期: 2023年2月4日; 录用日期: 2023年3月8日; 发布日期: 2023年3月17日

摘 要

唤醒是生理和心理上的警觉或兴奋的一般状态。研究发现, 唤醒水平变化会对认知灵活性、工作记忆、抑制控制等执行功能产生差异化影响, 且影响效果受任务类型与复杂度、个体生理特征、气质类型等因素的调节。已有研究提出了唤醒假说、神经内分泌模型、注意假说, 来解释唤醒水平变化调节执行功能的作用机制。未来研究应明确统一抑制控制的结构以及弄清不同唤醒状态的本质, 拓展瑜伽、太极、跳绳、体操、游泳等不同体育锻炼形式的实验模型, 展开对比实验细致区分两个唤醒水平和三个唤醒水平的不同效应。

关键词

唤醒, 执行功能, 认知灵活性, 工作记忆, 抑制控制

The Effect of Arousal Level on Executive Function and Its Regulatory Mechanism

Qin Li¹, Xiaoyi Chen¹, Jun Jiang^{2*}

¹College of Educational Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing

²Department of Basic Psychology, School of Psychology, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing

Received: Feb. 4th, 2023; accepted: Mar. 8th, 2023; published: Mar. 17th, 2023

Abstract

Arousal is a general state of physical and psychological alertness or excitement. The study found

*通讯作者。

that the change of arousal level will have a differentiated impact on executive functions such as cognitive flexibility, working memory and inhibitory control, and the effect is regulated by task type and complexity, individual physiological characteristics, temperament type and other factors. Previous studies have proposed arousal hypothesis, neuroendocrine model and attention hypothesis to explain the mechanism of arousal level change regulating executive function. Future research should clarify the structure of unified inhibition control and the essence of different arousal states, expand the experimental models of different forms of physical exercise such as yoga, Tai Chi, rope skipping, gymnastics and swimming, carry out comparative experiments, and carefully distinguish the different effects of two arousal levels and three arousal levels.

Keywords

Arousal, Executive Function, Cognitive Flexibility, Working Memory, Inhibition Control

Copyright © 2023 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(Executive Function)是人类适应行为的核心,是运用注意力、计划或工作记忆等功能来调节自己的思想和行为以实现特定目标的过程,它主要包含三个子成分:认知灵活性、工作记忆、抑制控制(Ciria et al., 2021; Robison & Unsworth, 2019; Zhao et al., 2019)。已有研究发现,执行功能与蓝斑去甲肾上腺素(locus coeruleus-norepinephrine, LC-NE)系统的激活密切相关(Grueschow et al., 2020; Robison & Unsworth, 2019),而 LC-NE 系统的激活反映了唤醒水平的变化,因此,个体的唤醒水平与执行功能有着重要的联系。

神经生物学家将唤醒定义为动物表现出的自主运动激活以及对内部和外部刺激所做出的行为反应(Scammell et al., 2017),唤醒水平变化表现出渐进和非线性的特点(Ciria et al., 2021),是当前临床研究所关注的重点和难点。维持最佳唤醒水平是我们有效实现知觉、注意、思维、记忆等认知功能的基础。唤醒不足往往会导致认知功能的损害,比如记忆力下降、思维缓慢、警觉性降低等。较低的唤醒水平还会导致个体对环境刺激的条件反射变差,甚至可能会参与犯罪以将他们的唤醒提高到最佳水平(Choy et al., 2015)。神经影像研究表明 24 h 高唤醒可能是损害失眠症患者执行功能的重要因素,高唤醒通过影响脑功能连接以及神经内分泌进而损害失眠症患者的执行功能(刘红,王德玺,唐向东,2020)。因此,探究唤醒水平变化对执行功能的调节及作用机制,对身心疾病的预防、诊断和治疗和具有深远的意义,为临床实践和实证研究提供重要的参考。

唤醒波动可引起认知灵活性、工作记忆、抑制控制等执行功能的变化,尽管目前的研究还存在争议(Canales-Johnson et al., 2020; Han et al., 2013; Imbir, 2015),但大量的研究已表明唤醒不足或唤醒过度都会对这些功能产生不利影响(Blikstein et al., 2017; Choi et al., 2013; Ciria et al., 2021; Imbir, 2015; Robison & Brewer, 2020; Robison & Unsworth, 2019);而研究结果存在差异的原因可能与被试的生理特征、研究者所使用的任务类型以及任务的复杂程度等因素有关,也可能是考虑到唤醒水平变化对执行功能的调节机制不同。基于此,本文将从唤醒水平变化对认知灵活性、工作记忆、抑制控制三个方面的影响、调节机制、调控因素入手,综述唤醒水平变化对执行功能的调节。

2. 唤醒水平变化对执行功能的影响

目前, 唤醒水平变化对执行功能的调节多数集中在睡眠剥夺、睡眠障碍和昼夜节律的研究, 而在正常清醒波动中的研究较少。Yerkes & Dodson (1908)定律指出, 唤醒水平与认知表现之间呈倒 U 型曲线关系, 即中等程度的唤醒水平最利于认知表现, 唤醒不足和唤醒过度都会损害认知功能。然而, 近年来很多研究得出了不一致的结论, 为探讨唤醒水平变化对执行功能的调节提供了新的思路 and 看法。

2.1. 唤醒水平变化对认知灵活性的影响

认知灵活性是大脑使行为和思想适应新的、不断变化的或意外事件的能力, 它允许个体在刺激、反应和心理状态之间改变, 通过更新相关信息以及适当地调整日常行为来适应高度变化的环境(Ciria et al., 2021)。

有研究探讨了唤醒水平变化对认知灵活性的影响, 但研究结果并不完全一致。Ciria 等人(2021)让健康被试分别在低唤醒和高度唤醒的状态下实施了概率反转学习范式(probabilistic reversal learning), 研究唤醒水平对认知灵活性的调节。结果发现, 唤醒状态与受试者的任务表现有关, 与基线唤醒状态相比, 无论是在高唤醒状态还是低唤醒状态, 都会导致较差的任务表现。还有, Blikstein 等人(2017)让学生被试完成三项活动包括建一座塔、一座桥梁和一项自由任务, 三项活动均在物理模拟软件中进行。结果发现, 由于受到指令的影响, 处于高唤醒状态下的学生表现出较低的认知灵活性, 而处于放松状态下的学生则表现出更高的认知灵活性。但是, 有研究者在调查唤醒水平变化对幼儿认知灵活性的影响时, 得到的结果却有所不同。Ciugureanu (Ciugureanu, 2015)采用内部重复测量设计, 在低冲突和高冲突条件下, 调查 119 名 6 岁的儿童在无冲突和冲突阶段对威胁刺激(蛇)和中性刺激(鸟)的反应差异, 实验前儿童对两种刺激进行评分, 验证了蛇是威胁刺激可引起轻微唤醒, 而鸟不是威胁刺激因而唤醒程度较低。结果发现, 相对于中性刺激, 儿童对威胁刺激(轻度唤醒)的反应更准确, 并且随着唤醒程度的增加, 儿童的表现更差。然而, 在低冲突阶段, 相比于中性刺激, 儿童对威胁刺激的反应更慢; 在高冲突条件下, 儿童对刺激的反应时间差异并不显著, 因此不具有统计学意义。因此, 单纯研究唤醒程度对认知灵活性的影响, 影响效果大多符合倒 U 型定律, 但将其他因素纳入考量时, 研究结果就存在差异。

综合上述结果可知, 唤醒水平变化对认知灵活性的影响与倒 U 型定律有关, 即唤醒水平处于中等强度, 认知表现最佳。但也有部分研究的结果较不一致, 原因可能与研究的范式、受试者的年龄、气质类型、新鲜感和冲突条件等因素有关。在不同的规则、环境条件和冲突条件下, 注意力资源的分配方式可能会发生变化, 在这些情况下, 个体怎样发挥更大的执行功能还需进一步实验研究。还有, 关于认知灵活性的研究很少, 并且认知灵活性与工作记忆和抑制控制密切相关, 因此得出的研究结果是否与工作记忆和抑制控制相关还有待探讨。

2.2. 唤醒水平变化对工作记忆的影响

工作记忆是指在执行认知任务时, 可以暂时加工和贮存信息的容量有限的系统(Robison & Unsworth, 2019), 它是一种中枢神经认知加工资源, 参与大多数有意识的日常心理活动。

有研究表明, 低唤醒和高唤醒水平对工作记忆有阻碍作用。例如, Robison 和 Brewer (2020)使用瞳孔测量法检查了工作记忆能力与唤醒调节的个体差异, 探讨工作记忆能力和注意力缺失的个体差异是否可用低唤醒、过度唤醒和唤醒失调三种机制来解释。结果发现, 低唤醒和唤醒失调会导致较差的任务表现。这表明, 极端程度下的唤醒水平不利于执行工作记忆任务, Robison 和 Unsworth (2019)做出的解释是, LC-NE 系统失调, 唤醒水平往往是波动的, 过高和过低的唤醒水平都会导致注意力缺失, 并且不利于执行需要持续注意力的任务。工作记忆与前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)密切相关, 它对 LC-NE 系统释

放的去甲肾上腺素(norepinephrine, NE)特别敏感。类似地, Choi 等人(2013)调查了高、中、低三个层次的唤醒水平对 3-back 工作记忆任务表现的影响, 研究所用的材料为小组测试中选择的图片。在实验的所有阶段, 测量了皮肤电导水平。结果表明, 在中等唤醒水平条件下, 3-back 工作记忆任务的准确率最高, 其次是低唤醒和高唤醒水平, 反应时间没有显著差异。但是, Han 等人(2013)采用经典的 N-back 工作记忆任务($n = 1$ 或 3)探讨语音噪声的唤醒水平对工作记忆的影响。结果发现, 低唤醒条件下的记忆表现更好, 而高唤醒和中等唤醒条件下的记忆表现稍弱。

综上所述, 唤醒水平变化对工作记忆产生差异化影响, 任务类型、被试样本、测试的工具和时间差异都可能是研究结果不一致的原因。还有, 在探讨唤醒水平对工作记忆的影响时, 研究结果会不会受到不同的人工作记忆容量高低的影响尚不明确, 未来的研究应进一步深入探讨(Unsworth & Robison, 2017)。

2.3. 唤醒水平变化对抑制控制的影响

抑制控制是指迅速取消已计划或正在进行的行为的过程, 为了优化决策过程, 个体需要对无关的行为反应加以控制(Zhao et al., 2019)。

已有研究表明, 唤醒水平对抑制控制有较为显著的影响。Cudo 等人(2018)探讨了唤醒和接近动机对认知控制的积极影响, 使用 AX 持续性操作任务(AX-continuous performance task, AX-CPT)检查冲突抑制与反应抑制的变化。结果表明, 冲突抑制和反应抑制都受唤醒的调节。与低唤醒相比, 高唤醒降低冲突抑制并增加反应控制。Imbir (2015)选择了 135 个单词, 使用 9 分李克特自我情绪评定量表将单词分为高、中、低三个唤醒水平, 并将参与者随机分到不同的唤醒水平, 执行侧翼任务。此外, Imbir 还控制了单词的效价、长度、出现频率等。结果表明, 高唤醒和低唤醒水平都会对干扰抑制产生负面影响, 只有在中等唤醒水平下性能最佳。但是, Canales-Johnson 等人(2020)结合空间 stroop 任务与 EEG, 采用显微测量算法将唤醒水平区分为清醒和昏昏欲睡的状态, 研究受试者警觉性下降对冲突抑制的神经和行为的影响。结果表明, 相比与清醒状态, 被试在昏昏欲睡的状态下唤醒水平降低, 反应变慢, 但对冲突信息的反应仍然存在。在冲突抑制的解决过程中, 唤醒水平的正常波动并不会产生有害的负面影响。个体解决冲突抑制的能力有很大的差异, 已有神经生理学证据表明 LC-NE 唤醒系统的功能与解决冲突抑制的能力有关(Grueschow et al., 2020)。不难看出, 这些研究结论尚存在分歧, 原因可能是受到研究者所采用的实验范式、操纵唤醒水平的材料、个人解决冲突抑制能力的差异以及唤醒水平的层次等因素的调节。上述 Imbir 的实验模式中包含了高、中、低三个层次的唤醒水平, 相比很多研究中的两个层次的唤醒水平, Imbir 的研究结果可以为执行功能的激活机制提供新的线索。Ciria 等人(2021)指出, 高唤醒可能会在反应抑制方面加强行为控制。因此, 未来不仅应该探明抑制控制的几个基本过程所依赖的认知机制, 还应探明唤醒水平对抑制控制的作用机理。

综上所述, 未来的研究将有必要进一步解释不同认知能力的个体差异性质, 它们如何受到唤醒水平变化的影响以及在什么情况下唤醒调节会导致最佳的认知表现。此外, 虽然唤醒水平变化会影响个体的认知表现, 但是过量的认知负荷盖过唤醒效应时, 唤醒水平变化将如何影响执行功能还需进行深入研究。

3. 唤醒水平变化影响执行功能的调节机制

3.1. 唤醒假说

从唤醒假说的角度来分析唤醒水平变化对执行功能的影响。唤醒水平会随着不同刺激的变化而变化, 根据唤醒假说, 唤醒水平以倒 U 形关系影响问题的解决: 在中等唤醒水平时, 认知表现最佳, 并受到高低唤醒水平的阻碍(Yerkes & Dodson, 1908)。有研究者调查了健康被试受到唤醒调节后的认知状态变化, 使用瞳孔测定法验证了一个唤醒诱导程序, 并检验高唤醒状态是否影响上下文处理的两个核心领域的表

现。结果表明,在高唤醒状态下,无论是何种价态,内隐空间学习和序列学习都受到干扰(Maran et al., 2017)。唤醒水平变化影响执行功能的倒 U 型关系并非适用于所有研究,有部分研究在年龄、性别、研究范式等因素的调控下出现不完全一致的结果。Cerino 和 Sliwinski (2019)调查了高唤醒和低唤醒条件下的积极情绪与消极情绪对日常认知的影响。研究者采用处理速度和工作记忆任务,对 238 名老年人进行了每日四次的流动调查,一共 14 天。结果表明,低唤醒条件下,消极情绪与高于正常状态时较慢的处理速度有关,且这一效应在老年参与者中尤为显著。在工作记忆方面,只有在年龄较大的参与者中,高唤醒条件下的积极情绪与高于正常状态时工作记忆表现较差略微相关。

唤醒假说是根据实验后的结果进行确定,目前只能用于解释事后的结果,缺乏预测能力,这就是唤醒理论的局限所在。此外,最佳唤醒水平因人而异,某些特定人群在刺激感知、反应速度、自主唤醒、认知能力和生理特征等方面存在较大的差异,不同的实验研究选择的被试不同,最佳唤醒水平可能会发生更大的变化。

3.2. 神经内分泌模型

神经科学致力于探究唤醒控制机制,LC-NE 系统对于调节唤醒水平以实现最佳任务表现至关重要。蓝斑核(locus coeruleus, LC)包含合成 NE 的神经元,释放 NE 并作用于皮层神经网络,可发送弥漫性投射到中枢神经系统,NE 的释放与唤醒密切相关(van der Linden et al., 2021)。LC-NE 系统在唤醒、注意力和压力反应中起重要作用。已有研究表明,执行功能的性能与 LC-NE 系统和背内侧前额叶皮层(dorsomedial prefrontal cortex)以及背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex)之间的功能连接性有关(Grueschow et al., 2020)。因此,LC-NE 系统可调节个体唤醒状态从而对执行功能造成影响,唤醒不足和唤醒过度都会导致较差的认知表现,然而该系统如何与其他神经系统相互作用影响执行功能目前还不清楚,有待进一步探索。

除了 NE,多巴胺(Dopamine, DA)神经元的激活对于唤醒调控同样重要,最开始 DA 在唤醒调控中的作用较小,但是近年来,研究者发现来自腹侧被盖区的多巴胺能信号在不同的警觉状态下变化,并调节睡眠/唤醒状态的时间(Wisor, 2018)。众所周知,单一神经递质的系统并不能决定全部的大脑功能,5-羟色胺与 DA 的相互作用在疲劳与嗜睡的调节中具有重要的作用,与儿茶酚胺能投射神经支配下丘脑的区域,对行为的抑制有出色的表现(Meeusen et al., 2006)。

LC-NE 系统调节不同的功能,包括睡眠/唤醒状态、注意力和全身麻醉状态,而丘脑室旁核(paraventricular thalamus, PVT)是唤醒调节的关键丘脑区域,接收来自 LC 的密集酪氨酸羟化酶(tyrosine hydroxylase)输入(Ao et al., 2021)。PVT 可以通过其神经元活动促进唤醒,是睡眠/唤醒周期的一部分。虽然这些研究加深了我们对唤醒控制机制的理解,但是不同神经系统之间如何协同作用来进行唤醒调控,以及单个神经元在唤醒控制中是否能够独立作用还有待探究。

3.3. 注意假说

当个体不能在持续工作的环境条件下维持适度的唤醒水平时,注意力下降进而导致较差的认知表现。个体执行任务时,由于在任务重置或干扰抑制的过程中目标刺激会消耗可用注意资源,由于唤醒波动也会消耗注意资源,因此与执行功能有关的过程会受到更加明显的影响,比如抑制潜在反应的过程。Robison 和 Unsworth (2019)通过三个实验检查了工作记忆表现的波动以及任务诱发的瞳孔直径的相关变化。结果表明,当个体报告自己处于注意力不集中状态(例如走神)时,任务诱发的瞳孔扩张较浅,任务表现更差(即反应时间更长)。类似地,Robison 和 Brewer (2020)使用瞳孔测量法检查了工作记忆能力和唤醒调节的个体差异。结果发现,唤醒失调与更多的自我报告注意力失误相关,低唤醒或过度唤醒状态导致注意力下

降, 而认知任务需要一定程度的注意力控制才能很好地执行。有研究者做出假设: 执行功能要求有限的注意资源, 唤醒水平的变化会争夺一部分的注意资源, 因此唤醒波动会损害整体和任务转换的表现。结果表明, 唤醒波动影响任务转换, 但不影响整体表现, 可能是通过 LC-NE 系统的阶段性调节来强化先前执行的任务(Demanet et al., 2011)。除了唤醒水平对注意力的单独影响之外, 还有研究得出多种因素与注意力共同影响任务表现的结论。Zhang 等人(2019)在模拟监控任务的基础上, 对工作负荷、唤醒、疲劳和注意力进行主观评估。结果发现任务表现下降受专注度、唤醒波动、疲劳程度和工作量的影响。但是注意假说主要是在任务转换范式中研究的, 不同的研究范式是否会得出不一致的结果仍然是研究者们关注的课题, 这也是注意假说的一个局限性, 未来的研究应该更加深入和全面地了解注意假说的适用范围。

总而言之, 上述理论分别从不同的角度阐述了唤醒水平变化对执行功能的影响, 但当前没有哪一种理论假说能完美解释所有的影响, 既有优点也存在局限性。比如, 唤醒假说目前只能解释事后的结果, 缺乏预测能力。因此, 在未来的研究可以结合脑科学技术、神经成像技术等, 不仅对现有的理论假说谈及的作用机制进行验证, 增强其可信度, 还要从多个方面寻找更有说服力的理论基础或解释框架。

4. 影响唤醒水平变化对执行功能调控的因素

4.1. 任务类型与复杂度

由于任务类型的不同, 唤醒水平变化对执行功能的影响程度并非完全一致。对于不同复杂度的认知任务来说, 唤醒水平变化与执行功能之间的关系呈不同的趋势。Keith 等人(2019)调查了噪音对自闭症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)认知能力的影响, 同时测量了交感神经反应。研究者让患有和不患有 ASD 的青少年在 2×2 噪声和不同任务难度的实验操作下完成了视觉呈现的跨度任务。结果证实, 噪声对任务绩效的影响取决于任务难度: 所有参与者在较容易的条件下表现较好, 而在与噪声有关的困难条件下表现稍差。唤醒水平和认知表现不一定总是线性的, 在较容易的任务中, 唤醒水平的提高有利于任务表现; 在较复杂的任务中, 唤醒水平的提高只能在一定程度上促进认知表现, 超过一定程度则是有害的(Bray et al., 2015)。

任务类型和复杂性程度的不同会导致研究结果的不一致, 但也可能是因为完成这些认知任务所关联的神经元不同, 例如唤醒系统通过前额皮层的兴奋对工作记忆产生重要的影响。

4.2. 受试者生理特征

唤醒水平对个体认知表现的影响程度在不同的年龄群体中存在显著的差异。已有研究表明, 年轻人和老年人之间的唤醒状态与 PFC 活动存在差异, 特别是年轻人在运动后表现出唤醒水平的增加, 而老年人则倾向于表现出 PFC 活动的增加(Fujihara et al., 2021)。处于退化阶段的老年人, 与年龄有关的 LC-NE 系统功能下降, 因此有研究者预测老年人的唤醒和决策行为之间的关联性降低。研究者采用瞳孔测量法作为衡量唤醒程度的指标, 探讨健康的年轻被试和老年被试的唤醒和风险选择之间的关系。结果发现, 在年轻被试中, 较高的唤醒水平与较短的反应时间有关(Sullivan et al., 2021)。在一项功能磁共振成像研究中, 研究者通过 LC-NE 系统比较唤醒是否会提高年轻人和老年人对明显的目标刺激的注意力, 结果表明, 相比老年人, 唤醒会增强年轻人对明显目标刺激的处理能力(Lee et al., 2018)。另外, 执行衰退假说(executive decline hypothesis of cognitive aging)认为额叶功能与执行功能密切相关, 随着年龄的增长, 额叶功能会逐渐减弱, 影响老年人的感觉、知觉、思维、记忆等认知功能。因此, 唤醒水平的变化对执行功能的调节会受到年龄因素的影响, 不同年龄阶段的人的唤醒阈值、认知老化等因素会导致研究出现不一致的结果。

性别差异可能也是影响唤醒水平变化对执行功能调节的因素之一。Bangasser 等人(2016)回顾相关临

床研究并梳理 LC-NE 系统与性别差异之间的联系,发现雌激素和应激是影响 LC-NE 系统的重要因素,在一定条件下女性对高唤醒状态的易感性显著高于男性,雌激素可以促进 NE 的合成,减少 NE 的降解,LC 靶区 NE 的增加可能会导致女性的唤醒。此外,女性的 LC-NE 系统比男性更容易受到压力刺激而产生兴奋,释放更多的 NE,这也会影响唤醒水平变化对执行功能的调节(Bangasser et al., 2019)。

4.3. 其他因素

除了上述情况,个体的气质类型也会影响唤醒水平变化对执行功能的调节,内外向气质有不同的大脑皮层激活水平,外向者的激活水平较低,而内向者的激活水平较高。因此,为了达到最佳的唤醒水平,外向的人通过寻求刺激来提高唤醒水平,较之于外向者,内向的人避免刺激。在一项调查中,在咖啡因可以提高唤醒水平的背景下,研究者采用稳定性、操纵性和运动性任务,调查咖啡因对外向和内向的大学生执行这些任务时的影响。42 名被试在实验之前摄入了咖啡因和安慰剂,采用双盲研究,两天完成了三项任务。结果发现,咖啡因或安慰剂都能对外向者产生相同的作用,而性格内向的人比性格外向的人更容易察觉摄入了咖啡因还是安慰剂(Gomes et al., 2021)。同样地,Hoermann 等人(2016)探讨了睡眠剥夺对个体认知和精神运动能力影响的脆弱性是否与人格特征有关的问题。结果表明,内向者生理唤醒水平较高,因此不需要太多的外部刺激来完成的任务,这一点也符合艾森克的人格理论。虽然很多研究结果表明外向者的唤醒水平更低,但是也有研究发现了不一致的结果。例如,在一项 60 分钟的警觉任务中,研究者发现外向者在执行任务时会投入比内向者更多的努力,并且也没有得到外向者唤醒水平更低的结果(Shaw et al., 2016)。因此,外向者和内向者表现出差异唤醒效应还需要考虑个体的努力程度、研究范式、刺激类型等因素,未来的研究可以进一步深入探讨。

综上所述,唤醒水平变化对执行功能的作用会受到任务类型与复杂程度的影响,同时也与受试者的年龄、性别和气质类型等因素有关。未来的研究需要更加深入探索影响唤醒水平变化作用执行功能的其他因素。醒水平变化在调节、促进或阻碍某些认知过程以及对内外部刺激的反应中至关重要(Canales-Johnson et al., 2020; Noreika et al., 2020)。从主观评定问卷到显微测量算法等一系列方法体现了唤醒水平测量技术的进步。但是仍然存在一些不足之处,未来可以从以下几个地方进行深入探索:第一,目前很多研究仅仅采用主观问卷或是客观测量方法的一种来测量唤醒水平,但是这种单一的测量方式并不能全面反映个体的唤醒水平变化。未来可以结合自主报告、显微测量算法、PVT、EEG、瞳孔扩张、心电、肌电等多种方式进行测量(Duffy, 1957; Koelstra, 2012)。第二,现有的研究将唤醒与心理、生理、情绪等多个层面联系起来(Satpute et al., 2019),使得唤醒的内涵有了一定的变化。由于定义的不同导致研究者在选取测量工具时更为谨慎,因此厘清唤醒含义具有重要价值。第三,显微测量算法相比自主报告、PVT、生理测量等方法,能客观测量唤醒水平的微小变化。然而该算法只能在闭眼情况下进行(Jagannathan et al., 2018),因此,未来可以开发出能在睁眼条件下使用的经济有效的算法。

5. 总结与展望

通过归纳唤醒水平变化对执行功能的影响效果、调节机制、调节变量,证明唤醒水平变化会对执行功能的表现造成一定的影响。已有研究表明,唤醒水平以倒 U 形关系影响执行功能,中等唤醒水平时达到最佳的任务表现,唤醒不足或唤醒过度都会导致较差的表现。但是,有研究者得出了不一致的结论,而任务类型与复杂度、个体生理特征、气质类型等因素都会影响唤醒水平变化对执行功能的作用,因此不同程度的唤醒水平对执行功能究竟是促进还是损害以及这种损害是否具有可逆性,是否会随着唤醒水平的改善而改善仍有待于研究考证。这些研究不仅加深了我们对唤醒水平与执行功能之间关系的了解,而且拓展了我们对唤醒水平变化调节执行功能局限的认识。由于已有的研究仍然存在一些不足,未来可

以从以下一些方面进行深入探索:

第一, 在抑制控制的结构方面, 唤醒水平变化对抑制控制的研究相对较少, 并且没有统一抑制控制的结构。部分研究者将抑制控制作为单一简单的结构进行研究, 然而, Brydges 等人(2012)结合混合 Go/Nogo 侧翼任务与 EEG 数据证明了抑制控制可分离为反应抑制和冲突抑制, Diamond (2013)也将抑制控制分为反应抑制和冲突抑制。由于以往研究未将抑制控制的结构进行统一, 导致得出的研究结论很难进行比较。有研究者使用 AX-CPT 任务测量抑制控制的冲突抑制和反应抑制(Cudo et al., 2018), AX-CPT 任务可以解决个体注意力在其他任务上分配不均的问题, 因此能够很好分离抑制控制中的反应抑制和冲突抑制。事实上, 两种抑制成分可由不同的研究范式进行测量。Go/No-go 和 Stop signal 任务是测量反应抑制的广泛措施, 冲突抑制主要是由 Stroop 和 Simon 任务进行测量(Diamond, 2013; Schevernels et al., 2015)。因此, 未来的研究应该在控制唤醒水平的条件下, 将事件相关电位技术或功能性磁共振成像技术与行为测量相结合, 分别用实验验证唤醒水平对抑制控制的不同成分的调节。

第二, 在实验模型方面, 一般采用的是嗜睡、困倦模型以及骑自行车、跑步等体育锻炼作为研究唤醒水平变化作用执行功能的模型, 但这些模型还存在一些方法和技术上的问题, 比如跑步时, 接近和超过无氧阈的强度会损害认知能力(Ciria et al., 2021)。未来的研究在技术方面可以采用现代认知神经科学技术、脑成像技术进行研究。另外, 选择体育锻炼的模型时, 有研究表明, 相比跑步, 瑜伽对执行功能的影响效果更好(Neha et al., 2013)。因此, 可以增加瑜伽、太极、跳绳、体操、游泳等不同于跑步、骑自行车的形式进一步探讨唤醒水平变化对执行功能的调节。在理论模型方面, 朝着高唤醒状态的渐进生理转变的理论模型相对较少(Berridge & Arnsten, 2013), 唤醒水平超过一定程度时, 神经、内分泌等方面如何变化, 以及有无理论框架对这些变化进行细致的区分仍不清楚, 因此未来需要拓展与此有关的理论模型。

第三, 在唤醒状态的界定方面, 轻度镇静、嗜睡、昏昏欲睡、困倦和疲劳等术语其实是不同的, 但是很多研究者并没有意识到这些唤醒状态的复杂性和异质性, 只是简单的将它们区分为低、中、高唤醒水平, 并且测量工具适用的范围不同, 因此也增加了测量的难度。比如困倦是清醒和轻度睡眠之间的意识过渡阶段, 会损害处理冲突信息的能力、注意力表现和感知决策, 但并不意味着无意识, 并且预注意和早期自下而上的注意加工仍然可以完成(Lee et al., 2017; Srivas et al., 2016)。目前的研究并未仔细区分这些唤醒状态, 那么研究结果存在的争议可能会阻碍将来唤醒水平变化调节执行功能的研究, 未来可以设计实验研究对嗜睡、昏昏欲睡、困倦、镇静、轻度镇静、兴奋等唤醒状态进行细致的区分。

第四, 在实验设计方面, 唤醒水平包括低、中、高三个层次, 但是很多研究中只探讨了两个层次的唤醒水平对认知功能的影响, 这得到的结果可能与三个层次的唤醒水平的研究有差异(Imbir, 2015)。还有, 如果研究只采用两个层次的唤醒水平, 那么采用哪两个层次的唤醒水平所得到的结果会更有意义? 另外, Ciria 等人(2021)的研究从清醒到睡眠过渡的设计模式内生性地控制了唤醒水平, 但尚未有研究详细说明低、高或者低、中唤醒水平的实验是否也可采取同样的实验顺序。未来应进一步对比两个、三个唤醒水平层次以及不同实验顺序的潜在效应, 根据研究目的设计更严格的实验程序来更深入地了解唤醒水平变化对执行功能的影响。此外, 值得注意的是, 大多数研究采用 Go/No-go、Stop signal 和 N-back 等经典的研究范式探讨唤醒水平变化对执行功能的影响, 这些横断性研究并不能直接得出唤醒水平变化和执行功能之间有因果关系, 只能揭示相关关系。横断研究结论上的差异可能来源于个体生理因素上的差异或研究范式等其他因素。因此, 未来研究可以采用纵向研究设计来考察唤醒水平变化对执行功能的影响。

参考文献

- 刘红, 王德玺, 唐向东(2020). 失眠症患者的执行功能. *中华行为医学与脑科学杂志*, 29(7), 666-670.
- Ao, Y. W., Yang, B., Zhang, C. J., Wu, B., Zhang, X. F., Xing, D., & Xu, H. B. (2021). Locus Coeruleus to Paraventricular

- Thalamus Projections Facilitate Emergence from Isoflurane Anesthesia in Mice. *Frontiers in Pharmacology*, 12, Article ID: 643172. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643172>
- Bangasser, D. A., Eck, S. R., & Sanchez, E. O. (2019). Sex Differences in Stress Reactivity in Arousal and Attention Systems. *Neuropsychopharmacology*, 44, 129-139. <https://doi.org/10.1038/s41386-018-0137-2>
- Bangasser, D. A., Wiersielis, K. R., & Khantsis, S. (2016). Sex Differences in the Locus Coeruleus-Norepinephrine System and Its Regulation by Stress. *Brain Research*, 1641, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.11.021>
- Berridge, C. W., & Arnsten, A. F. T. (2013). Psychostimulants and Motivated Behavior: Arousal and Cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37, 1976-1984. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.11.005>
- Blikstein, P., Gomes, J. S., Akiba, H. T., & Schneider, B. (2017). The Effect of Highly Scaffolded versus General Instruction on Students' Exploratory Behavior and Arousal. *Technology, Knowledge and Learning*, 22, 105-128. <https://doi.org/10.1007/s10758-016-9291-y>
- Bray, E. E., Maclean, E. L., & Hare, B. A. (2015). Increasing Arousal Enhances Inhibitory Control in Calm but Not Excitable Dogs. *Animal Cognition*, 18, 1317-1329. <https://doi.org/10.1007/s10071-015-0901-1>
- Brydges, C. R., Clunies-Ross, K., Clohessy, M., Lo, Z. L., Nguyen, A., Rousset, C., & Fox, A. M. (2012). Dissociable Components of Cognitive Control: An Event-Related Potential (ERP) Study of Response Inhibition and Interference Suppression. *PLOS ONE*, 7, e34482. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034482>
- Canales-Johnson, A., Beerendonk, L., Blain, S., Kitaoka, S., Ezquerro-Nassar, A., Nuiten, S., & Bekinschtein, T. A. (2020). Decreased Alertness Reconfigures Cognitive Control Networks. *Journal of Neuroscience*, 40, 7142-7154. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0343-20.2020>
- Cerino, E., & Sliwinski, M. (2019). Ecological Momentary Assessment of Associations among High and Low Arousal Affect and Cognitive Health. *Innovation in Aging*, 3, S963. <https://doi.org/10.1093/geroni/igz038.3491>
- Choi, M.-H., Min, Y.-K., Kim, H.-S., Kim, J.-H., Yeon, H.-W., Choi, J.-S., & Chung, S.-C. (2013). Effects of Three Levels of Arousal on 3-Back Working Memory Task Performance. *Cognitive Neuroscience*, 4, 1-6. <https://doi.org/10.1080/17588928.2011.634064>
- Choy, O., Farrington, D. P., & Raine, A. (2015). The Need to Incorporate Autonomic Arousal in Developmental and Life-Course Research and Theories. *Journal of Developmental and Life-Course Criminology*, 1, 189-207. <https://doi.org/10.1007/s40865-015-0011-4>
- Ciria, L. F., Suárez-Pinilla, M., Williams, A. G., Jagannathan, S. R., Sanabria, D., & Bekinschtein, T. A. (2021). Different Underlying Mechanisms for High and Low Arousal in Probabilistic Learning in Humans. *Cortex*, 143, 180-194. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.07.002>
- Ciugureanu, E. (2015). *Cognitive Flexibility in Young Children: The Impact of Arousal and Temperament*. Thesis, University of Northern British Columbia.
- Cudo, A., Francuz, P., Augustynowicz, P., & Stozak, P. (2018). The Effects of Arousal and Approach Motivated Positive Affect on Cognitive Control. An ERP Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, Article No. 320. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00320>
- Demanet, J., Liefooghe, B., & Verbruggen, F. (2011). Valence, Arousal, and Cognitive Control: A Voluntary Task-Switching Study. *Frontiers in Psychology*, 2, Article No. 336. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00336>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Duffy, E. (1957). The Psychological Significance of the Concept of "Arousal" or "Activation". *Psychological Review*, 64, 265. <https://doi.org/10.1037/h0048837>
- Fujihara, H., Megumi, A., & Yasumura, A. (2021). The Acute Effect of Moderate-Intensity Exercise on Inhibitory Control and Activation of Prefrontal Cortex in Younger and Older Adults. *Experimental Brain Research*, 239, 1765-1778. <https://doi.org/10.1007/s00221-021-06086-9>
- Gomes, A. C., Tosini, L., Oliveira, D., Lage, G., Franchini, E., & Meira, C. (2021). Caffeine Produces Neutral Effects on Extraverts' and Introverts' Performance of Fundamental Motor Skills. *Journal of Human Kinetics*, 78, 229-237. <https://doi.org/10.2478/hukin-2021-0038>
- Grueschow, M., Kleim, B., & Ruff, C. C. (2020). Role of the Locus Coeruleus Arousal System in Cognitive Control. *Journal of Neuroendocrinology*, 32, Article e12890. <https://doi.org/10.1111/jne.12890>
- Han, L. Z., Liu, Y. Z., Zhang, D. D., Jin, Y., & Luo, Y. J. (2013). Low-Arousal Speech Noise Improves Performance in N-Back Task: An ERP Study. *PLOS ONE*, 8, e76261. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076261>
- Hoermann, H., Mischke, M., Elmenhorst, E.-M., & Benderoth, S. (2016). Differential Effects of Sleep Deprivation on Cognitive Performance. In *Proceedings of the 32nd EAAP Conference in Cascais/Portugal*.
- Imbir, K. K. (2015). Does Reading Words Differing in Arousal Load Influence Interference Control in Flanker Task? *Cur-*

- rent Psychology (New Brunswick, N.J.), 36, 157-166. <https://doi.org/10.1007/s12144-015-9396-9>
- Jagannathan, S. R., Ezquerro-Nassar, A., Jachs, B., Pustovaya, O. V., Bareham, C. A., & Bekinschtein, T. A. (2018). Tracking Wakefulness as It Fades: Micro-Measures of Alertness. *Neuroimage*, 176, 138-151. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.04.046>
- Keith, J. M., Jamieson, J. P., & Bennetto, L. (2019). The Influence of Noise on Autonomic Arousal and Cognitive Performance in Adolescents with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 49, 113-126. <https://doi.org/10.1007/s10803-018-3685-8>
- Koelstra, S. (2012). Deap: A Database for Emotion Analysis; Using Physiological Signals. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 3, 18-31. <https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2011.15>
- Lee, M., Sanders, R. D., Yeom, S. K., Won, D. O., Seo, K. S., Kim, H. J., & Lee, S. W. (2017). Network Properties in Transitions of Consciousness during Propofol-Induced Sedation. *Scientific Reports*, 7, Article No. 16791. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15082-5>
- Lee, T. H., Greening, S. G., Ueno, T., Lewett, D. C., Ponzio, A., Sakaki, M., & Mather, M. (2018). Arousal Increases Neural Gain via the Locus Coeruleus-Noradrenaline System in Younger Adults but Not in Older Adults. *Nature Human Behaviour*, 2, 356-366. <https://doi.org/10.1038/s41562-018-0344-1>
- Maran, T., Sachse, P., Martini, M., Weber, B., Pinggera, J., Zuggal, S., & Furtner, M. (2017). Lost in Time and Space: States of High Arousal Disrupt Implicit Acquisition of Spatial and Sequential Context Information. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 11, Article No. 206. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2017.00206>
- Meeusen, R., Watson, P., Hasegawa, H., Roelands, B., & Piacentini, M. F. (2006). Central Fatigue: The Serotonin Hypothesis and Beyond. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 36, 881-909. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636100-00006>
- Neha, G., Matthew, B., Pontifex, C. et al. (2013). The Acute Effects of Yoga on Executive Function. *Journal of Physical Activity & Health*, 10, 488-495. <https://doi.org/10.1123/jpah.10.4.488>
- Noreika, V., Kamke, M. R., Canales-Johnson, A., Chennu, S., Bekinschtein, T. A., & Mattingley, J. B. (2020). Alertness Fluctuations When Performing a Task Modulate Cortical Evoked Responses to Transcranial Magnetic Stimulation. *NeuroImage*, 223, 117305. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117305>
- Robison, M. K., & Brewer, G. A. (2020). Individual Differences in Working Memory Capacity and the Regulation of Arousal. *Attention Perception & Psychophysics*, 82, 3273-3290. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02077-0>
- Robison, M. K., & Unsworth, N. (2019). Pupillometry Tracks Fluctuations in Working Memory Performance. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 81, 407-419. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1618-4>
- Satpute, A. B., Kragel, P. A., Barrett, L. F., Wager, T. D., & Bianciardi, M. (2019). Deconstructing Arousal into Wakeful, Autonomic and Affective Varieties. *Neuroscience Letters*, 693, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.01.042>
- Scammell, T. E., Arrigoni, E., & Lipton, J. O. (2017). Neural Circuitry of Wakefulness and Sleep. *Neuron*, 93, 747-765. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.01.014>
- Schevernels, H., Bombeke, K., Van der Borgh, L., Hopf, J. M., Krebs, R. M., & Boehler, C. N. (2015). Electrophysiological Evidence for the Involvement of Proactive and Reactive Control in a Rewarded Stop-Signal Task. *NeuroImage*, 121, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.07.023>
- Shaw, T. H., Nguyen, C., Satterfield, K., Ramirez, R., & Mcknight, P. E. (2016). Cerebral Hemovelocity Reveals Differential Resource Allocation Strategies for Extraverts and Introverts during Vigilance. *Experimental Brain Research*, 234, 577-585. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4481-8>
- Srivas, C., Stuart, O., Ram, A., Menon, D. K., Bekinschtein, T. A., & Bassett, D. S. (2016). Brain Connectivity Dissociates Responsiveness from Drug Exposure during Propofol-Induced Transitions of Consciousness. *PLOS Computational Biology*, 12, e1004669. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004669>
- Sullivan, M. D., Huang, R., Rovetti, J., Sparrow, E. P., & Spaniol, J. (2021). Associations between Phasic Arousal and Decisions under Risk in Younger and Older Adults. *Neurobiology of Aging*, 105, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2021.05.001>
- Unsworth, N., & Robison, M. K. (2017). The Importance of Arousal for Variation in Working Memory Capacity and Attention Control: A Latent Variable Pupillometry Study. *Journal of Experimental Psychology-Learning Memory and Cognition*, 43, 1962-1987. <https://doi.org/10.1037/xlm0000421>
- van der Linden, D., Tops, M., & Bakker, A. B. (2021). The Neuroscience of the Flow State: Involvement of the Locus Coeruleus Norepinephrine System. *Frontiers in Psychology*, 12, Article ID: 645498. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.645498>
- Wisor, J. (2018). Dopamine and Wakefulness: Pharmacology, Genetics, and Circuitry. In H.-P. Landolt, & D.-J. Dijk (Eds.), *Sleep-Wake Neurobiology and Pharmacology* (Vol. 253, pp. 321-335). Springer. https://doi.org/10.1007/164_2018_95
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-Formation. *Journal of*

Comparative Neurology and Psychology, 18, 459-482. <https://doi.org/10.1002/cne.920180503>

Zhang, D., Cheng, W., & Yang, H. (2019). Evaluation of Workload, Arousal, Fatigue, and Attention on Time-Series Vigilance Task. In S. Z. Long, & B. S. Dhillon (Eds.), *Proceedings of the 18th International Conference on MMESE* (pp. 65-69). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2481-9_9

Zhao, R., Zhang, X., Fei, N., Zhu, Y., Sun, J., Liu, P., & Qin, W. (2019). Decreased Cortical and Subcortical Response to Inhibition Control after Sleep Deprivation. *Brain Imaging and Behavior*, 13, 638-650. <https://doi.org/10.1007/s11682-018-9868-2>