

• 研究构想(Conceptual Framework) •

从无意识到意识：执行功能调控下 顿悟问题解决的信息加工过程*

赵庆柏¹ 陈 岩¹ 周冶金¹ 陈 石^{2,3}

(¹ 青少年网络心理与行为教育部重点实验室；人的发展与心理健康湖北省重点实验室；
华中师范大学心理学院，武汉 430079) (² 湖北中医药大学医学人文学院，
湖北大健康产业发展研究中心，武汉 430065) (³ 湖北时珍实验室，武汉 430000)

摘 要 以往研究虽然强调了无意识加工在顿悟问题解决中的关键作用，却未直接揭示其过程与加工信息如何交互。本研究旨在探讨顿悟中关键的弱关联信息如何由无意识进入意识，以及执行功能如何调控该过程。为此，我们提出一个无意识信息加工过程假设模型，强调大脑在意识状态的变化过程中完成了强弱关联信息的更迭和替换，从而促成了问题的顿悟解决。本研究结合多种行为及神经技术对这一问题进行系统考察，有望揭示创造性问题解决的深层机制，并为促进创造力的干预手段提供科学依据。

关键词 顿悟，问题解决，意识，执行功能，无意识信息加工过程假设模型

分类号 B842

1 问题提出

顿悟(insight)作为创造性思维的核心表现形式之一，一直以来受到认知心理学与神经科学领域的广泛关注。它通常指个体在问题解决陷入思维僵局之后，突然地理解了复杂的知觉情形或抓住了事物的内在本质，并伴有“啊哈”体验(Aha! Experience)的过程(Kizilirmak et al., 2016; Wiley & Danek, 2024)。与分析性问题解决路径不同，顿悟往往不依赖于逐步推理或显性知识检索，而表现出跳跃性、非线性和突发性的认知特征(Bowden & Jung-Beeman, 2007; 邢强 等, 2013)。这使得顿悟成为研究人类创造性思维机制的重要窗口，也为理解意识与无意识之间的交互提供了独特的范式。

尽管顿悟现象被描述为“突如其来”，但大量研究表明，其背后可能涉及复杂的信息加工过程，

其中无意识或前意识层面的加工尤为关键，构成了其核心环节。早在 20 世纪初，Wallas (1926)便提出创造性思维的四阶段模型：准备期、酝酿期、明朗期与验证期，其中“酝酿期”强调个体在暂时放弃问题后，潜意识中仍在持续进行信息加工。近年来随着认知神经科学的发展，研究者通过实验手段揭示这一无意识加工过程的时间动态与神经基础。例如，Jung-Beeman 等(2004)发现，在顿悟发生前约 0.3 秒，右侧颞上回出现高频 γ 波爆发，提示远距离语义联结的无意识激活。而采用 EEG 微状态分析(microstate analysis)的研究进一步发现，与默认模式网络相关的微状态 C 在顿悟前显著增加(陈岩 等, 2026)，可能反映了内部注意状态的增强与无意识加工的主导(Zanesco et al., 2021)。

然而，尽管已有研究为顿悟的无意识加工提供了初步证据，仍存在以下关键科学问题亟待解决：首先，无意识加工在时间维度上的展开过程尚不清晰。顿悟并非瞬间完成，而是从问题呈现到表征重构的动态过程(Haavold & Sriraman, 2022; Shen et al., 2018)。当前多数研究聚焦于顿悟

收稿日期：2025-10-20

* 国家自然科学基金项目(No. 32471108)，教育部人文社会科学规划基金项目(No.22YJA190013)，中央高校基本科研业务费(No. XJ2024003701)。

通信作者：陈石，E-mail: chs22@hbucm.edu.cn

发生前后的“静态对比”，缺乏对整个过程的连续追踪与分段建模，难以揭示与问题解决弱关联的信息是如何在意识之下逐步积累并最终突破意识阈限的。其次，弱关联信息如何从无意识状态进入意识加工仍缺乏机制性解释。在顿悟初期，个体往往基于已有知识建构初始表征，导致强关联信息占据主导地位，而弱关联信息则被抑制(Leszczynski et al., 2017; Valba et al., 2021)。如何打破这一“思维定势”，使原本被忽视的信息得以浮现，是理解顿悟机制的关键。当前研究尚未明确这一过程是否依赖于某种“去抑制”机制，抑或通过执行功能的暂时“退让”实现。第三，执行功能在顿悟中的调控作用存在争议。传统观点认为，执行功能通过抑制干扰、维持注意和整合信息促进创造性思维。然而，这种观点在当下已经受到一些实证研究的挑战，有神经调控研究发现，对背外侧前额叶(Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC)的抑制性刺激反而能促进顿悟问题的解决(Luft et al., 2017)。这提示执行功能在顿悟的不同阶段可能发挥非线性、动态变化的作用，而非持续增强的线性调控。

综上所述，顿悟研究正处于从“现象描述”向“机制阐释”转型的关键阶段。未来研究亟需整合多模态实验技术，系统揭示无意识加工的时间动态、信息转化机制以及执行功能的调控路径，从而构建更具解释力与预测力的顿悟认知模型。本文将围绕上述问题，综述当前关于顿悟中无意识加工与执行功能调控的研究进展，并提出未来研究的理论方向与方法论建议。

2 研究现状与评述

顿悟作为创造性思维的关键形式，其理论建构经历了从早期“灵感说”到现代认知神经模型的深刻转变。当前主流理论普遍认为，顿悟的本质在于问题表征的重构，即个体在思维僵局中打破原有认知框架，重新组织信息结构，从而实现“突如其来”的解决突破。围绕这一过程，研究者提出了多种理论模型，并逐步揭示了无意识加工在其中的核心作用。此外，在顿悟问题解决中，执行功能在顿悟中的作用并非一成不变，而是呈现出阶段性、非线性与个体差异性的动态调控特征，需要在具体问题解决过程中描述其动态变化，以明晰执行功能如何支持创造。

2.1 无意识加工作用于顿悟问题解决的理论支撑

表征转换理论(Representational Change Theory)由 Knoblich 等(2001)提出，是顿悟研究中最具影响力的理论之一。该理论认为，个体在解决问题时，首先会基于已有知识和经验构建初始问题表征，该表征决定了其搜索策略与解决路径。然而，当问题结构复杂或存在误导性线索时，初始表征往往导致思维定势(mental set)或功能固着(functional fixedness)，使个体陷入思维僵局。而真正带来顿悟突破的并非更努力的搜索，而是对问题表征的结构性转换(张庆林, 肖崇好, 1996)。这一过程主要通过两种机制实现：限制解除(constraint relaxation)与组块破解(chunk decomposition)。前者指个体放松对问题元素的功能限制，重新定义其用途；后者则涉及将原本被视为整体的信息单元拆解为更基本的成分，从而发现新的组合方式(Huang et al., 2019; 邢强 等, 2013)。重要的是，这两种机制往往并不发生在意识层面，而是通过无意识的重构过程悄然完成。表征转换理论强调，顿悟并非“想得更用力”，而是“想得更不同”。这一观点为后续研究提供了关键思路：顿悟的核心机制并非显性推理，而是隐性认知系统的重构活动。

在表征转换的基础上，研究者进一步提出，顿悟的突破依赖于无意识层面的信息重构。这一观点得到了“无意识思维理论”(Unconscious Thought Theory, Dijksterhuis & Nordgren, 2006)的支持。该理论认为，无意识系统在处理复杂信息时具有更强的整合能力与联想广度，能够在不依赖意识控制的前提下，自动激活远距离语义联结，从而促成新颖解决方案的生成。“酝酿效应”(incubation effect)相关的元分析研究发现，在问题解决过程中插入分心任务(如阅读、散步、简单算术)能显著提高顿悟解决率(Sio & Ormerod, 2009)。研究者认为，分心任务使意识系统暂时脱离问题，从而释放无意识系统对信息的持续加工。在此过程中，原本被抑制的弱关联信息得以激活，形成新的语义路径。国内研究者提出的“信息选择模型”认为，顿悟依赖于对非突显信息的激活与整合。该模型强调，在初始表征阶段，突显信息往往主导加工路径，而非突显信息则被抑制。顿悟的突破需要削弱突显信息的抑制效应，并通过无意识系统激活非突显信息，从而实现表

征重构(赵庆柏 等, 2015)。

2.2 无意识加工作用于顿悟问题解决的实证支撑

尽管无意识加工本质上难以直接观测, 但研究者通过行为探针、眼动追踪与反应时范式等手段, 间接捕捉其加工痕迹。例如, Thomas 和 Lleras (2009)在双绳问题中嵌入“摆臂”动作提示, 发现即使被试未意识到动作与问题的关联, 其顿悟率仍显著提高, 提示内隐线索可激活无意识联结路径。眼动研究进一步揭示了顿悟前的注意力重分配模式。Knoblich 等(2001)在火柴棒算式任务中发现, 顿悟前被试对关键运算符的注视时间显著增加, 尽管其尚未意识到该元素的重要性。Bilalić 等(2019)将解题过程划分为 10 个时间段, 发现个体在顿悟前逐步减少对错误路径的关注, 转而注视问题解决的关键部分, 提示无意识系统已启动重构过程。此外, 国内研究也采用成语谜语任务, 结合眼动兴趣区分析, 发现尽管行为报告仍未能确定答案, 但顿悟前被试对“弱关联语义区”的注视比例已在逐渐上升, 这一“先看后知”的现象间接为无意识信息优先激活提供了行为方面的证据(黄福荣 等, 2013; Zhao et al., 2025)。

神经影像研究为无意识加工提供了更为直接的证据。Jung-Beeman 等(2004)采用复合远距离联想任务(compound remote associate test, CRA)发现, 顿悟前右侧颞上回出现高频 γ 波爆发, 提示远距离语义联结的无意识激活。进一步 fMRI 研究显示, 右侧颞叶在顿悟任务中持续激活, 可能与新颖语义信息的自动提取有关。Yu 等(2022)使用 CRA 任务, 将隐马尔可夫模型拟合到时频变换的脑电图信号中, 利用光谱分辨的功率形貌来表征顿悟问题解决中的大脑状态及其隐藏的认知过程, 结果表明在使用顿悟方法解决的问题中, 与自发神经活动更为相关的 α 状态在准备阶段和问题解决期间(类似思维僵局期间)更多地出现和维持, 而在做出反应之前, α 的出现概率迅速下降。这种自发的活动被认为反映了神经认知网络的内在活动模式, 是区分外部指导任务集中时刻和心智游移时刻的潜力指标之一。脑电微状态在以往的研究中一直被用于区分不同群体或意识状态(Michel & Koenig, 2018; Seitzman et al., 2017), 近年来一项研究使用微状态调查了时间动态与自我报告的心智游移之间的关系(Zanesco et al., 2021)。结果显示, 和大脑默认模式网络存在较高

对应关系的微状态 C 在自我报告心智游移的条件下覆盖了更多的时间序列, 解释了更多的地形方差(global explained variance, GEV)。相比之下, 代表认知冲突或认知控制的微状态 E 在报告心智游移的条件下表现出相反的模式。赵庆柏等(2017)采用谜题型歇后语任务, 发现新颖语义联结条件下右侧颞上回激活更强, 且右侧颞叶在晚期正成分(late positive component, LPC)中表现出更强的正波, 提示右侧半球在无意识信息整合与意识浮现之间发挥桥梁作用。此外, 表征相似性分析(representational similarity analysis, RSA)也被用于揭示信息内容的动态变化。Liu 等(2023)发现, 在顿悟成功试次中, 神经表征与弱关联信息的语义相似性随时间逐渐增强, 而与强关联信息的相似性则逐步下降, 提示无意识系统已实现信息优选与重构。

2.3 执行功能的调控机制: 动态抑制与选择

早期研究主要采用相关法探讨执行功能与顿悟之间的关系。例如, Murray 和 Byrne (2005)发现, 顿悟问题解决成绩与工作记忆容量(Smeekens, 2013)、注意转换能力显著正相关, 而与选择性注意无关。邢强等(2017)进一步指出, 认知灵活性与刷新功能与言语顿悟任务的表现密切相关, 而抑制功能则主要影响初始表征阶段。也有研究在结构方程模型分析中报告了抑制功能在问题搜索阶段起主导作用, 而刷新与转换功能则在表征重构阶段更为关键(郭芳 等, 2019)。尽管这些研究为执行功能与顿悟之间的关系提供了初步证据, 但由于其非实验性设计, 难以揭示其因果机制。近年来, 经颅直流电刺激(tDCS)与经颅磁刺激(TMS)等神经调控技术被广泛应用于创造性思维研究, 为探讨执行功能在顿悟中的因果性作用提供了新的手段。一项具有代表性的研究发现对左侧背外侧前额叶(l-DLPFC)施加阴极刺激(即抑制其活性)可显著提升个体在火柴棒任务中限制解除型问题的解决率。研究者认为, DLPFC 的抑制可能削弱了对显性策略的过度控制, 从而释放了无意识系统对弱关联信息的加工能力(Luft et al., 2017)。这一发现首次提供了因果性证据, 表明执行功能的“退让”可能反而有助于顿悟的突破。进一步研究指出, 执行功能的调控作用可能具有阶段特异性。顿悟过程可分为三个阶段: 初期探索、僵局维持与突破重构。在初期探索阶段, 执行功能需

保持活跃以维持目标;在僵局维持阶段,其活性需适度降低以促进无意识信息浮现;而在突破重构,执行功能需重新介入以整合新信息并验证其合理性。该模型为理解执行功能的动态调控提供了理论框架(Markina & Vladimirov, 2019)。近期有研究采用 tDCS, 对左侧 DLPFC 进行阴极刺激,并在成语谜语任务中追踪被试的眼部活动。结果发现,抑制 DLPFC 后,被试在问题解决后期对关键元素的平均注视持续时间比例显著增加,且顿悟问题的解决率有显著提高。这表明 DLPFC 的抑制可能通过放松约束来促进重构过程(Liu et al., 2025),执行功能的抑制可能促进了右侧半球无意识信息的整合与浮现,为突破思维定势提供神经基础。

除了调控强度变化外,执行功能在顿悟中的作用还表现为网络动态重配置。有研究使用表征相似性分析(RSA)发现在顿悟成功试次中,DLPFC 对弱关联信息的神经表征相似性在僵局后阶段显著增强,提示其可能参与了新信息的意识整合与验证。而在失败试次中,该增强未出现,反而表现出对强关联信息的持续表征,提示执行功能未能有效“切换”信息焦点(Liu et al., 2023)。

值得注意的是,个体差异性在执行功能调控中也扮演重要角色。具有较高认知灵活性的个体在 DLPFC 抑制条件下创造性表现提升更显著,而低灵活性个体则在 DLPFC 增强条件下表现更好。这表明,执行功能的最优调控水平可能并非一成不变,而是依赖于个体的认知资源禀赋与策略偏好(Meiron & Lavidor, 2013; 邢强 等, 2017)。

2.4 对已有文献的评述

从以往文献中可以得知,自 21 世纪至今顿悟的理论建构已从早期的“灵感说”发展为以表征转换与无意识重构为核心的认知神经模型。行为与神经证据共同指向一个动态过程:在顿悟问题解决过程进入思维僵局后,执行功能暂时减弱,无意识系统通过激活弱关联信息、重构语义联结,最终实现意识层面的突破。然而,当前研究仍然面临一些挑战,让顿悟问题解决的相关解释难以继续深入。

首先,研究者们较为广泛地认同无意识加工在顿悟问题解决中的作用(Siegler, 2000; Sio & Ormerod, 2009),但真正对其进行的探索又比较少,现有研究对无意识加工的探索时间精度仍较低,缺乏亚秒级动态追踪;其次,从信息加工的

角度来说,顿悟问题解决的关键过程涉及解题者对强关联信息的机制和弱关联信息的激活。强关联信息的抑制在以往研究中已经有了一定的探讨和共识(Huang et al., 2019; Leszczynski et al., 2017; Valba et al., 2021),但对于弱关联信息如何“突破意识阈值”的神经机制尚不明确;第三,执行功能的相关研究结果提示其并非始终为主导作用,而是在不同阶段灵活调节其介入程度(郭芳 等, 2019; Markina & Vladimirov, 2019)。因此应当更加细致地区分执行功能在顿悟问题解决不同阶段的作用,将“静态控制”的研究取向转变为“动态调控”的研究取向,验证阶段特异性是否具有因果性,且将不同个体在无意识加工能力上的差异纳入考虑。未来研究需进一步整合高时间分辨率(EEG/MEG)与高空间分辨率(fMRI)技术,结合神经调控(如 tDCS/TMS)与计算建模手段,构建更具预测力与干预性的顿悟认知模型。

3 研究构想

本研究拟解决的核心问题是顿悟问题解决意识和无意识信息加工过程特征以及执行功能在其中的调控作用。首先,当问题呈现时,基于先前知识经验和问题语境,个体会对问题形成初始表征,并在问题空间中进行广泛的信息搜索。其中,与初始表征存在强关联的信息在激活上处于优势地位;而与初始表征存在弱关联或内隐关联的信息,在激活上处于弱势地位,在意识层面以下进行无意识加工。执行控制系统调控了对强关联信息的激活和对弱关联信息(初始表征时可能会被评估为无关干扰信息)的抑制。然而,强关联信息往往只能指向问题的寻常解决(不符合创造任务要求),或者导致思维定势或固着,此时个体会陷入思维僵局。当个体陷入思维僵局时,反复无效的尝试可能耗竭其认知资源,导致工作记忆负载过高与执行控制功能的暂时性减弱。这种执行功能的失活会引发一个关键的认知转换:对强关联信息(优势思维路径)的主动维持减弱,同时对弱关联信息(非优势线索)的抑制被解除。与此同时,思维僵局常伴随心智游移的发生。心智游移通过将注意力从当前固着问题上转移,进一步降低了对强关联信息的聚焦,并可能通过内隐的激活扩散无意识地强化弱关联信息之间的联结。这一过程也让大脑从高负荷的定向思考中放松,可能有

助于执行控制功能的后续恢复。此时, 弱关联信息作为关键信息将被激活, 而原来的强关联信息作为干扰刺激将被抑制。当弱关联信息和问题情境进行充分整合, 便可能形成新的表征, 顿悟问题得以解决。

概括而言, 我们认为顿悟问题解决的认知过程包含如下几个关键点: 首先, 顿悟过程同时涉及了信息的意识加工和无意识加工两个层面, 而对弱关联信息的无意识加工是顿悟问题解决的关键; 其次, 强、弱关联信息的激活存在此消彼长的动态变化特征, 具体表现为: 初期, 强关联信息在意识层面(或受控加工)占主导, 但其优势会逐渐消退; 与此同时, 弱关联信息的激活则在无意识层面(或自动化加工)中不断增强, 并最终突破至意识层面。执行功能在思维僵局后可能发生的调控减弱(或去抑制), 或许是驱动这一强弱信息加工优势转换的关键机制。基于对顿悟相关理论以及先前实证研究的充分梳理和论证, 我们提出顿悟问题解决的信息无意识加工过程假设模型, 如图1所示。

3.1 研究 1: 顿悟问题解决过程中无意识加工状态的存在性检验

顿悟相关理论和实证研究均强调无意识加工。然而, 现有研究多依赖出声思维、口头报告和眼动等外显测量手段, 这些方法主要反映的是处于意识监控下的加工结果, 难以直接揭示无意识

层面的动态过程(黄福荣 等, 2013; Zhao et al., 2025); 而酝酿效应相关研究则主要关注了分心任务特征及其对顿悟解决率的影响, 而且外加的分心任务也难以反映个体自主的顿悟问题解决过程(Henok et al., 2020; Sio & Ormerod, 2009; Tan et al., 2015)。因此, 研究 1 首先采用两个实验(3个子实验)对个体自主的顿悟问题解决中无意识加工状态的存在性进行检验。我们认为顿悟问题解决过程中的心智游移状态某种程度上反映了对目标的无意识加工, 因此实验 1 通过设置探针的方式探测被试在问题解决过程中的心智游移状态, 并采用两种顿悟任务验证关于心智游移的行为表现是否具有跨任务的一致性(实验 1a: 成语谜语任务和实验 1b: CRA 任务)。实验 2 进一步在电生理层面考察无意识加工的存在性。

实验 1 主要关注两个问题: 其一是该试次是否被成功解决, 其二是在该试次中被试是否出现心智游移。实验 1a 参考朱新秤等人(2009)的成语谜语任务, 从材料库中挑选 60 道谜题。每个谜题的谜面为 2 至 6 个字, 谜底为一个成语, 与谜面之间存在内隐而非直接的语义关联。实验材料举例如表 1 所示。实验 1b 采用的 CRA 任务参考 Jung-Beeman 等人(2004)的研究, 从材料库中挑选 90 道题。每道题的题面为 3 个英文单词, 被试需想出一个单词与题面的 3 个单词都能组成一个词组或复合词。实验材料举例如表 2 所示。实验 1a、

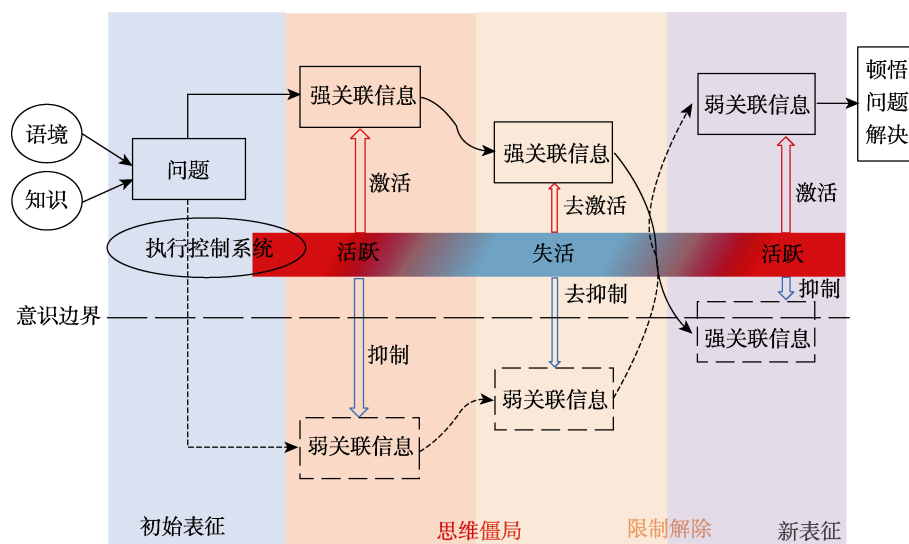


图1 顿悟问题解决的信息无意识加工过程假设模型

注: 彩图见电子版, 下同

表 1 成语谜语任务材料举例

谜面	谜底	强关联信息	弱关联信息	无效信息
越做越快	积劳成疾	熟练	疾病	快乐
民航局开业	有机可乘	飞机	机会	天空
观光	一览无余	风景	剩余	光亮

表 2 复合远距离联想任务材料举例

问题	答案	正确组合 1	正确组合 2	正确组合 3
fish/mine/rush	gold	gold fish	gold mine	gold rush
basket/eight/snow	ball	basketball	eight ball	snowball
age/mile/sand	stone	stone age	milestone	sandstone

1b 除材料外完全一致，以保证对心智游移的探测是在相同的操纵下完成的。

在实验 1a、1b 正式开始前，都需要提前对被试进行练习训练，确保被试明白了任务内容和不同的解决策略与顿悟和非顿悟的对应关系，此外，我们要在练习环节充分确认被试理解了如何对思维僵局进行主动报告和对测量心智游移的思维探针进行反馈。实验 1a 的正式实验中，被试在安静的实验室完成任务。每个试次首先屏幕中心呈现一个 0.5~1.5 s 的注视点，谜面呈现 4 s 后消失，之后被试在 40s 内尝试解题。在此过程中，要求被试主动报告自己的思维僵局状态，即告诉被试一旦发现自己处于大脑空白、无法解题的状态就立即按下空格键，然后继续解题。在思维僵局报告后，被试如果想出了答案，就立刻按键并在电脑屏幕上输入答案，然后进入下一个试次。在被试报告思维僵局到试次结束的这段时间内的随机时刻，有三分之二的试次安排了一个探针，即被试听到一声“滴”声后立即回答屏幕上呈现的问题：“刚刚你的注意力是否集中在任务上”，被试需要对该问题进行 7 点评分的回答(1-完全集中在任务上，7-完全脱离当前任务)，然后继续解题(Christoff

et al., 2009)。对于所有成功解题的试次，被试需要在报告答案后按键判断自己的作答策略是顿悟或非顿悟的(Bieth et al., 2024; Yu et al., 2022)，然后进入下一个试次(实验示意图如图 2)，实验 1b 程序与实验 1a 相同，在此不做赘述。

数据分析将所有被试的全部试次混合在一起，统计所有安排探针试次的解决率和心智游移情况，使用线性混合模型(linear mixed model, LMM)，在控制被试个体差异的前提下，检验解决率对心智游移评分的影响。随后进行被试水平的分析，统计每个被试的心智游移得分和总体解决率，然后进行皮尔逊相关分析，分析方法实验 1、2 相同。我们预期被试在陷入思维僵局之后更容易报告出现了心智游移状态，且心智游移的自评得分和顿悟解决率呈正相关。

实验 2 采用成语谜语任务，结合 EEG 微状态技术，探究自发顿悟问题解决过程中的无意识加工状态在电生理层面是否也有相应的表现。被试首先熟悉谜语的解法和实验的流程，正式实验流程和实验 1 大致相同，只是在被试报告思维僵局后不再安排探针，而让被试自由解题并同时记录脑电。实验流程如图 3 所示。

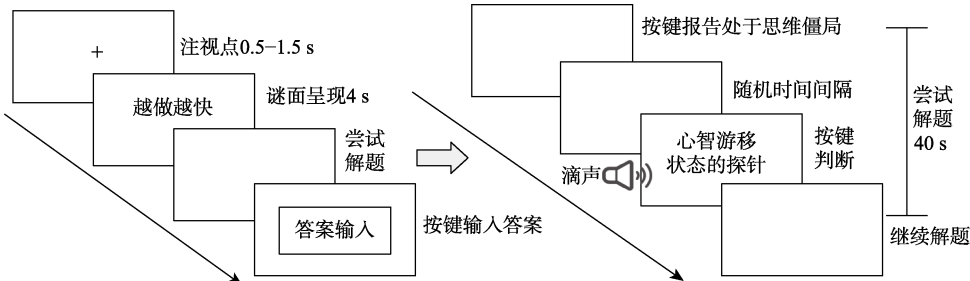


图 2 实验 1 流程示意图

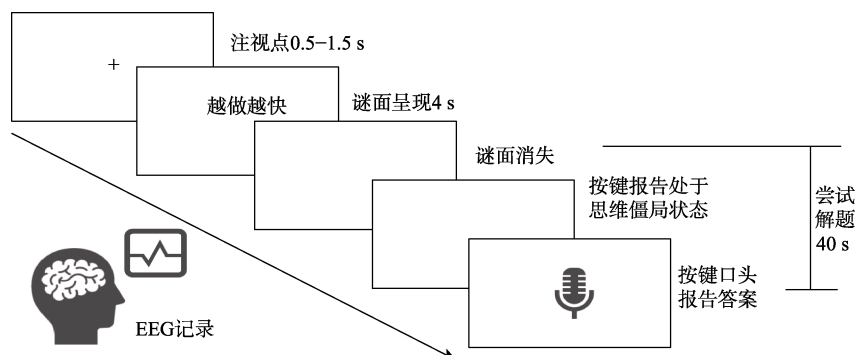


图3 实验2 流程示意图

采用 EEG 记录系统 Recorder (Brain Products, 德国), 按照国际 10-20 系统扩展的 64 导电极帽记录被试脑电。参考电极设定为 FCz, 滤波带宽为 0.05~100 Hz, 采样率为 500 Hz/导。分析主要关注 5 个时间段, 分别为谜面呈现期间、谜面消失后 2 s、思维僵局报告前 2 s、思维僵局报告后 2 s 和试次结束前 2 s。关注的因变量包括各个时间段不同频段的脑电功率和聚类得出的微状态的统计参数。按照标准化流程对静息态和任务态的脑电数据进行预处理(Lopez et al., 2022), 首先将脑电参考电极转换为双侧乳突电极(TP9、TP10), 对数据进行重参考; 然后对数据进行人工去伪迹和滤波, 滤波带宽为 0.1~40 Hz; 最后使用独立成分分析(ICA)法对数据进行眼电、肌电等伪迹进行排除和纠正。时频分析先对 EEG 数据根据预先定义好的 5 个感兴趣事件时间段进行分段加窗处理, 窗长为 50 ms。然后进行傅里叶变换, 提取该时间窗内的频域信息。将窗口沿着时间轴以向前滑动, 步长为 10 ms。对每个时间窗内的数据进行同样的处理, 这样就能得到随时间变化的各频率上的功率谱密度(Oostenveld et al., 2011)。微状态分析通过预处理得到 5 个感兴趣时间段内的原始地形图时间序列。在个体水平上, 使用 K-means 聚类分析法将原始图(在地形拓扑结构保持相对稳定的时间范围内地形图强度最大的头皮电势图)进行聚类, 得到多个典型类别的地形图, 即脑电微状态(Michel et al., 2024; Tarailis et al., 2024)。然后基于反向拟合计算聚类图与每个单独数据点之间的空间相关性, 确定各个时间点属于何种类别, 得到脑电微状态时间序列, 如果两个相邻的原始图不属于同一类别, 那么需要将两个原始图中间的地

形图一分为二, 前一半地形图属于前一个地形图类别、后一半地形图属于后一个地形图类别(Poulsen et al., 2018)。然后统计感兴趣时间段内各种微状态的统计参数, 即每种微状态的平均持续时间、平均每秒出现次数和状态之间的转换概率。

在时间动态上, 我们预期被试在谜面消失后 2 s 的脑电特征主要表现为和执行控制加工相关的微状态 D 占主导, 在思维僵局后 2 s 的脑电特征主要表现为和无意识加工相关的微状态 C 占主导。在不同谜题解决情况上, 我们预期在僵局后 2 s 出现微状态 C 的频次、比例和转换概率能显著预测该谜题的顿悟解决情况; 在被试水平上, 思维僵局后表现出微状态 C 的频次、比例和转换概率(叠加平均)与被试的顿悟解决率之间有显著正相关。

3.2 研究 2: 顿悟问题解决过程的信息加工动态变化特征及其神经基础

研究 2 旨在考察顿悟问题解决中信息加工的动态变化特征, 即对强联结信息的意识加工的减弱以及对弱联结信息的无意识加工的增强; 同时, 研究 2 拟通过神经成像手段考察顿悟问题解决中执行功能的动态变化, 及其对强、弱关联信息的调控。研究 2 包含实验 3 和实验 4。

实验 3 拟采用阈下词汇探测的手段, 考察自发顿悟问题解决的不同时间段特定的信息是否处于激活或(意识下)即将激活状态, 以此描绘强、弱联结信息加工的动态变化特征, 特别是关注思维僵局之前和之后的阶段。与实验 1a 相同, 实验 3 的任务来源于成语谜语词典, 并招募一批不参与正式实验的被试, 为每个谜题准备 3 个探测词。预实验中, 要求被试对成语谜语的谜面和谜底进

行词汇自由联想,从而获得与强关联信息、弱关联信息和无效信息相关的探测词(示例见图4)。需要注意的是,由于涉及到阈下探测,感知阈限并不是一个恒定概念,而是因人而异,且可能随着实验进程发生改变。因此,本实验参考以往关于无意识研究的操纵(Tal et al., 2024),在正式实验前测定被试的感知阈限,并据此设定实验中阈下探测词呈现的时长,同时,在区组(block)之间、实验结束后也设置感知阈限的测量,考察感知阈限是否随实验时间进程而发生改变。此外,所有谜题只出现一次,所以谜题和对应的探测信息进行项目内平衡,形成3套平行的实验材料。实验设计为两因素被试内设计,自变量为探测时间和探测词类型。探测时间包括3个时间点:首先根据研究1的实验结果,统计被试在每一个谜题报告思维僵局时刻的平均时间,将该时间点设置为 t ,另两个时间点分别为 $t-3\text{ s}$ 时刻和 $t+3\text{ s}$ 时刻。探测词类型包括3类,分别为强关联信息、弱关联信息和

无效信息。因变量为被试报告探测词的准确率。

在正式实验中,屏幕中央先呈现一个 $0.5\sim 1.5\text{ s}$ 的注视点,谜面呈现 4 s 后消失,之后被试在 40 s 内尝试解题。在这个过程中,在3个探测时间点均有可能以极快速度闪现一个探测词,呈现时间的具体长度依照被试正式实验前测量感知阈限的结果而定,然后进行视觉掩蔽 2 s 。被试需要口头报告自己看到了什么词汇,然后继续解题。如果想到答案,便立刻按键并输入想到的答案。然后在 2 s 内回答自己是否清晰地看到了字符,之后进入下一试次。实验流程如图5所示。通过统计分析被试在不同探测时间点对各类信息相关探测词回答正确的数量,我们预期探测时间和探测词类型的交互作用显著。在 $t-3\text{ s}$ 时刻,被试对强关联信息相关探测词正确识别的数量显著高于弱关联信息相关探测词;而在 $t+3\text{ s}$ 时刻,被试对弱关联信息相关探测词正确识别的数量显著高于强关联信息相关探测词。

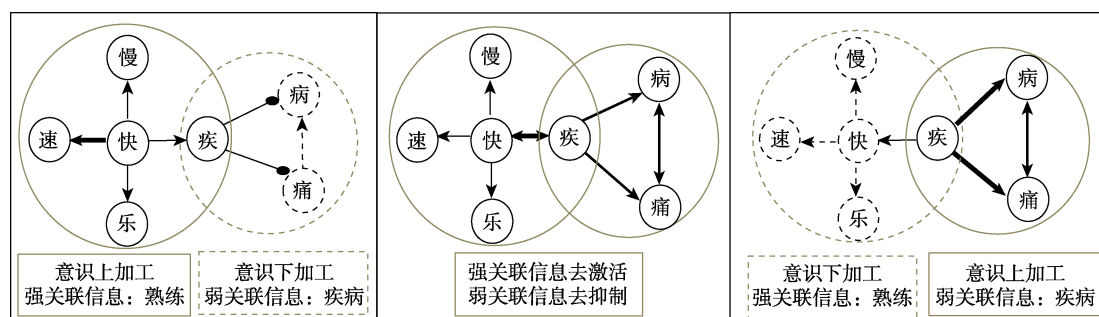


图4 成语谜语解题过程中相关语义信息加工示意图

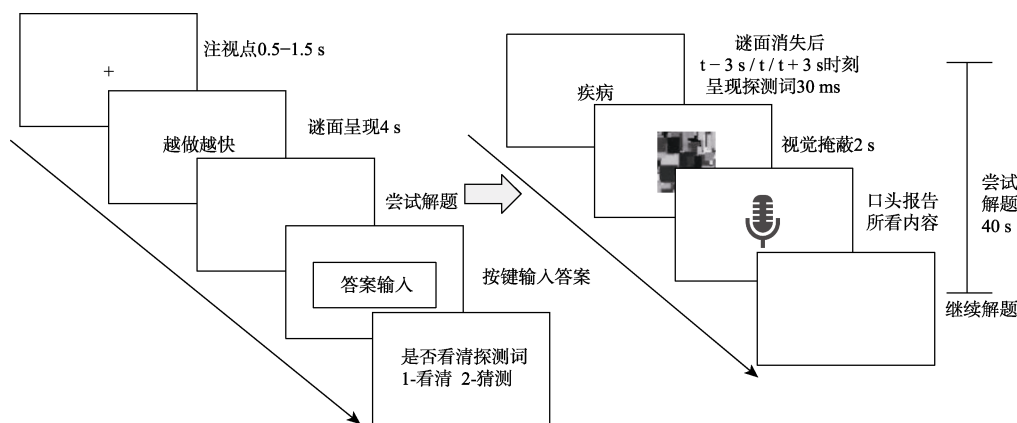


图5 实验3流程示意图(探测词的呈现时间 30 ms 仅为示例)

实验4拟采用fMRI技术记录顿悟问题解决全过程的神经活动,通过对左、右颞叶和DLPFC进行时间序列分析,考察强、弱联结信息加工以及执行功能的动态变化;通过有效连通性分析,计算DLPFC对左、右颞叶的因果作用,揭示执行功能对强、弱联结信息的调控作用;最后参考Wang等人(2018)的做法,主要采用表征相似性分析(RSA)的方法,考察顿悟问题解决各个阶段所处的信息加工状态以及问题相关神经表征的动态变化,即被试在不同时间点表征的内容是否与强关联信息或弱关联信息相关,以及不同时间点的神经表征间是否相似。实验4正式实验在fMRI扫描环境下完成,任务同实验3。主要关注的自变量包括信息表征类型(强关联信息/弱关联信息/无效信息)、谜题解决情况(成功解决/未解决)和顿悟问题解决的不同时间阶段。因变量为顿悟问题解决率、解决时间,以及被试在顿悟问题解决不同阶段各脑区的BOLD信号激活情况、特定感兴趣区的功能连接情况和与不同信息表征间的表征相似性水平。在每个试次中,屏幕中心先呈现一个0.5~1.5 s的注视点,然后谜面呈现4 s后消失,之后被试在40 s内尝试解题,当被试感到陷入僵局时需要通过按键报告。每个试次随机在谜面呈现后4~6 s、僵局报告后3~5 s、问题解决后0~2 s出现阈下探测词,询问被试是否看清,探测词后

均有2 s的掩码以避免视觉后效带来的影响。被试的任务依旧是根据谜面想出一个新颖且语义扣合的成语答案,并在想到答案后立即按键、口头报告,随后进入下一个试次。每20道题之后被试进行短暂休息。每个被试在正式实验开始前首先需要提前练习、熟悉谜题的解法和实验的流程,并完成感知阈限的测量,以确定他们的个性化感知阈值,主试将根据被试的感知阈限设定阈下刺激的呈现时间,以确保刺激对于被试是阈下呈现的。在实验结束后被试需再次测量感知阈限,以考察感知阈限是否随实验时间进程发生改变。单个试次的流程如图6所示。

采用3T磁共振系统和配备EPI功能的头线圈进行fMRI扫描(联影uMR ux, 中国)。静息态和任务态功能像均采用梯度回波快速回波平面序列,参数包括,层数=60层,层厚=2.4 mm,重复时间=750 ms,回波时间=30 ms,反转角=60°,视野=216 mm×216 mm,矩阵=90×90,分辨率=2.4 mm×2.4 mm×2.4 mm。

首先对fMRI数据进行脑区功能定位分析。使用SPM12软件对图像进行时间校准,空间对齐,标准化和平滑等处理。将每个试次根据其持续时间(从谜底呈现到被试按键之间的时段)平均分为5段(最长6 s一段)。根据一般线性模型进行个体及组分析,通过统计检验得到成功解决和未

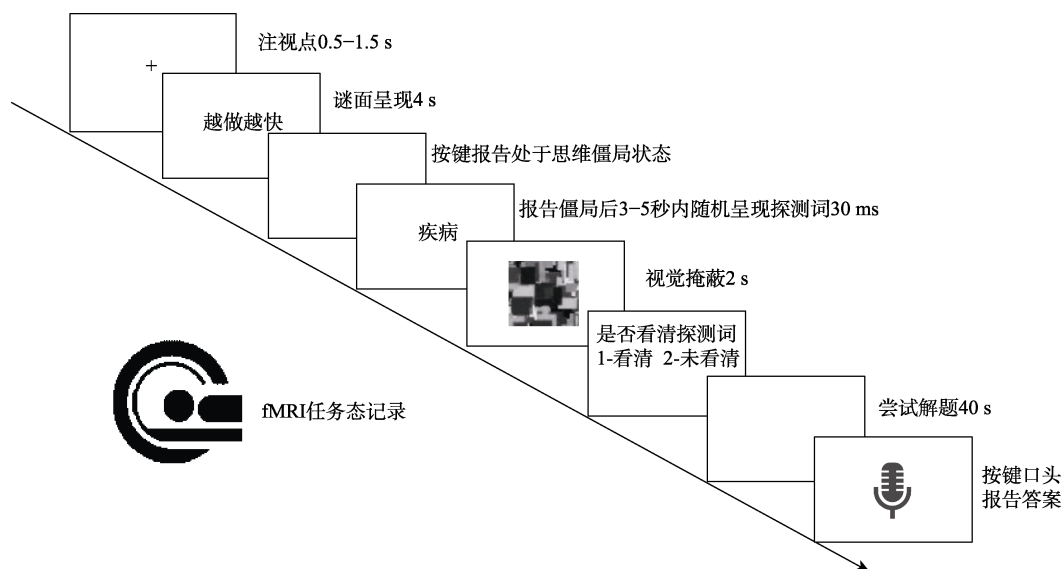


图6 实验4流程示意图

注: 本图为探测词在僵局报告后呈现的条件, 且呈现时间30 ms仅为示例。

成功解决条件下的大脑激活区域。其次进行脑区有效连通性分析。对于感兴趣脑区间的相互作用,采用动态因果模型进行有效连通性分析。具体的有效连通性分析可以通过SPM12软件来实现。基于脑区定位分析的结果,选定若干感兴趣区域(左、右颞叶和背外侧前额叶皮层)。感兴趣区的操作性定义为个体在该脑区激活最大值为球心、6 mm为半径的球体内的所有体素,其内的BOLD信号通过SPM12的VOI(volume of Interest),提取调制后的感兴趣成分,经动态因果模型分析后得到个体连通分析结果。最后,所有被试的不同连通分析结果通过基于贝叶斯因子的方法进行模型的比较,选出最优的模型进行结果分析和讨论。最后进行表征相似性分析:该方法主要的分析逻辑为,被试对相似语义信息的加工,神经表征也更相似。分析过程遵循以下程序(示意图如图7)。(1)根据刺激特征构建理论语义表征不相似性矩阵(representation dissimilarity matrix, RDM)。采用潜在语义分析技术(latent semantic analysis, LSA)计算所有成功解决试次刺激所对应的强关联信息双字词之间的向量余弦值来表征两者语义距离,用以代表两个词汇之间的语义不相似性(距离越大语义越不相似),由此构建出强关联信息的语义RDM。采用相同的手段构建成功解决试次的弱关联信息和无效信息的语义RDM,以及未成功解决试次的3种理论语义RDM。(2)根据神经激活模式构建神经表征RDM。参考脑区功能定位分析的结果确定分析兴趣区。考虑到BOLD血氧信号有一定的滞后性,我们适当地拓宽了可分析的时间窗口,被试解决每道谜题的神经活动取谜面呈现后4~8 s(谜面在呈现4 s后才消失)、僵局报告后3~7 s、问题解决后0~4 s,使用兴趣区中的每一个体素在这段时间内的平均激活强度来代表该体素的激活情况。每一段都得到兴趣区内所有体素的激活情况的向量,计算该向量在试次间的相关性 r ,用 $1 - r$ 代表两个试次间的神经不相似性,由此构建出成功解决试次的5个时间段的神经RDM。采用相同手段构建未成功解决试次的5个时间段的神经RDM。(3)计算语义理论RDM和每个阶段神经RDM、以及每个阶段神经RDM之间的两两相关性,得到相应的斯皮尔曼等级相关系数(Spearman's r)。使用置换检验考察相关系数的显著性,并采用配对样本 t 检验考察成功解决试

次下和未成功解决试次下个阶段神经RDM与理论RDM相似性差异,以及神经RDM间两两相似性差异。(4)计算成功解题后阈下探测阶段的神经RDM和语义理论RDM的相关性。

我们预期:(1)对于成功解决的试次,被试对弱关联信息加工相关脑区(主要是右侧颞叶)随着时间激活程度逐渐升高;执行控制相关脑区(主要是DLPFC)随着时间激活程度先下降再升高。(2)对于成功解决的试次,DLPFC与左、右颞叶的有效连接强度随着时间先下降再升高。(3)对于成功解决的试次,其神经RDM和强关联信息RDM间的相似度随时间逐渐下降,和弱关联信息的RDM间的相似性随时间逐渐上升,且神经RDM间的两两相似性较低;对于未成功解决的试次,仅会发现神经RDM和强关联信息RDM间的相似度随时间逐渐下降,并且神经RDM间的两两相似性较高。(4)对于成功解决的试次,被试对于弱关联信息的感知阈限会暂时性降低,信息加工的意识水平提高。具体表现在问题被顿悟解决后的阈下探测中,即使弱关联探测词的呈现时间短于被试的感知阈限,被试仍有较大可能可以看清阈下探测词,而强关联探测词和无效探测词则无此效应。此外,这一阶段的神经RDM与弱关联信息RDM间的相似度显著高于其与强关联、无效信息语义RDM的相似度。

3.3 研究3:弱关联信息的无意识加工对顿悟问题解决及其过程的影响

研究3拟通过实验操纵干预个体的弱关联信息的无意识加工,探究其对顿悟问题解决过程及结果的影响,分为实验5(5a、5b)及实验6。

实验5a考察解题前弱关联信息的内隐启动对顿悟问题解决的作用。采用成语谜语任务,通过将与解题有关的弱关联信息嵌入到与谜语任务无关的阅读材料中进行内隐启动,考察弱关联信息的无意识加工是否能够显著提升被试的解决率。实验设计为单因素组内设计。自变量为启动的内容,分别为与弱关联信息相关的启动条件或无关的控制条件。因变量为被试报告思维僵局出现的时间和对谜题的解决情况。成语谜语的材料和前面的实验相同。不同在于,为每一道谜题根据其解题相关的弱关联信息编写了两句阅读材料和相应的判断题,用来操纵被试对相关信息的无意识加工。例如在谜语“民航局开业”中,与谜底

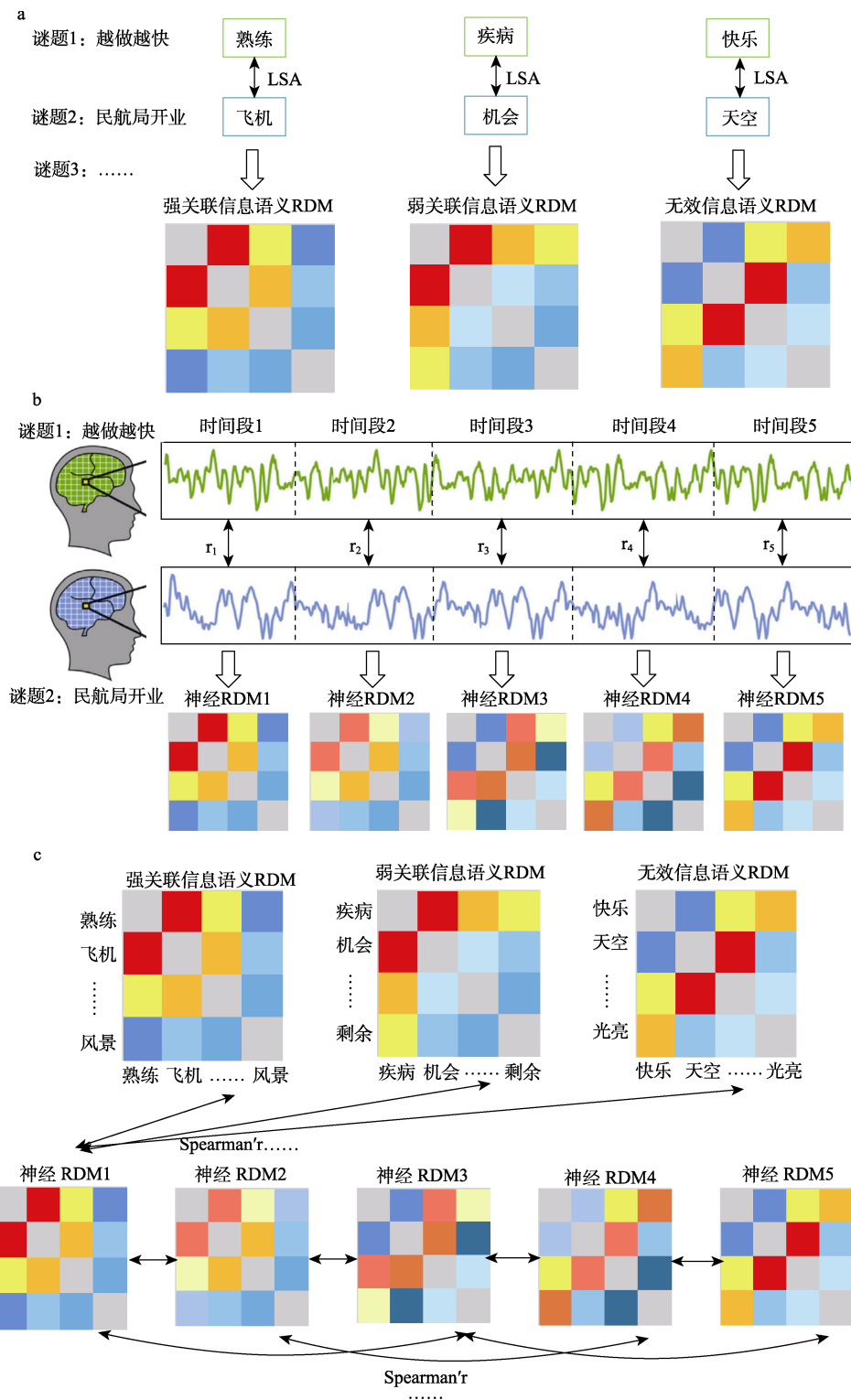


图 7 表征相似性分析示意图。a) 根据刺激特征构建理论语义 RDM; b) 根据神经激活模式构建神经表征 RDM; c) 计算语义理论 RDM 和每个阶段神经 RDM、以及每个阶段神经 RDM 之间的两两相关性

“有机可乘”相关的弱关联信息为“机会”。由此设置的提示条件下的阅读材料为“小明今年 18 岁, 他父亲在 3 年前生病了, 现在有机会可以治好, 他意识到自己对家庭的责任”, 控制条件下的阅读材料为“小明今年 18 岁, 他父亲在 3 年前生病了, 病情却一直没有好转, 他意识到自己对家庭的责任”, 为确保读者认真阅读而设计的与之配套的判断题为“父亲生病那年小明 15 岁”。所有谜题只出现一次, 所以谜题和对应的阅读进行项目内平衡, 形成 2 套平行的实验材料。正式实验中, 先给被试逐词呈现与主任务无关的阅读材料, 然后让被试在 2 s 内对判断题进行按键判断。随后间隔 1~3 s, 在屏幕中央呈现一个注视点 0.5~1.5 s, 然后呈现谜面 4 s 后消失, 之后被试在 40 s 内尝试解题。在这个过程中, 要求被试按键报告自己出现思维僵局的时刻, 然后继续解题。如果想到答案, 便立刻按键并口头报告想到的答案, 然后进入下一试次。实验流程如图 8 所示。

统计分析被试出现思维僵局的时间、解题所用时间以及解题率, 使用配对样本 t 检验考察启动条件与控制条件之间的差异。我们初步预期: 相比于控制条件, 启动条件由于对弱关联信息进行了无意识加工, 所以僵局出现的时间可能更晚, 顿悟问题解决时间更快、解决率更高。

实验 5b 考察僵局后弱关联信息的内隐提示

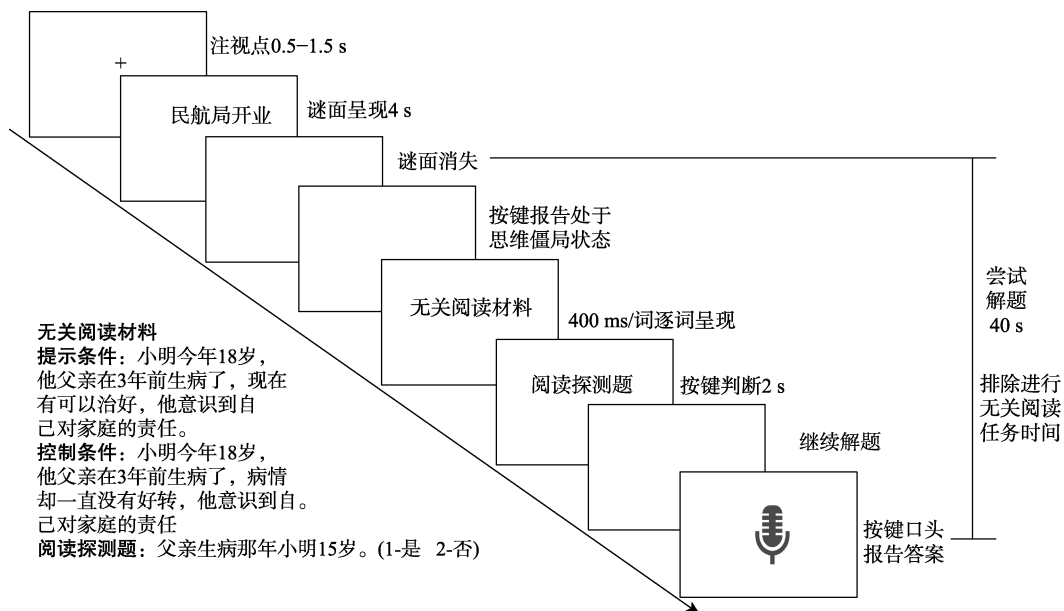


图 8 实验 5a 流程示意图

对顿悟问题解决的作用, 同样采用成语谜语任务, 实验设计为单因素组内设计, 自变量为提示的内容, 分别为与弱关联信息相关的提示条件或无关的控制条件。因变量为被试对谜题的解决情况。实验流程大体上同实验 5a。被试提前进行练习, 熟悉谜题的解法和实验的流程。正式实验中, 先在屏幕中央呈现一个注视点 0.5~1.5 s, 然后呈现谜面 4 s 后消失, 之后被试在 40 s 内尝试解题。在这个过程中, 要求被试按键报告自己出现思维僵局的时刻。在被试报告思维僵局后, 提示被试先进行阅读任务, 屏幕上逐词呈现与主任务无关的阅读材料, 然后让被试在 2 s 内对判断题进行按键判断。然后被试在剩余时间内继续解题。如果想到答案, 便立刻按键并口头报告想到的答案, 然后进入下一试次。

统计分析被试在两种条件下的解题率, 使用配对样本 t 检验考察提示条件与控制条件之间的差异。我们预期相比于控制条件, 在提示条件下被试的谜题解决率更高。

实验 6 考察 tDCS 刺激双侧颞叶对顿悟问题解决及其过程的影响。具体来说, 该实验采用经颅直流电刺激(tDCS)的手段人为改变个体颞叶的神经激活模式, 以此操纵个体对弱关联信息的无意识加工状态。同时采用 fMRI 记录被试经受 tDCS 刺激后解决问题时的脑活动, 一方面精确记

录电刺激对皮层活性的改变情况, 另一方面和实验4一样使用RSA考察被试解决问题时的信息表征变化情况。实验材料同实验4, 此外使用情绪状态自评量表(the self-assessment manikin scale, SAM, Bradley et al., 2008)测量被试进行电刺激后情绪的愉悦度及唤醒度, 该问卷共有两道题目, 需要被试对自身的情绪愉悦度和唤醒度进行9点评分, 分数越高表示程度越强; 使用tDCS刺激被试感受问卷(Brunoni et al., 2011)以评估被试在进行tDCS刺激过程中的躯体感觉, 该问卷包括“头皮痛”、“麻”等10道题目, 采用4点评分, 1分表示“轻微”, 4分表示“严重”。实验设计采用单因素3水平实验设计, 自变量为刺激方式(L-R+刺激/L+R-刺激/sham假刺激)。同时关注的探索性自变量包括有信息表征类型(强关联信息/弱关联信息/无效信息)、谜题解决情况(成功解决/未解决)和顿悟问题解决的不同时间阶段。因变量包括顿悟问题解决率、解决时间, 以及被试在顿悟问题解决不同阶段各脑区的BOLD信号激活情况、特定兴趣区的有效连接情况和与不同信息表征间的表征相似性水平。采用tDCS系统, 按照相应的刺激方式对被试的双侧颞叶进行tDCS刺激, 期间被试保持静息状态。10 min后结束电刺激, 被试填写情绪状态量表和电刺激感受问卷, 然后按照实验4正式实验任务的流程进行实验。实验流程如图9所示。

tDCS采用高精度经颅电刺激系统(Soterix medical, 美国), 施加的电流为1.5 mA, 刺激持续时长为10 min。刺激电极为5个Ag/AgCl高精度环形电极, 直径小于12 mm。使用10-20 EEG国际电极头皮定位系统, 参考Salvi等(2020)的研究

确定电极位置, 左右两侧颞叶中心电极分别位于T7和T8, 四周电极分别为FC5、FT9、TP9、CP5和FC6、FT10、TP10、CP6。四周电极的极性与中心电极相反, 形成完整回路。真刺激条件下, 电流强度在30 s内从0缓慢上升至1.5 mA, 随后维持在1.5 mA持续10 min, 之后在30 s内逐渐降为0。假刺激条件下, 电极放置位置与真刺激相同, 但电流强度仅在开始30 s内从0逐渐上升至1.5 mA, 接着便缓慢降为0, 被试佩戴电极片维持10 min后取下, 以使被试感受到和持续、真实电刺激有相同的轻微刺痛感, 并且难以区分。fMRI数据采集与分析同实验4。

我们预期相比于假刺激条件和L+R-刺激条件, L-R+刺激条件激活了右侧颞叶, 抑制了左侧颞叶, 可能会促进弱关联信息加工并抑制强关联信息加工, 有利于顿悟问题解决。行为结果表现为解决率更高、解决时间更短; 神经过程性指标上反映为, 被试更早期阶段神经活动的RDM与弱关联信息理论RDM的相似性显著更高; 并且被试颞叶和额叶之间的有效连接也更弱。

3.4 研究4: 执行功能对顿悟问题解决及其过程的调控作用

在研究3对无意识加工进行干预研究之后, 研究4则拟通过两个实验对个体的执行功能进行干预, 探究其对弱关联信息的无意识加工以及弱关联信息进入意识后的选择过程的影响。研究4包含实验7和实验8。

实验7拟对DLPFC施以阴极刺激, 从而降低执行功能的活跃程度, 进而考察其对其对弱关联信息加工的调控作用。与实验6类似, 实验7也同时采用fMRI, 考察tDCS刺激对关键脑区、脑

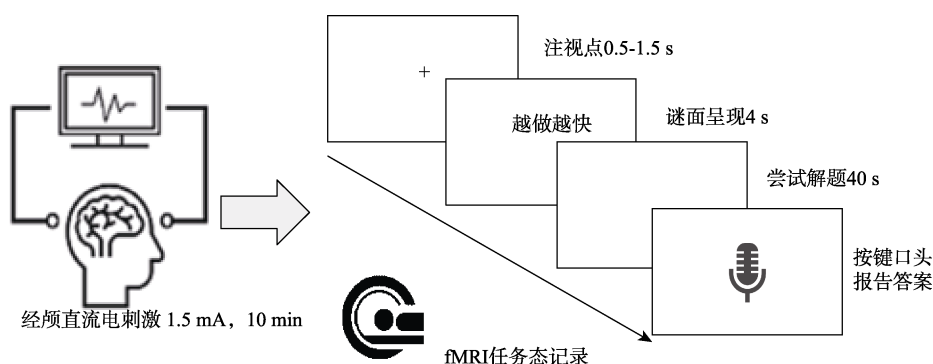


图9 实验6流程示意图

区间有效连接以及神经表征动态变化的作用,重点关注思维僵局形成到新表征产生的阶段。实验设计为单因素三水平实验设计,自变量为刺激方式(阴极刺激/阳极刺激/sham 假刺激),其他设计、任务、流程与实验 6 相同。tDCS、fMRI 的参数设置、分析同上。

我们预期相比于假刺激条件和阳极刺激条件,阴极刺激条件使 DLPFC 活跃度降低,可能会削弱对强关联信息的激活和对弱关联信息的抑制,有利于顿悟问题解决。行为结果表现为解决率更高、解决时间更短;神经过程性指标上反映为,被试更早期阶段神经活动的 RDM 与弱关联信息理论 RDM 的相似性显著更高;并且被试颞叶和额叶间的功能连接也更弱。

实验 7 关注了思维僵局到新表征形成的无意识加工阶段,实验 8 拟对 DLPFC 进行阳极刺激,借助成语谜语的答案选择范式和眼动追踪技术,考察执行功能对弱关联信息进入意识层面后的信息选择过程的影响。

本实验使用成语谜题答案选择任务,同时记录被试完成任务时的眼动模式特点,重点考察在问题解决后期执行功能的恢复是否对信息的选择过程有调控作用。采用两因素混合设计,被试间变量为刺激方式(阴极刺激/阳极刺激/假刺激),被试内变量为信息类型(弱关联信息/强关联信息/无关信息)。因变量为被试选择特定信息答案的比例、反应时,以及在解题过程中被试对特定答案兴趣区的注视情况,包括首次注视时间、平均注视时间的比例和瞳孔直径。实验采用成语谜题,同时为每一个谜题准备 4 个备选答案,其中包括 1 个弱关联答案、1 个强关联答案和 2 个无关答案。成语谜语答案选择任务及相关实验材料主要参考 Zhao 等(2013, 2014)以及黄福荣等(2013)的做法。主要实验材料仍然是成语谜语,但与自发解决的成语谜语任务不同的是,本实验任务为每个谜题准备了 4 个备选答案让被试选择,其中包括 1 个弱关联答案、1 个强关联答案和 2 个无关答案。该任务主要用来考察被试在问题解决后期,对强弱关联信息的灵活加工以及选择过程。所有备选答案通过预实验,由另一批不参与正式实验的被试经自由联想获得。如表 3 所示的例子,在成语谜语“越做越快”中,弱关联答案就是成语谜语的谜底“积劳成疾”,它与谜面之间存在内隐而非直

接的语义关联;强关联答案是“熟能生巧”,是被试通过自由联想生成频率最高的成语;无关答案是“察言观色”和“言简意赅”,是从被试根据其他谜题谜面生成的答案中选择的成语。

表 3 成语谜语答案选择任务材料举例

谜面	弱关联 答案	强关联 答案	无关 答案 I	无关 答案 II
越做越快	积劳成疾	熟能生巧	察言观色	言简意赅
民航局开业	有机可乘	开张大吉	刮目相看	急转直下
观光	一览无余	游山玩水	歌功颂德	至死不渝

参考黄福荣等(2013)的做法,实验在隔音的眼动实验室内完成。先让被试完成练习的试次,熟悉实验的流程和任务要求。然后被试进行眼动校准,校准通过后,对被试进行时长为 10 min 的电刺激,刺激结束后被试填写情绪状态量表和电刺激感受问卷。随后被试开始正式的答案选择任务。在正式实验中,在屏幕中央首先呈现一个 500 ms 的注视点,然后呈现谜面 4 s,之后谜面不消失,并且在谜面下方呈现 4 个备选答案(位置进行平衡),要求被试在 6 s 内尝试解题并选择答案。间隔 2 s 后,呈现下一道谜题,开始下一个试次。眼动仪在答案呈现时开始记录,在被试按键选择答案后停止记录。在每一道谜题呈现之前,都会进行一次漂移校正以保证眼动记录的准确性。实验流程如图 10 所示。

tDCS 参数设置同实验 7。眼动记录使用加拿大 SR 公司生产的 Eyelink 1000 型眼动仪,采样频率设置为 1000 Hz,采用瞳孔加角膜模式采集数据。呈现刺激的显示器大小为 21 英寸,刷新频率为 60 Hz,屏幕分辨率为 1024×768。在答案呈现界面划分出 5 个兴趣区:谜面、强关联答案、弱关联答案、无关答案 I、无关答案 II,主要关心的指标包括每个兴趣区域的首次注视时间、平均注视时间以及随时间变化的瞳孔直径大小。使用 SR 公司提供的 Dataviewer 数据分析软件导出各个兴趣区的眼动数据,然后使用 SPSS 统计分析软件进行处理。我们预期相比于假刺激组和阴极刺激组,阳极刺激 DLPFC 能显著提升被试选择弱关联答案的比例(同时降低选择强关联答案的比例)。此外,过程性指标表现为被试会更早注意到弱关联答案、在弱关联答案上分配的注意时间更多,且在解决问题前一刻有更大的瞳孔直径(减去瞳孔基线)。

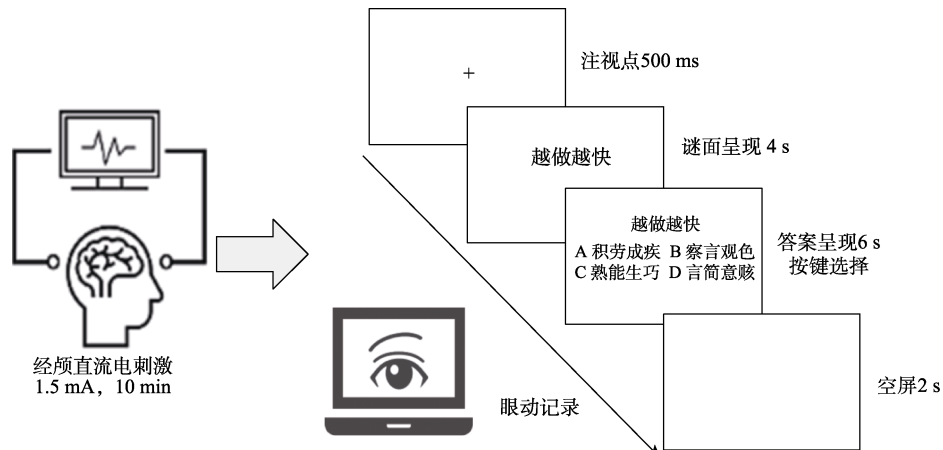


图 10 实验 8 流程示意图

4 理论建构与创新

顿悟(insight)研究历经百年发展,已逐步摆脱早期“灵光乍现”的朴素理解,转向利用多模态手段追踪其认知与神经轨迹,以期走出“黑箱”困境。然而,现有理论往往侧重于“表征转换”或“无意识加工”的单一视角,对于二者如何协同、时序推进以及如何受执行功能调节等深层机制,仍缺乏一个统一的理论框架。本研究在此基础上,尝试提出一个动态整合模型,将顿悟定义为一个从“信息积累”到“阈值突破”、从“控制退让”到“重构验证”的连续心理轨迹,而非瞬时的“跳跃事件”。

本文新提出的理论模型认为,当问题情境首次呈现时,个体倾向于依据过往经验迅速构建初始表征。此时,强关联信息在意识层面占据优势地位,而弱关联信息则受到主动抑制处于无意识层面(赵庆柏 等, 2015)。在此阶段,执行功能表现出高度活跃状态,其作用类似于“守门人”,通过持续抑制干扰信息并维持目标导向,确保显性搜索路径的稳定性(Ovando-Tellez et al., 2022; 邢强等, 2013)。在这一阶段执行功能发挥的作用类似于其在认知控制、决策制定和工作记忆等方面发挥关键作用(Fleming et al., 2020; Sanghavi et al., 2023),通过充分调动执行功能以保证对目标任务投入足够的资源。随着尝试问题解决反复受挫,认知资源逐渐耗竭,执行控制功能显著减弱。这导致对弱关联信息的抑制解除,使得无意识系统能够以并行、扩散的方式激活远距离语义节点(李子逸 等, 2022; Ohkuma et al., 2025)。无意识加工

在顿悟中扮演着重要角色,尤其是在弱关联信息积累和阈值突破阶段。右侧颞叶被认为是远距离语义联结的“发电机”,其激活模式决定了新颖信息能否被提取。当 DLPFC 的抑制作用减弱时,右侧颞叶的功能耦合增强,促进了无意识信息的整合,最终导致顿悟体验。在 Graesser 和 D'Mello (2012)的情绪动态理论模型中,当个体遇到“僵局”时,会从平衡状态进入不平衡状态,进而可能导致挫败感,甚至脱离任务(Zhang et al., 2024)。这种僵局便于后续无意识加工发挥作用,在意识层面以下通过信息的激活、扩散寻找替代解决方案的时机(Tan et al., 2015)。值得注意的是,这种激活并非随机的,而是受到问题语境线索的微弱引导,在意识雷达之外缓慢积累“证据”(Leszczynski et al., 2017; Valba et al., 2021)。当这些弱关联信息的总体激活强度最终超越意识阈值时,个体便会产生所谓的“啊哈”体验,旧有表征瞬间瓦解,新的语义结构在极短时间内得到重构(Jung-Beeman et al., 2004; Shen et al., 2018)。此后,执行功能迅速恢复并作为“检验者”介入,评估新方案的合理性与适用性,从而完成从“发现”到“确认”的闭环(Beatty et al., 2015)。

本研究框架将“信息积累-阈值突破”机制引入顿悟解释,赋予其可度量、可建模的时间维度,打破了顿悟“突发-不可预测”的传统认知。模型明确了无意识加工的动态轨迹,指出关键的弱关联信息并非初始即现,而是在强关联路径失效后,于无意识中经历激活、扩散与积累,直至突破阈限、引发顿悟。此外,本研究框架进一步明确了

执行功能并非持续促进创造力的观点,而是在顿悟的不同阶段扮演着“守门-退让-整合”的多重角色,以不同的方式在各个阶段支持顿悟问题解决,其活性曲线可能呈现“U”形:过高的执行功能会压制新颖信息的出现,而过低则无法完成最终的整合。因此,只有“先退后进”的动态调节才能促进顿悟的发生。

本研究提出的将无意识信息积累、执行功能阶段调控以及神经环路因果证据整合于同一框架,旨在回答了“弱关联信息如何突破意识屏障”的机制问题,并阐明“何时抑制、何时增强”的调控逻辑,为顿悟研究从描述走向预测、从实验室走向教育与创新实践奠定了理论与方法基础。未来的研究可以在计算建模、纵向发展以及个体化干预等方面继续深化,检验、推动该模型的理论运用。

参考文献

- 陈岩,李瑛,刘冠雄,于全磊,梁正,陈石,赵庆柏. (2026). 探索顿悟问题解决的微观动态神经加工模式. *心理学报*, 58(4), 634-650.
- 郭芳,赵庆柏,胡丽霞,费昕媛,陈石,周治金. (2019). 执行功能子成分对创造性思维不同认知加工阶段的影响. *心理科学*, 42(4), 790-797.
- 黄福荣,周治金,赵庆柏. (2013). 汉语成语谜语问题解决中思路竞争的脑电研究. *心理学报*, 45(1), 35-46.
- 李子逸,张泽,张莹,罗劲. (2022). 创造性思维的酝酿效应. *心理科学进展*, 30(2), 291-307.
- 邢强,孙海龙,占丹玲,胡婧,刘凯. (2017). 执行功能对言语顿悟问题解决的影响:基于行为与 ERPs 的研究. *心理学报*, 49(7), 909-919.
- 邢强,张忠炉,孙海龙,张金莲,王菁. (2013). 字谜顿悟任务中限制解除和组块分解的机制及其原型启发效应. *心理学报*, 45(10), 1061-1071.
- 张庆林,肖崇好. (1996). 顿悟与问题表征的转变. *心理学报*, 28(1), 30-37.
- 赵庆柏,李松清,陈石,周治金,成良. (2015). 创造性问题解决的动态神经加工模式. *心理科学进展*, 23(3), 375-384.
- 赵庆柏,魏琳琳,李瑛,周治金,赵黎莉,唐磊. (2017). 新颖语义联结形成的右半球优势效应. *心理学报*, 49(11), 1370-1382.
- 朱新秤,李瑞菊,周治金. (2009). 谜语问题解决中线索的作用. *心理学报*, 41(5), 397-405.
- Beaty, R. E., Benedek, M., Barry Kaufman, S., & Silvia, P. J. (2015). Default and executive network coupling supports creative idea production. *Scientific Reports*, 5(1), 10964.
- Bieth, T., Ovando-Tellez, M., Lopez-Persem, A., Garcin, B., Hugueville, L., Lehongre, K., ... Volle, E. (2024). Time course of EEG power during creative problem-solving with insight or remote thinking. *Human Brain Mapping*, 45(1), e26547.
- Bilalić, M., Graf, M., Vaci, N., & Danek, A. H. (2019). The temporal dynamics of insight problem solving – restructuring might not always be sudden. *Thinking & Reasoning*, 27(1), 1-37.
- Bowden, E. M., & Jung-Beeman, M. (2007). Methods for investigating the neural components of insight. *Methods*, 42(1), 87-99.
- Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4), 602-607.
- Brunoni, A. R., Amadera, J., Berbel, B., Volz, M. S., Rizzierio, B. G., & Fregni, F. (2011). A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, 14(8), 1133-1145.
- Christoff, K., Gordon, A. M., Smallwood, J., Smith, R., & Schooler, J. W. (2009). Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(21), 8719-8724.
- Dijksterhuis, A., & Nordgren, L. F. (2006). A theory of unconscious thought. *Perspectives on Psychological Science*, 1(2), 95-109.
- Fleming, C. B., Stevens, A. L., Vivero, M., Patwardhan, I., Nelson, T. D., Nelson, J. M., ... Mason, W. A. (2020). Executive control in early childhood as an antecedent of adolescent problem behaviors: A longitudinal study with performance-based measures of early childhood cognitive processes. *Journal of Youth and Adolescence*, 49(12), 2429-2440.
- Graesser, A. C., & D'Mello, S. (2012). Emotions during the learning of difficult material. In B. H. Ross (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 183-225). Elsevier Academic Press.
- Haavold, P. Ø., & Sriraman, B. (2022). Creativity in problem solving: Integrating two different views of insight. *ZDM-Mathematics Education*, 54(1), 83-96.
- Henok, N., Vallée-Tourangeau, F., & Vallée-Tourangeau, G. (2020). Incubation and interactivity in insight problem solving. *Psychological Research*, 84(1), 128-139.
- Huang, F., Zhao, Q., Zhou, Z., & Luo, J. (2019). People got lost in solving a set of similar problems. *NeuroImage*, 186, 192-199.
- Jung-Beeman, M., Bowden, E. M., Haberman, J., Frymiare, J. L., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., Reber, P. J., & Kounios, J. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biology*, 2(4), E97.
- Kizilirmak, J. M., Thuerich, H., Foltz-Schoofs, K., Schott, B. H., & Richardson-Klavehn, A. (2016). Neural correlates of learning from induced insight: A case for reward-based episodic encoding. *Frontiers in Psychology*, 7, 1693.
- Knoblich, G., Ohlsson, S., & Raney, G. E. (2001). An eye

- movement study of insight problem solving. *Memory & Cognition*, 29(7), 1000–1009.
- Leszczynski, M., Chaieb, L., Reber, T. P., Derner, M., Axmacher, N., & Fell, J. (2017). Mind wandering simultaneously prolongs reactions and promotes creative incubation. *Scientific Reports*, 7(1), 10197.
- Liu, D., Hao, L., Han, L., Zhou, Y., Qin, S., Niki, K., Shen, W., Shi, B., & Luo, J. (2023). The optimal balance of controlled and spontaneous processing in insight problem solving: fMRI evidence from Chinese idiom guessing. *Psychophysiology*, 60(7), e14240.
- Liu, G., Ga, R., Wang, C., Hu, H., Liang, Z., Yu, Q., ... Zhao, Q. (2025). Cathodal Stimulation on Left Dorsolateral Prefrontal Cortex Facilitates Restructuring Process Underlying Insight Problem Solving. *Creativity Research Journal*, <https://doi.org/10.1080/10400419.2025.2564066>
- Lopez, K. L., Monachino, A. D., Morales, S., Leach, S. C., Bowers, M. E., & Gabard-Durnam, L. J. (2022). HAPPILEE: Happe in low electrode electroencephalography, a standardized pre-processing software for lower density recordings. *NeuroImage*, 260, 119390.
- Luft, C. D. B., Zioga, I., Banissy, M. J., & Bhattacharya, J. (2017). Relaxing learned constraints through cathodal tDCS on the left dorsolateral prefrontal cortex. *Scientific Reports*, 7(1), 2916.
- Markina, P. N., & Vladimirov, I. (2019). Executive function role on a stage of impasse in insight problem solving. *Psychology. Journal of Higher School of Economics*, 16(3), 562–570.
- Meiron, O., & Lavidor, M. (2013). Unilateral prefrontal direct current stimulation effects are modulated by working memory load and gender. *Brain Stimulation*, 6(3), 440–447.
- Michel, C. M., Bréchet, L., Schiller, B., & Koenig, T. (2024). Current state of EEG/ERP microstate research. *Brain Topography*, 37(2), 169–180.
- Michel, C. M., & Koenig, T. (2018). EEG microstates as a tool for studying the temporal dynamics of whole-brain neuronal networks: A review. *NeuroImage*, 180(Pt B), 577–593.
- Murray, M. A., & Byrne, R. M. (2005). Attention and working memory in insight problem solving. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 27, 1571–1575.
- Ohkuma, R., Kurihara, Y., Takahashi, T., & Osu, R. (2025). Neural dynamics of constraint relaxation and problem representation changes in single-trial insight problem solving: An fNIRS study. *Behavioural Brain Research*, 495, 115813.
- Oostenveld, R., Fries, P., Maris, E., & Schoffelen, J. M. (2011). Fieldtrip: Open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011, 156869.
- Ovando-Tellez, M., Kenett, Y. N., Benedek, M., Bernard, M., Belo, J., Beranger, B., Bieth, T., & Volle, E. (2022). Brain connectivity-based prediction of real-life creativity is mediated by semantic memory structure. *Science Advances*, 8(5), eab14294.
- Poulsen, A. T., Pedroni, A., Langer, N., & Hansen, L. K. (2018). Microstate EEGlab toolbox: An introductory guide. *Biorxiv*, 289850.
- Sanghavi, H., Zhang, Y., & Jeon, M. (2023). Exploring the influence of driver affective state and auditory display urgency on takeover performance in semi-automated vehicles: Experiment and modelling. *International Journal of Human-Computer Studies*, 171, 102979.
- Savic, B., Müri, R., & Meier, B. (2019). High definition transcranial direct current stimulation does not modulate implicit task sequence learning and consolidation. *Neuroscience*, 414, 77–87.
- Seitzman, B. A., Abell, M., Bartley, S. C., Erickson, M. A., Bolbecker, A. R., & Hetrick, W. P. (2017). Cognitive manipulation of brain electric microstates. *NeuroImage*, 146, 533–543.
- Shen, W., Tong, Y., Li, F., Yuan, Y., Hommel, B., Liu, C., & Luo, J. (2018). Tracking the neurodynamics of insight: A meta-analysis of neuroimaging studies. *Biological Psychology*, 138, 189–198.
- Siegler, R. S. (2000). Unconscious insights. *Current Directions in Psychological Science*, 9(3), 79–83.
- Sio, U. N., & Ormerod, T. C. (2009). Does incubation enhance problem solving? A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 135(1), 94–120.
- Smeeckens, B. A. (2013). The role of working memory capacity and mind wandering in creativity and insight. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 33(1), 28–45.
- Tal, A., Schechtman, E., Caughran, B., Paller, K. A., & Davachi, L. (2024). The reach of reactivation: Effects of consciously triggered versus unconsciously triggered reactivation of associative memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(10), e2313604121.
- Tan, T., Zou, H., Chen, C., & Luo, J. (2015). Mind wandering and the incubation effect in insight problem solving. *Creativity Research Journal*, 27(4), 375–382.
- Tarailis, P., Koenig, T., Michel, C. M., & Griškova-Bulanova, I. (2024). The functional aspects of resting EEG microstates: A systematic review. *Brain Topography*, 37(2), 181–217.
- Thomas, L. E., & Lleras, A. (2009). Swinging into thought: directed movement guides insight in problem solving. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(4), 719–723.
- Valba, O., Gorsky, A., Nechaev, S., & Tamm, M. (2021). Analysis of English free association network reveals mechanisms of efficient solution of remote association tests. *PloS One*, 16(4), e0248986.
- Wallas, G. (1926). *The art of thought*. New York, NY: Harcourt Brace.
- Wang, X., Wu, W., Ling, Z., Xu, Y., Fang, Y., Wang, X., ...

- Bi, Y. (2018). Organizational principles of abstract words in the human brain. *Cerebral Cortex*, 28(12), 4305–4318.
- Wiley, J., & Danek, A. H. (2024). Restructuring processes and Aha! experiences in insight problem solving. *Nature Reviews Psychology*, 3(1), 42–55.
- Yu, Y., Oh, Y., Kounios, J., & Beeman, M. (2022). Dynamics of hidden brain states when people solve verbal puzzles. *NeuroImage*, 255, 119202.
- Zanesco, A. P., Denkova, E., & Jha, A. P. (2021). Self-reported mind wandering and response time variability differentiate prestimulus electroencephalogram microstate dynamics during a sustained attention task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 33(1), 28–45.
- Zhang, Y., Paquette, L., & Bosch, N. (2024). Conditional and marginal strengths of affect transitions during computer-based learning. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 35(3), 1317–1345.
- Zhao, Q., Guo, F., Chen, X., Chen, Y., Liang, Z., Yu, Q., & Zhou, Z. (2025). The advantage of novel solutions on subsequent memory in insight problems. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 19(5), 1111–1123.
- Zhao, Q., Zhou, Z., Xu, H., Chen, S., Xu, F., Fan, W., & Han, L. (2013). Dynamic neural network of insight: A functional magnetic resonance imaging study on solving Chinese ‘chengyu’ riddles. *PLoS One*, 8(3), e59351.
- Zhao, Q., Zhou, Z., Xu, H., Fan, W., & Han, L. (2014). Neural pathway in the right hemisphere underlies verbal insight problem solving. *Neuroscience*, 256, 334–341.

From unconscious to conscious: Executive deactivation drives information replacement in insight problem-solving

ZHAO Qingbai¹, CHEN Yan¹, ZHOU Zhijin¹, CHEN Shi^{2,3}

(¹ Key Laboratory of Adolescent Cyberpsychology and Behavior (CCNU), Ministry of Education;

Key Laboratory of Human Development and Mental Health of Hubei Province; School of Psychology,

Central China Normal University, Wuhan 430079, China) (² Hubei Health Industry Development Research Center,

School of Medical Humanities, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China)

(³ Hubei Shizhen Laboratory, Wuhan 430000, China)

Abstract: Insight represents a hallmark of creative thinking. While prior theoretical and empirical work has emphasized the critical role of unconscious processing, the specific dynamics of how unconscious processes operate during insight problem-solving remain largely unexplored. Key questions persist: How do weakly associated pieces of information transition from unconscious to conscious processing? What role does executive function play in this process? To address these issues, this project proposes a cognitive model that highlights the dynamic nature of unconscious processing and the regulatory function of executive control. Using a multi-method approach—including behavioral measures, eye-tracking, EEG, and fMRI—we will examine the conscious and unconscious dynamics during insight. Furthermore, behavioral interventions and tDCS will be applied to investigate how the deactivation of executive function may facilitate the processing of weak associations. This research aims to uncover the subconscious mechanisms of creative problem-solving and provide a scientific basis for developing interventions that enhance creativity.

Keywords: insight, problem solving, unconscious processing, executive function, unconscious information processing model