

探索顿悟问题解决的微观动态神经加工模式*

陈岩¹ 李瑛¹ 刘冠雄¹ 于全磊¹
梁正^{1,2} 陈石^{3,4} 赵庆柏¹

(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清华大学心理与认知科学系, 北京 100084)
(³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)
(⁴湖北时珍实验室, 武汉 430000)

摘要 研究采用脑电微状态分析, 探索复合远距离联想任务中顿悟问题解决的微观动态神经加工模式。主要结果表明: 在问题呈现初期, 相比于未解决条件, 顿悟解决和非顿悟解决均表现出更高频率的微状态 B (与视觉加工相关)以及更多的微状态 B 与 D (与执行功能网络有关)的转换。相比于非顿悟解决条件, 顿悟解决在中、后期则表现出更高频率的微状态 C (与默认模式网络有关), 且微状态 A (与感知、听觉加工相关)、C 和 D 三者存在较高的相互转移概率。本研究初步考察了顿悟问题解决的微观动态神经加工模式, 为揭示顿悟问题解决中执行功能调控下多种认知活动的复杂交互过程提供了电生理学依据, 为无意识加工可能随顿悟问题解决进程如何变化提供了一定的启示。

关键词 顿悟问题解决, 微状态, 无意识加工

分类号 B842

1 引言

解决问题是个体适应生活的重要方式, 它能体现我们现有知识和经验在变化的情境中的有效运用。然而, 并非所有问题都能通过先前确立的规则轻易解决。有时个体可能会陷入僵局, 直到问题突然迎刃而解, 并伴随着积极的情感体验, 这种问题解决的方式被称为顿悟问题解决(Kohler, 1985)。作为一种典型的创造性思维形式, 顿悟问题解决涉及多种认知过程的交互且极具复杂性(Haavold & Sriraman, 2022), 其认知神经过程受到了研究者的广泛关注。

与其他形式的问题解决类似, 顿悟问题解决也具有问题解决的一般性过程, 包括理解问题、根据熟悉的策略在问题表征空间内搜索信息、解决问题

以及评估解决方案等(Haavold & Sriraman, 2022)。在此过程中, 个体知识经验中与问题最直接相关的信息被激活, 并根据问题解决的过程进一步地激活和扩散。图形类问题解决基于对刺激物理特征的视觉处理, 主要激活顶叶皮层、枕叶皮层、后颞叶皮层和小脑等视觉空间脑区(Lu & Singer, 2023; Rominger et al., 2018); 言语类问题解决主要涉及处理听觉或语义信息, 诱发颞中回、颞上回和额下回的激活(Aziz-Zadeh et al., 2009; Qiu et al., 2010)。这些广泛激活的视觉空间或者听觉语义信息会在执行功能的调控下完成选择与整合(Beaty et al., 2015; Lin et al., 2022; Lloyd-Cox et al., 2022), 以满足问题解决的需求。

然而, 与有逻辑、有意识的问题解决不同, 顿悟问题解决被认为是一种难以用言语描述的创造

收稿日期: 2025-05-20

* 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: 赵庆柏, E-mail: zqbznr@ccnu.edu.cn; 陈石, E-mail: chs22@hucm.edu.cn; 梁正, E-mail: liangzheng@mails.ccnu.edu.cn

性过程。在此过程中,人们通常会陷入僵局无法解题,而思维僵局的打破常常发生在人们甚至没有意识到自己正在思考问题的时候(Haavold & Sriraman, 2022)。从这个角度来说,顿悟问题解决的关键过程是一种相对于有意识注意的过程,在此期间个体虽然在继续对问题进行加工,但缺乏对自己正在试图解决问题的主观意识,是一种意识阈限之下进行的认知活动,因此称作无意识加工。就言语类顿悟问题解决的加工内容而言,大脑在无意识状态下可能进行了基于问题词汇进行的远距离联想扩散(Dijksterhuis & Nordgren, 2006; Gilhooly, 2016)、语义记忆的探索与组合(Gao & Zhang, 2014)、抑制不相关信息(Liu et al., 2023)、有效信息的激活和重组(Liu et al., 2024)等,最终形成新的联结以及解决方案的突然涌现(赵庆柏等, 2017; Fleck & Kounios, 2009)。由此可见,无意识加工对理解顿悟问题解决具有重要意义。然而,现有研究对这一过程的描述和探查仍然有限,多采用在思维僵局后设置分心任务或探测任务的方法来探究无意识加工在顿悟问题解决中的作用(Leszczynski et al., 2017; Tan et al., 2015)。尽管这些研究为无意识加工促进顿悟问题解决提供了行为结果支持,但它们并未直接或间接地测量无意识加工过程,而且现实情境中的顿悟并不总是与分心的情境相关联。相对地, Jung-Beeman等(2004)未通过分心任务或探测任务来研究顿悟过程,而是直接测量被试在复合远程联想任务(Compound Remote Associates, 随后简称 CRA)中的脑电活动。他们的研究结果发现,在顿悟解决方案产生前的 0.30 s 出现了高频(gamma-band)神经活动的迸发。他们认为这反映了与顿悟解决方案相关的认知加工从无意识状态到有意识状态的突然转变。然而,在这种突然转变之前,无意识加工是否在随着问题解决的过程发生动态地变化? Beeman等人的研究并未回答这个问题。

如上所述,顿悟问题解决过程可以视为一个包含多个复杂成分的综合时间序列(Haavold & Sriraman, 2022; Shen et al., 2018)。在问题解决初期,它会像其他问题解决那样,主要涉及对视觉空间或听觉语义等多种信息进行提取、选择和整合;到思维僵局阶段,信息加工则会从意识上转为意识下加工;而在顿悟解决的前夕,大脑会在很短的时间内以复杂的、无意识的方式完成认知过程的整合与部署。由于在自然状态下顿悟问题解决的过程是不可控的,且顿悟解决具有突发性和瞬时性(罗劲, 2004;

Benedek et al., 2019),因此需要在非常精细的时间尺度上进行测量才能了解多种认知过程是如何迅速变化和组合以支持顿悟问题解决的。

事件相关电位(ERP)被广泛用于探究顿悟问题解决的认知过程。以往研究主要探索了顿悟问题解决可能存在的特定成分。例如,顿悟问题解决的思维僵局阶段出现了 P2 成分,被认为与元认知有关,反映了早期元认知对后续注意力分配过程的调节(沈汪兵等, 2012)。在 300~500 ms 之间,顿悟问题解决会诱发一个负向的 ERP 成分(N320、N350、N380、N400),定位于前扣带回,反映了旧思维与新思维之间更大的认知冲突(Mai et al., 2004; Wang et al., 2009)。在相对较晚的阶段,顿悟问题解决被观察到在右侧额区和颞区域诱发一个晚期正向成分 LPC/P600。该成分通常被认为反映了语义信息整合(Brouwer & Hoeks, 2013)。在创造性语言任务(包括顿悟问题解决)中,这一成分位于海马旁回或分布在右侧颞叶区域,被认为反映了新颖语义关联的形成(赵庆柏等, 2015; 赵庆柏等, 2017)。以上结果支持了顿悟的阶段观和过程理论,并为顿悟问题解决中存在某些关键认知过程提供了电生理学证据。然而,这些研究主要关注顿悟问题解决的链式过程,比如从问题表征到思维僵局的形成,或者从僵局形成到思维定势打破。这类研究无法解释顿悟问题解决是一个迭代演进过程的基本观点(Bilalić et al., 2021; Huang et al., 2019; Shen et al., 2018)。

近年一项研究创造性地使用了隐马尔可夫模型(HMM),探究的顿悟问题解决任务中不同隐藏状态的迭代(Yu et al., 2022)。该研究将完成 CRA 任务时的连续 EEG 信号可以划分为代表不同频段 7 种大脑状态地形图,结果发现代表 alpha 频段的大脑状态在顿悟问题解决过程中起着重要作用,并且这一作用会随着问题解决的时间进程而动态变化。该研究再次验证了先前关于 alpha 频段在顿悟问题解决起关键作用的论断(Fink et al., 2009; Zhou et al., 2018),并描述了频段与解决策略、解决过程之间的时间动态关系。然而,这项研究并未揭示这些状态与顿悟问题解决相关的脑区或脑网络之间的对应关系,顿悟问题解决所涉及的认知过程以及相互作用无法得到更直观地阐释。

EEG 微状态分析可作为一种工具来探究这些问题。除了 EEG 本身的时间优势外,该方法还能提供一定的空间信息。微状态原理认为,大脑的自发

活动并非完全连续且随机的,而是能够在相对较短的时间内被划分为具有一定认知意义的离散地形图(Lehmann et al., 1987; Lehmann et al., 2009; Koenig et al., 2002)。微状态分析通常分为任务态分析和静息态分析。任务态分析通常与事件相关电位相结合。在确定 ERP 成分后,可以对不同成分的微状态时间序列进行分析,以探究特定认知过程中 ERP 成分的稳定性及其他特征(Schiller et al., 2016)。静息态分析则是通过聚类的方式将所有时间点分类为若干类别(最常见的聚类数量为 4 至 6 个类别),并以时间序列的形式表示出来。总的来说,这些聚类所形成的地形图在不同研究中高度相似,能够解释大约 65%~85%的脑电图活动。已有研究发现,微状态拓扑结构与从功能性磁共振成像(fMRI)中获得的大规模静息态脑网络之间存在一定的对应关系。例如,微状态 A 是一种右额叶至左后叶的地形图,脑电源定位主要显示颞叶皮层和听觉网络的激活(Bréchet et al., 2019; Britz et al., 2010; Custo et al., 2017),微状态 B 则呈现出右额叶至左后叶的地形图(Koenig et al., 2002),在涉及视觉空间和图像处理的活动中明显可见(Britz et al., 2010; Custo et al., 2017),微状态 C 是一种前后较为对称的地形图,反映了内部心理活动、自我反思以及注意力在任务上的脱离,并在无任务状态下更为活跃(Bréchet et al., 2019; Custo et al., 2017; Croce et al., 2018; Zanesco et al., 2021),而微状态 D 表现为额中央最大值的地形图,与执行功能和注意力控制有关,在认知任务中表现更为突出(Britz et al., 2010; Michel et al., 2024),这些模式在不同年龄段、不同意识状态乃至病理状态下都保持着相当的一致性(Betz et al., 2012; Britz et al., 2010; Musso et al., 2010)。需要注意的是,已知的地形图谱中包含但不限于上述类别,需要根据数据聚类进一步分析和判断。目前,还有研究将静息微状态分析应用于任务启动的自发思维中,比较由自传体记忆和计算任务引发的微状态(Bréchet et al., 2019)。这类研究适当拓展了静息微状态的应用范围,有助于研究毫秒级时间序列中大脑网络的动态组织,特别是对于需要长时间在一定引导下自发思考的任务,比如顿悟问题解决任务。

虽然都是将连续记录大脑活动的神经成像数据中分离成离散的大脑状态,但 HMM 和微状态在能够回答的问题上存在一定的差异。HMM 本质上注重时间与状态变化之间的关系,可以看出状态的

时间动态性。而微状态(尤其是静息态下的微状态)是在给定时间窗口内对最可能出现的状态进行枚举,注重状态及其可能对应的认知过程之间是如何表现及相互作用的。静息态的微状态地形图在多种研究中有相对稳定性,被证明与一些特定的认知活动有关。虽然无法在时间结构上与 HMM 比较,但微状态与认知活动之间的联系更为直接,这对于理解顿悟问题解决这种包含了复杂认知过程的任务更加有益,此外,转换概率指标也更好地描述了状态之间的相互作用模式。特别地,默认模式网络在以往的磁共振研究中被认为代表了顿悟问题解决过程中脱离当前任务注意力的无意识加工(Darsaud et al., 2011; Ritter & Dijksterhuis, 2014),而微状态 C 反映了默认模式网络的一部分,其各项参数与 alpha 波段活动呈显著正相关(Hill et al., 2023),而 alpha 波段正是以往顿悟问题解决相关研究中报告过具有重要作用的频段(Fink et al., 2009; Yu et al., 2022)。此外,心智游移状态下的微状态 C 与专注任务状态下的微状态 D、E 关联模式与 fMRI 研究中反相关网络(例如默认模式网络和执行控制网络、凸显网络)之间的相互作用相似(Zanesco et al., 2021)。因此,这可能为我们提供一个窗口,以探索无意识加工在顿悟问题解决中的作用及其动态变化。

本研究将脑电微状态分析运用于探究完成 CRA 任务时的脑活动,旨在明晰顿悟问题解决中可能存在的认知过程,如基本的感知加工过程、执行功能等,以及可能代表了无意识加工的大脑状态是否特异性地出现在顿悟问题解决中。进一步地,考察由大脑状态所反映的认知过程是如何在解题过程中相互影响的。具体来说,研究记录了被试在尝试解决 CRA 问题时的脑电活动,并使用微状态阐释了不同解决类型(顿悟解决、非顿悟解决和未解决)的试次在 3 个时间阶段(问题呈现初始阶段、解决过程阶段、做出反应阶段)的地形图差异。鉴于顿悟问题解决的开放性和多维度特征,本研究期望首先能够描述在顿悟问题解决的多个阶段中有哪些认知过程的参与。作为问题解决的一种形式,我们预期顿悟问题解决需要执行功能的参与,可能表现出微状态 D 更长的平均持续时间、出现频率、与其他状态之间更频繁的转换;第二,比起非顿悟问题解决,顿悟问题解决存在无意识加工过程,因此在解题过程中可能会出现更长平均持续时间、更高出现频率和与其他状态转换更多的微状态 C;此外,鉴于 Jung-Beeman 等人(2004)的研究中报告在

问题被顿悟解决前约 0.30 s 观察到 γ 频段的突然增强,认为这可能代表了顿悟问题解决进程中从无意识状态到意识状态的骤然转变,本研究将验证这一结果的稳定性,考察顿悟问题解决中是否存在同样的神经响应模式。

2 方法

2.1 被试

假设效应量为 0.25, α 水平为 0.05, 统计功效为 0.80, G*Power 计算得出重复测量方差分析的总样本量为 15。考虑到以往使用 CRA 任务的研究表明该任务具有一定的挑战性(Bowden & Jung-Beeman, 2003; Jung-Beeman et al., 2004; Yu et al., 2022), 为保证后续统计分析有足够可用的样本量, 本研究招募了尽可能多的被试(42 名), 随后由主试审查了被试的英语水平资质(雅思 ≥ 7 分或托福 ≥ 95 分或主修专业为英语且成绩 ≥ 80 分), 并要求被试完成一份自我评估问卷——中国英语语言能力标准问卷(潘鸣威等, 2019)。最终, 37 名右利手的以英语为第二语言的中文母语被试(平均年龄 21.20 岁, 17 名女性)满足要求并自愿参与了实验。在实验正式开始前告知了所有被试实验流程, 并签署了知情同意书, 实验结束后获得了相应的报酬。本研究虽为英语实验, 但只涉及单词水平, 研究所招募的二语被试英语水平远高于任务需求。

2.2 实验材料

采用复合距离联想(CRA)测试作为实验材料(Bowden & Jung-Beeman, 2003), 该测试在屏幕上显示的 3 个词(cottage, swiss, cake), 要求被试想出一个答案词, 使其能分别与给出词汇组合形成短语或复合词, 例如: cheeses (Swiss cheese 瑞士奶酪; cheese cake 芝士蛋糕; cottage cheese 乳酪)。这种材料已被广泛用于探索言语类的顿悟问题解决(Jung-Beeman et al., 2004; Yu et al., 2022)。

2.3 实验流程

在实验开始前, 由主试向被试讲解“顿悟解决”

与“非顿悟解决”的标准, 该标准基于先前顿悟研究中对两种解决方案类型的定义, 以确保被试清楚地理解不同解决方案所指代的含义(Danek et al., 2014; Jung-Beeman et al., 2004)。需要指出的是, 在相对早期的顿悟问题解决研究中, 某一类较为困难的问题被直接设定为顿悟问题, 当被试能成功解决问题就被视作发生了顿悟。不难发现, 这种将某一类问题的解决直接等同于顿悟的操纵并不合理, 并不是所有问题解决者都有类似的知识经验和解题思路, 一道比较困难的题目, 有可能引发问题解决者的顿悟体验, 也可能不会。所以本研究首先使用近年来较为常用的方式来分类顿悟与非顿悟, 即根据被试的主观报告进行分类。鉴于本研究未在指导语中引导被试有倾向地选择某一类策略回答问题, 本研究认为通过不同策略解题、并客观评价自己的主观体验是可取的。实验采用 E-prime 2.0 软件编程, 首先, 屏幕会显示 1 s 的“Ready?”随后一个空白屏呈现 1 s, 以集中被试注意力。然后, 被试会看到三个问题词并列地出现在屏幕上, 并要求被试生成一个答案词, 该词可以与这三个问题词组合成一个熟悉的复合词或短语。每个问题最多 15 s 解决时间, 根据先前研究, 该时长可以在试次较多的情况下较好地平衡作答正确率和反应时长(Erickson et al., 2018; Yu et al., 2022)。被试在想到答案后应立即按下“K”键, 屏幕上将出现“Solution?”要求被试口头汇报答案, 由主试进行记录, 并用鼠标的左右键报告解决问题的方法(顿悟/非顿悟), 按键方式在被试间进行平衡。实验流程如图 1 所示, 图中“S”表示刺激出现的时刻, “R”表示被试需要在刺激呈现后的 15 s 内作出反应, 在此期间被试未反应则标记为未解决, 程序在刺激呈现超过 15 s 后自动跳转至一个持续 1 s 的十字空屏, 随后开始下一道题。实验包括 10 个练习试次和 134 个正式试次, 主试在确认被试能够在练习试次中理解任务并正确分类顿悟与非顿悟作答后开始正式实验。

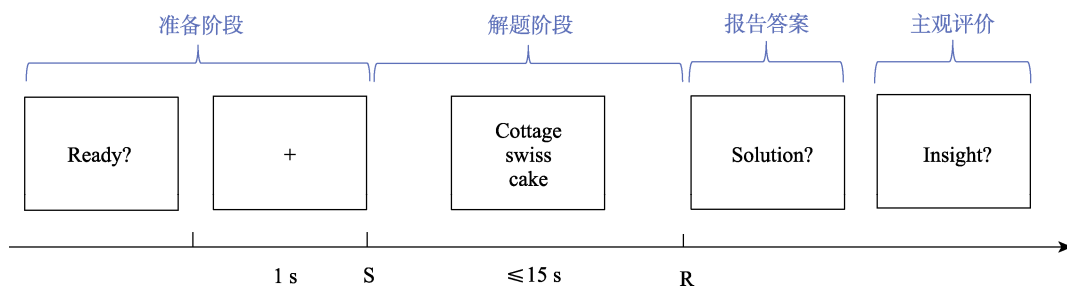


图1 实验流程图(蓝字为解释部分, 在正式实验中不呈现)

2.4 数据采集和预处理

使用 BrainAmp MR64 系统(德国慕尼黑 Brain Products 公司)进行 EEG 数据记录,该系统采用弹性帽内置 64 个电极,电极位置依据扩展的国际 10-20 系统分布。接地电极 GND 和在线参考电极 REF 分别位于 AFz 和 FCz 处。数据采样率为 500 Hz。使用 eeglab 工具箱 2024.0 版在 Matlab 2023b 上运行,对数据的通道位置进行初步定位,并移除无用电极。随后,使用哈佛大学开发的预处理管道 Happe (Lopez et al., 2022)对数据进行处理(GitHub-PINE-Lab /HAPPE: EEG Pre-Processing Pipeline)。具体而言,我们将数据降采样至 250 Hz,以 1~40 Hz 进行带通滤波,并使用陷波滤波器(Cleanline)滤除 50 Hz 的市电干扰。随后检测不良通道和伪迹,对被拒绝的通道插值,并以全脑平均作为离线重参考,删除确定为伪迹的数据段。对所有作答试次的反应时长进行整理后,根据两种条件下被试的平均反应时将连续数据分段后提取感兴趣的时间窗口:(1) T1: 问题出现后 0 到 2 s; (2) T2: 问题出现后 2 至 5 s; (3) T3: 按键反应前 1 s 至反应后 0.5 s, 这样的划分依据是参考以往研究进行的,旨在关注较为确定其认知过程的时间窗口内的神经活动(Jung-Beeman et al., 2004; Yu et al., 2022)。试次中反应时间少于 6 s 的数据被排除,以避免各阶段之间出现数据重叠采样。以 $\pm 100 \mu\text{V}$ 的振幅作为小波阈值去噪的标准,采用独立成分分析(ICA)去除分段数据中的伪迹。最后,对数据进行目视检查,并将伪迹标记、排除在进一步分析之外。

2.5 微状态分析

本研究借鉴了 Bréchet 等(2019)的方法,采用脑电静息微状态方法来分析基于任务的自发思维,以观察在言语顿悟问题解决中代表特定心理活动的微状态地形图的时间动态变化。本研究使用基于 Matlab 编程平台的 eeglab 微状态分析工具箱(Poulsen et al., 2018) (<https://github.com/atpoulsen/microstate-eeglab-Toolbox>), 该工具箱对分析的所有步骤都完全透明,并允许整合任何聚类算法,包含一系列可独立使用、修改或作为交互式插件结合到广泛使用的开源脑电图分析软件的功能(Delorme & Makeig, 2004)。

具体来说,微状态分析可采用的聚类方法主要有 AAHC、TAAHC 以及 k-means, 鉴于前两者的聚类结果相对受到其自身每次随机选取的模版质量影响,本研究采用 k-means 聚类方法来确定在电压

时间序列中占最大全局解释方差(GEV)的最佳簇数,该方法也是微状态分析中最多被使用的聚类方法(Tarailis et al., 2024)。k-means 通常需要预先设定聚类的数量,然后将脑电图数据划分到固定数量的聚类中。接着,脑电图数据会在反复迭代下被重新分配到已有聚类中,并计算聚类结果的全局解释方差,直到达到最优的聚类分配。在本研究中,设定 4~6 个初始地形图类别,通过 GFP 峰值聚类方法将信噪比最高的时间点的地形图视为给定时间内的唯一地形图。通过比较 4~6 个地形图的 GEV (全局解释方差)来选择最优的聚类数量。对每个被试在每种条件下的数据进行微状态分析后,需要选择个体聚类地形图模板或最大均值聚类地形图模板。最大均值模板以相同的模式度量所有数据内容,但这种模式可能并不完全适用于探索单个数据特征的问题。个体模板可以更好地还原个体数据的详细特征,但微状态地形图的形态在被试之间可能存在较大差异,可能造成难以跨被试比较的问题。本研究旨在探讨解决问题的认知过程。个体差异不是研究的重点,因此本研究选择最大均值模板,以组级聚类形成的 4 种地形图为模板,对所有被试的数据进行反向拟合。为了探究这些微状态类别可能反映的认知过程(Khanna et al., 2015; Koenig et al., 2002; Michel et al., 2024; Tarailis et al., 2024)是如何作用并相互影响的,使用 SPSS 27.0 对微状态的时间参数中(平均持续时间、出现频率和转换概率)进行了统计分析。

2.6 神经振荡响应的提取与分析

为了验证先前类似研究中的发现,本研究进一步考察了不同问题解决条件下的时频信号差异。时频分析和后续的统计检验均采用 MATLAB 中的 FieldTrip 工具包。时频分析采用 wavelet (基于 Morlet 小波的方法)算法(Oostenfeld et al., 2011),以 4 ms 的采样步长计算 1~40 Hz 的神经振荡功率,截取了反应前 3 s 至反应后 1 s 的数据,并以反应前 2 s 至反应前 1 s 作为基线校正(基线校正方法为 dB 转换),小波宽度为 5,以 Jung-Beeman 等(2004)的结果为指导关注反应前 0.50 s 到反应前 0.30 s 的时频结果。之所以选择被试反应前 2 s 到 1 s 作为基线窗口是考虑到时频分析时最靠近数据分段两侧的值有不稳定性,所以为了使真正感兴趣的时间窗口内数据不受影响,适当远离数据分段两侧的值有助于规避数据分段之间相互污染的问题(Wang et al., 2023; Yue et al., 2020)。此外,为了评估刺激诱发的

非锁相振荡活动,我们单独计算单个试次的时频响应,并在后续的统计分析中取平均值。在统计分析中,为了避免多重比较问题,本研究采用团簇置换检验(non-parametric cluster based permutation test)验证-0.50至-0.30 s时间范围内颞顶交接处的电极点 TP7、TP8、P7、P8 上,是否在顿悟和非顿悟条件下存在 γ 频段信号的能量差异(时间范围和兴趣区选择参考 Jung-Beeman et al., 2004)。具体来说,以两个条件各频率和时间点上能量间的 t 检验(双侧, 0.025 显著性水平)值作为统计量,通过 5000 次蒙特卡洛模拟获得团簇统计量(质量)的随机分布。团簇被定义为相邻的时间和频率点,并使用 maxsize 算法确定。团簇矫正的显著性水平被设置为 0.05,即原始数据中团簇统计量的大小排在随机分布的前 0.05 时,认为该团簇通过矫正,即两个条件间存在显著差异。

3 结果

3.1 行为结果

12 名被试的数据被排除在外(2 名被试的数据伪迹过多, 10 名被试在每种条件下的有效次数不足, ≤ 10 次),故后续分析中共包含 25 名被试数据。排除错误作答后,每名被试平均包含 109.36 个试次($SD = 15.92$),其中平均有 40.88 个未作答($SD = 25.40$)、31.68 个顿悟作答($SD = 17.44$)和 36.80 个非顿悟作答($SD = 14.37$)。所有被试的平均正确率为 51% ($SD = 13\%$),顿悟解题的平均正确率为 83% ($SD = 14\%$),非顿悟解题的平均正确率为 70% ($SD = 14\%$)。顿悟解题的平均准确率显著高于非顿悟解题条件, $t(24) = 4.93, p < 0.001$, Cohen's $d = 0.97$ 。顿悟解题的平均反应时间为 8136.97 ms ($SD = 1664.90$ ms),非顿悟解题的平均反应时间为 8992.42 ms ($SD = 1134.21$ ms)。非顿悟解题的平均反应时间显著长于顿悟解题, $t(24) = 3.22, p = 0.004$, Cohen's $d = 0.65$ 。以上结果与以往使用相同材料的英语母语者的结果类似, Bowden 和 Jung-Beeman (2003)报告在 15 s 时间限制内,平均解决率约为 50.50%,本研究在 15 s 内的平均解决率为 51.10%,另一项研究纳入分析的试次为 127 个,未作答试次平均有 81 个,顿悟作答次平均有 26 个,非顿悟作答次平均有 20 个(Yu et al., 2022),与本研究类似。从行为结果上看,中文母语被试的任务完成程度完全能够满足任务要求。

3.2 微状态结果

本研究在不同条件及其不同解决阶段上均会产生一个全局解释方差(GEV),为了兼顾总体情况,我们将条件内不同阶段的 GEV 平均后再在条件间平均,得到 4 种、5 种及 6 种地形图的总体平均 GEV。在 4~6 种聚类结果中,4 种地形微状态的数据拟合效果最佳(GEV 为 71.47%),5 种地形微状态的 GEV 为 68.75%,6 种地形微状态的 GEV 为 67.33%。因此后续的所有分析均基于 4 种微状态开展。以下展示了在顿悟解决和未解决条件下,一名被试在问题呈现阶段(T1)的微状态时间序列(图 2),随后对三种答案类型下微状态聚类的平均持续时间、出现率和转移概率进行了重复测量方差分析。

3.2.1 平均持续时间

重复测量方差分析的结果表明,答案类型(顿悟,非顿悟,未作答)的主效应不显著, $F(2, 48) = 3.00, p = 0.059$ 。时间窗口(T1—问题呈现初期, T2—解决过程中, T3—反应阶段)的主效应显著, $F(2, 48) = 7.61, p = 0.001, \eta^2 = 0.24$ 。微状态类型(微状态 A, 微状态 B, 微状态 C, 微状态 D)的主效应显著, $F(3, 72) = 3.03, p = 0.035, \eta^2 = 0.11$ 。

答案类型与时间窗口交互作用不显著, $F(4, 96) = 1.13, p = 0.346$ 。答案类型与微状态交互作用显著, $F(6, 144) = 5.92, p < 0.001, \eta^2 = 0.20$;微状态与时间窗口之间的交互作用显著, $F(6, 144) = 15.48, p < 0.001, \eta^2 = 0.39$;答案类型、时间窗口与微状态交互作用显著, $F(12, 288) = 11.56, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$ (表 1)。简单效应分析表明,在问题呈现阶

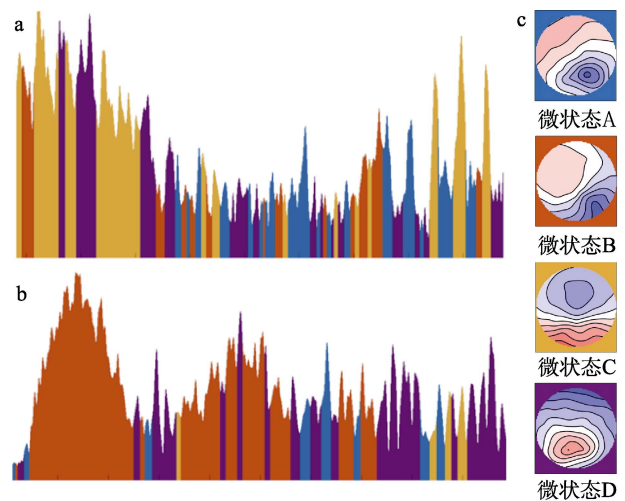


图 2 微状态时间序列示例图

注: a. 顿悟解决方案的试次; b. 未解决条件的试次; c. 4 种典型的微状态地形图。彩图见电子版,下同

表 1 不同条件在平均持续时间上的交互作用

交互项	df	F	p	η^2
答案类型×时间窗口	4	1.13	0.346	0.05
答案类型×微状态	6	5.92	< 0.001	0.20
时间窗口×微状态	6	15.48	< 0.001	0.39
答案类型×时间窗口×微状态	12	11.56	< 0.001	0.33

段(T1), 未解决条件下微状态 A 的平均持续时间显著长于顿悟条件($p = 0.002$), 也显著长于非顿悟条件($p = 0.003$)。顿悟条件下微状态 B 的平均持续时间显著长于未解决条件($p < 0.001$), 非顿悟条件下微状态 B 的平均持续时间显著长于未解决条件($p = 0.002$)。非顿悟条件下微状态 D 的平均持续时间显著长于未解决条件($p = 0.04$)。在解决过程阶段(T2), 微状态 A 在顿悟条件($p < 0.001$)和非顿悟条件($p = 0.026$)下的平均持续时间均显著长于未解决条件下的持续时间, 而该阶段顿悟条件($p = 0.027$)和非顿悟条件($p = 0.03$)下微状态 B 的平均持续时间显著短于未解决条件下的持续时间。在反应阶段(T3), 顿悟条件下微状态 A 的平均持续时间长于非顿悟条件($p = 0.016$), 也长于未解决条件($p < 0.001$)。非顿悟条件下微状态 A 的平均持续时间长于未解决条件($p = 0.007$)。非顿悟条件下微状态 B 的平均持续时间长于顿悟条件($p < 0.001$), 未解决条件下微状态 B 的平均持续时间长于顿悟条件($p < 0.001$) (图 3)。

3.2.2 出现频率

重复测量方差分析结果表明, 答案类型主效应显著, $F(2, 48) = 3.45, p = 0.039, \eta^2 = 0.13$; 时间窗口主效应显著, $F(2, 48) = 8.35, p < 0.001, \eta^2 = 0.26$; 微状态主效应显著, $F(3, 72) = 7.76, p < 0.001, \eta^2 = 0.24$ 。

答案类型与时间窗口交互作用不显著, $F(4, 96) = 1.16, p = 0.336$ 。答案类型与微状态交互作用显著, $F(6, 144) = 11.55, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$; 时间

窗口与微状态交互作用显著, $F(6, 144) = 16.20, p < 0.001, \eta^2 = 0.40$; 答案类型、时间窗口和微状态交互作用显著, $F(12, 288) = 8.28, p < 0.001, \eta^2 = 0.26$ (表 2)。简单效应分析表明, 在问题呈现阶段, 未解决条件下微状态 A 的出现频率显著高于顿悟条件($p < 0.001$)和非顿悟条件($p = 0.001$)。顿悟条件下微状态 B 的出现频率显著高于未解决条件($p = 0.004$), 非顿悟条件下微状态 B 的出现频率显著高于未解决条件($p = 0.002$), 未解决条件下微状态 C 的出现频率显著高于顿悟条件($p = 0.014$)和非顿悟条件($p = 0.014$)。顿悟条件下, 微状态 D 的出现频率显著高于未解决条件($p = 0.009$), 而非顿悟条件下微状态 D 的出现频率显著高于顿悟条件($p = 0.001$)。在问题解决过程阶段, 顿悟条件下微状态 A 的出现频率显著高于非顿悟条件($p = 0.005$), 非顿悟条件下微状态 A 的出现频率显著高于未解决条件($p = 0.001$), 非顿悟条件下微状态 B 的出现频率高于顿悟条件($p = 0.009$)。顿悟条件下微状态 C 的出现频率高于非顿悟条件($p = 0.006$), 未解决条件下微状态 C 的出现频率高于非顿悟条件($p < 0.001$)。在反应阶段, 顿悟条件下微状态 A 的出现频率显著高于非顿悟条件($p = 0.017$), 非顿悟条件下微状态 B 的出现频率显著高于顿悟条件($p < 0.001$), 未解决条件下微状态 B 的出现频率显著高于顿悟条件($p = 0.009$)。顿悟条件下微状态 C 的出现频率高于非顿悟条件($p < 0.001$), 未解决条件下微状态 C 的出现频率高于非顿悟条件($p < 0.001$) (图 4)。

表 2 不同条件在每秒出现频率上的交互作用

交互项	df	F	p	η^2
答案类型×时间窗口	4	1.16	0.336	0.05
答案类型×微状态	6	11.55	< 0.001	0.33
时间窗口×微状态	6	16.20	< 0.001	0.40
答案类型×时间窗口×微状态	12	8.28	< 0.001	0.26

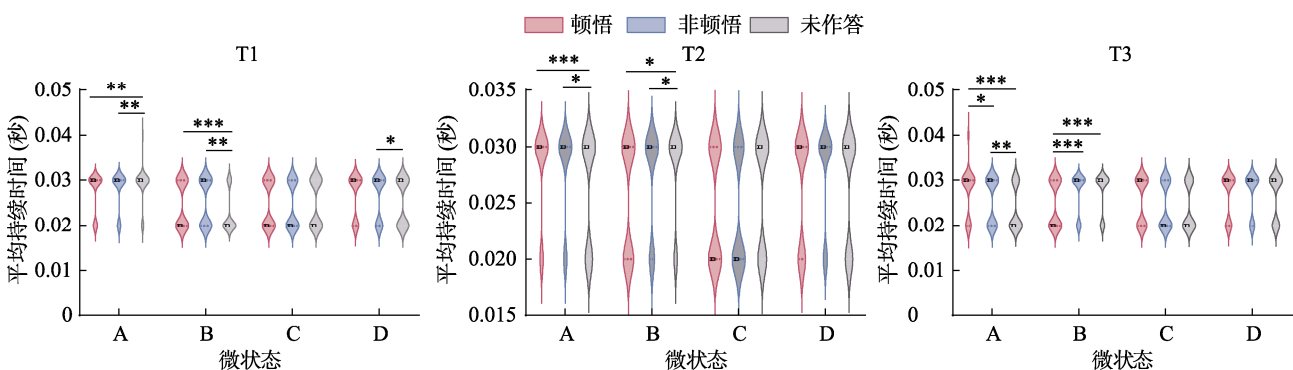


图 3 不同答案类型下微状态平均持续时间的差异(黑点为中位数所在位置)

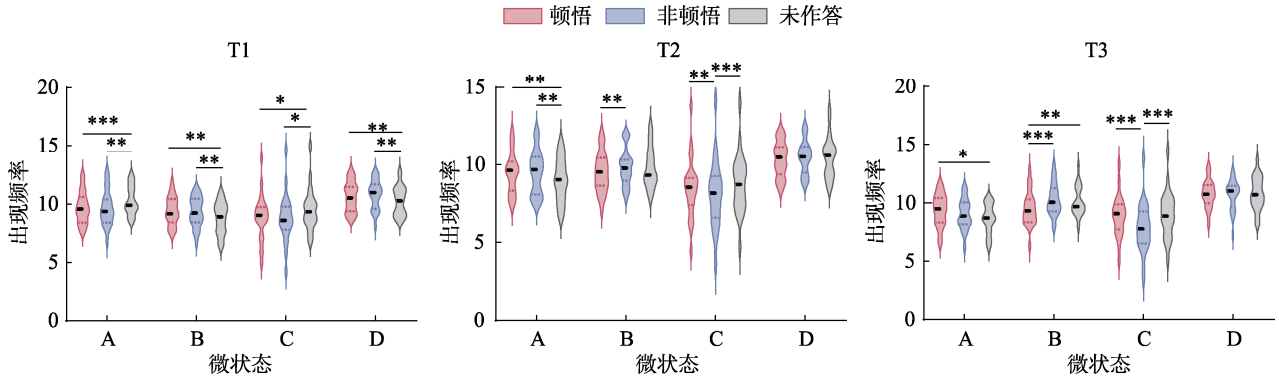


图4 不同答案类型下微状态出现频率的差异

3.2.3 微状态 A 到其他微状态的转移概率

重复测量方差分析表明, 答案类型主效应显著, $F(2, 48) = 4.01, p = 0.040, \eta^2 = 0.143$; 时间窗口主效应显著, $F(2, 48) = 27.17, p < 0.001, \eta^2 = 0.53$; 转移类型(微状态 A 转 B, A 转 C, A 转 D)主效应显著, $F(3, 72) = 12.07, p < 0.001, \eta^2 = 0.34$ 。

答案类型与时间窗口交互作用显著, $F(4, 96) = 13.98, p < 0.001, \eta^2 = 0.37$; 答案类型与转移类型交互作用显著, $F(4, 96) = 12.00, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$; 时间窗口与转移类型交互作用显著, $F(4, 96) = 7.79, p < 0.001, \eta^2 = 0.25$; 答案类型、时间窗口与转移类型交互作用显著, $F(8, 192) = 3.76, p < 0.001, \eta^2 = 0.14$ (表 3)。简单效应分析表明, 在问题呈现阶段, 未解决条件下 P_{A-C} (P 表示 probability, P_{A-C} 表示微状态 A 转移向微状态 C 的概率, 以下文本以此类推) 高于顿悟条件 ($p < 0.001$) 和非顿悟条件 ($p < 0.001$)。在解决问题的过程中, 非顿悟条件下的 P_{A-B} ($p = 0.002$) 和 P_{A-D} ($p = 0.009$) 显著高于未解决条件, 而顿悟条件下 P_{A-C} ($p = 0.036$) 显著高于非顿悟条件。在反应阶段, 非顿悟条件下的 P_{A-B} 显著高于顿悟条件下的 P_{A-B} ($p < 0.001$) 以及未解决状态下的 P_{A-B} ($p = 0.004$), 顿悟条件下的 P_{A-C} 显著高于非顿悟条件下的 P_{A-C} ($p < 0.001$) 以及未解决状态下的

表 3 不同条件在微状态 A 向其他微状态转移概率上的交互作用

交互项	df	F	p	η^2
答案类型×时间	4	13.98	< 0.001	0.37
答案类型×转移类型	4	12.00	< 0.001	0.33
时间窗口×转移类型	4	7.79	< 0.001	0.25
答案类型×时间窗口×转移类型	8	3.76	< 0.001	0.14

P_{A-C} ($p = 0.029$), 顿悟条件下的 P_{A-D} 显著高于未解决状态下的 P_{A-D} ($p = 0.011$), 而非顿悟条件下的 P_{A-D} 显著高于未解决状态下的 P_{A-D} ($p = 0.013$) (图 5)。

3.2.4 微状态 B 到其他微状态的转移概率

重复测量方差分析结果表明, 答案类型的主效应显著, $F(2, 48) = 15.56, p < 0.001, \eta^2 = 0.39$; 时间窗口的主效应显著, $F(2, 48) = 25.73, p < 0.001, \eta^2 = 0.52$; 转移类型的主效应显著, $F(2, 48) = 9.77, p < 0.001, \eta^2 = 0.29$ 。

答案类型与时间窗口交互作用显著, $F(4, 96) = 12.14, p < 0.001, \eta^2 = 0.34$; 答案类型与转移类型交互作用显著, $F(4, 96) = 7.20, p < 0.001, \eta^2 = 0.23$; 时间窗口与转移类型交互作用显著, $F(4, 96) = 11.82, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$; 答案类型、时间窗口与转移类型交互作用显著, $F(8, 192) = 2.34, p = 0.048, \eta^2 = 0.09$ (表 4), 简单效应分析表明, 在问题呈

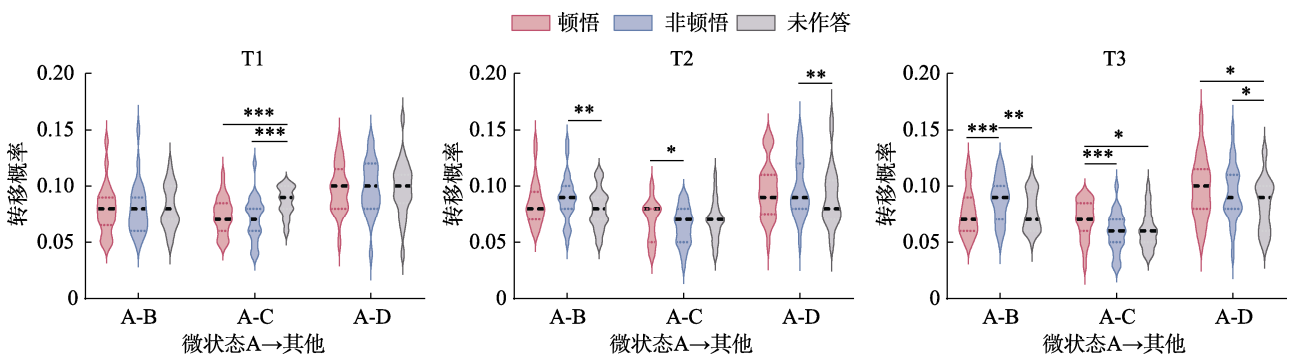


图5 不同答案类型下从微状态 A 向其他微状态转移的概率差异

表 4 不同条件在微状态 B 向其他微状态转移概率上的交互作用

交互项	df	F	p	η^2
答案类型×时间窗口	4	12.14	< 0.001	0.34
答案类型×转移类型	4	7.20	< 0.001	0.23
时间窗口×转移类型	4	11.82	< 0.001	0.33
答案类型×时间窗口×转移类型	8	2.34	0.048	0.09

现阶段, 顿悟条件下的 P_{B-D} ($p = 0.002$) 和非顿悟条件下的 P_{B-D} ($p = 0.004$) 显著高于未解决条件下的 P_{B-D} 。在解决问题的过程中, 非顿悟条件下的 P_{B-A} 显著高于未解决条件下的 P_{B-A} ($p = 0.010$), 未解决条件下的 P_{B-C} ($p = 0.014$) 显著高于顿悟条件下的 P_{B-C} ($p = 0.014$) 和非顿悟条件下的 P_{B-C} ($p = 0.002$), 非顿悟条件下的 P_{B-D} ($p = 0.013$) 显著高于顿悟条件下的 P_{B-D} 。在反应阶段, 非顿悟条件下的 P_{B-A} 显著高于顿悟条件 ($p = 0.003$) 和未解决状态 ($p = 0.032$), 而未解决状态下的 P_{B-C} 显著高于顿悟条件 ($p = 0.010$) 和非顿悟条件 ($p = 0.005$)。非顿悟条件下的 P_{B-D} 显著高于顿悟条件 ($p = 0.003$) (图 6)。

3.2.5 微状态 C 到其他微状态的转移概率

重复测量方差分析结果表明, 答案类型的主效应显著, $F(2, 48) = 22.23, p < 0.001, \eta^2 = 0.48$; 时间窗口的主效应显著, $F(2, 48) = 13.94, p < 0.001, \eta^2 = 0.37$; 转移类型的主效应显著, $F(2, 48) = 8.22, p < 0.001, \eta^2 = 0.26$ 。

答案类型与时间窗口交互作用显著, $F(4, 96) = 3.51, p = 0.028, \eta^2 = 0.13$; 答案类型与转移类型交互作用不显著, $F(4, 96) = 0.04, p = 0.777$; 时间窗口与转移类型交互作用显著, $F(4, 96) = 10.96, p < 0.001, \eta^2 = 0.31$; 答案类型、时间窗口与转移类型的交互作用显著, $F(8, 192) = 6.87, p < 0.001, \eta^2 = 0.22$ (表 5)。简单简单效应分析表明, 在问题呈现阶段, 未解决条件下的 P_{C-A} 高于顿悟条件 ($p = 0.001$) 和非顿悟条件 ($p < 0.001$), 顿悟条件下的 P_{C-B} 高于非顿悟条件 ($p = 0.043$)。在解决问题的过程中, 顿悟条件下的 P_{C-A} 高于非顿悟条件 ($p = 0.014$), 未解决条件下的 P_{C-B} 高于顿悟条件 ($p = 0.013$) 和非顿悟条件 ($p = 0.003$), 顿悟条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p = 0.040$), 未解决条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p < 0.001$)。在反应阶段, 顿悟条件下的 P_{C-A} 高于非顿悟条件 ($p = 0.002$), 顿悟条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p = 0.004$), 而未解决条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p < 0.001$) (图 7)。

悟条件 ($p = 0.043$)。在解决问题的过程中, 顿悟条件下的 P_{C-A} 高于非顿悟条件 ($p = 0.014$), 未解决条件下的 P_{C-B} 高于顿悟条件 ($p = 0.013$) 和非顿悟条件 ($p = 0.003$), 顿悟条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p = 0.040$), 未解决条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p < 0.001$)。在反应阶段, 顿悟条件下的 P_{C-A} 高于非顿悟条件 ($p = 0.002$), 顿悟条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p = 0.004$), 而未解决条件下的 P_{C-D} 高于非顿悟条件 ($p < 0.001$) (图 7)。

3.2.6 微状态 D 到其他微状态的转移概率

重复测量方差分析结果表明, 答案类型的主效应显著, $F(2.48) = 3.40, p = 0.042, \eta^2 = 0.12$; 时间窗口的主效应不显著, $F(2, 48) = 2.39, p = 0.103$; 转换类型的主效应不显著, $F(2, 48) = 2.73, p = 0.076$ 。

答案类型与时间窗口交互作用显著, $F(4, 96) = 3.24, p = 0.038, \eta^2 = 0.12$; 答案类型与转移类型的交互作用显著, $F(4, 96) = 9.73, p < 0.001, \eta^2 = 0.29$; 时间窗口与转移类型的交互作用显著, $F(4, 96) = 21.97, p < 0.001, \eta^2 = 0.48$; 答案类型、时间窗口与转移类型的交互作用显著, $F(8, 192) = 8.44, p < 0.001, \eta^2 = 0.26$ (表 6)。简单简单效应分析表明, 在问题呈现阶段, 顿悟条件下的 P_{D-B} 高于未解决条件下的 P_{D-B} ($p < 0.001$), 未解决条件下的 P_{D-B} 高于未解决条件下的 P_{D-A} ($p < 0.001$)。在解决问题的过程中, 顿悟条件下的 P_{D-A} 高于未解决条件下的 P_{D-A} ($p = 0.033$), 未解决条件下的 P_{D-A} 高于未解决条件下的 P_{D-B} ($p = 0.004$), 未解决条件下的 P_{D-B} 高于顿悟条

表 5 不同条件在微状态 C 向其他微状态转移概率上的交互作用

交互项	df	F	p	η^2
答案类型×时间窗口	4	3.51	0.028	0.13
答案类型×转移类型	4	0.04	0.777	0.02
时间窗口×转移类型	4	10.96	< 0.001	0.31
答案类型×时间窗口×转移类型	8	6.87	< 0.001	0.22

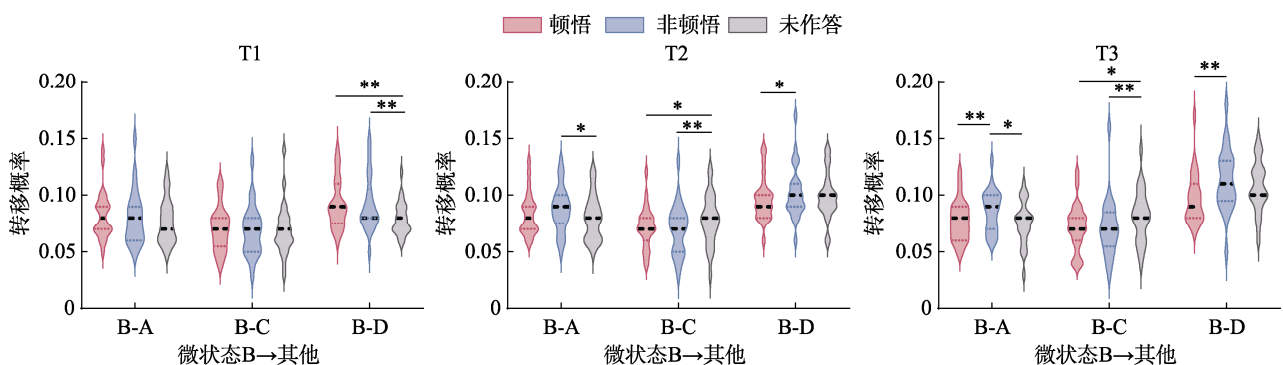


图 6 不同答案类型下从微状态 B 向其他微状态转移的概率差异

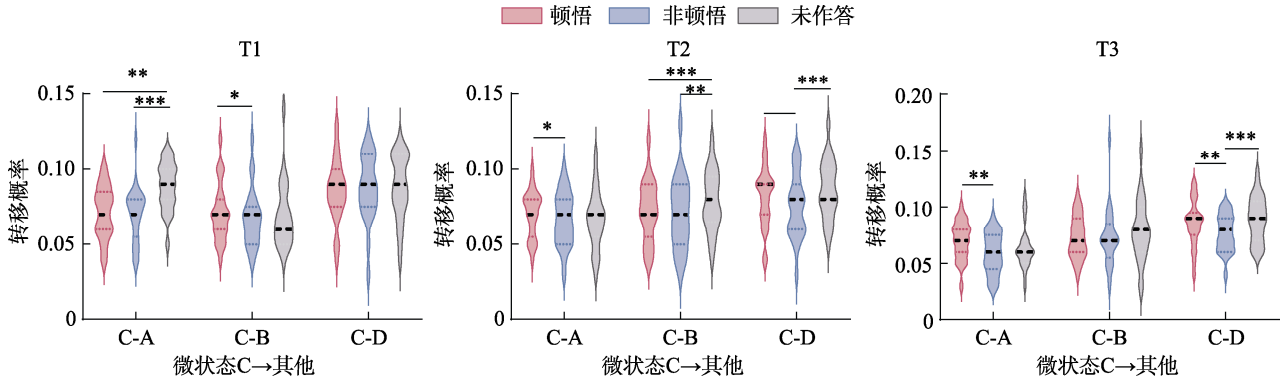


图 7 不同答案类型下从微状态 C 向其他微状态转移的概率差异

表 6 不同条件在微状态 D 向其他微状态转移概率上的交互作用

交互项	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
答案类型×时间窗口	4	3.24	0.038	0.12
答案类型×转移类型	4	9.73	< 0.001	0.29
时间窗口×转移类型	4	21.97	< 0.001	0.48
答案类型×时间窗口×转移类型	8	8.44	< 0.001	0.26

件下的 P_{D-B} ($p < 0.001$), 在未解决条件下的 P_{D-B} 高于顿悟条件 ($p = 0.004$), 顿悟条件下 P_{D-C} 高于非顿悟条件下 ($p = 0.028$), 而未解决条件下 P_{D-C} 高于非顿悟条件下 ($p = 0.040$)。在反应阶段, 顿悟条件下的 P_{D-A} 高于未解决条件 ($p = 0.012$), 非顿悟条件下的 P_{D-A} 高于未解决条件 ($p = 0.015$), 非顿悟条件下的 P_{D-B} 高于顿悟条件 ($p = 0.003$), 顿悟条件下的 P_{D-C} 高于非顿悟条件 ($p = 0.002$), 未解决条件的 P_{D-C} 高于非顿悟条件 ($p = 0.004$) (图 8)。

3.3 时频分析

基于聚类的置换检验表明, 相较于非顿悟问题解决, 顿悟问题解决在右侧颞顶区电极点 P8 上 γ 频段的能量显著增强, 团簇质量 $\text{sum}[t] = 118$, 显著性水平 $p = 0.02$, 显著团簇的时间范围约为 $-0.50 \sim -0.45$ s; 左侧颞顶区电极点 P7 也发现存

在两个团簇, 但统计矫正后不显著(团簇 1 质量: $\text{sum}[t] = 37$, $p = 0.13$; 团簇 2 质量: $\text{sum}[t] = 8$, $p = 0.23$); TP7 上存在一个团簇, 统计矫正后不显著, 团簇质量 $\text{sum}[t] = 3$, $p = 0.25$; TP8 上不存在团簇(图 9、网络版附图 1)。

4 讨论

为探究顿悟问题解决过程中多种认知过程的相互作用, 研究采用复合远距离联想(CRA)任务对不同解决条件下的脑电微状态进行了分析, 重点在于探索可能与无意识加工有关的神经指标在自发性顿悟问题解决过程中的发展变化, 以及其与多种潜在认知活动的相互作用模式。结果表明, 问题的成功解决与微状态 D (该地形图被认为与执行功能相关)有较强的神经关联, 而顿悟问题解决在过程的中后期比非顿悟问题解决包含更多的微状态 C (该地形图反映了默认模式网络的一部分)。默认模式网络是一个具有广泛节点的大尺度脑网络(Liu et al., 2022), 可能与如自传体记忆、情绪加工、无意识加工等认知过程有关, 但其具体作用的发挥受到任务需求和研究目的的影响, 例如在完成根据照片回忆自己特定记忆的任务中, 默认模式网络相关

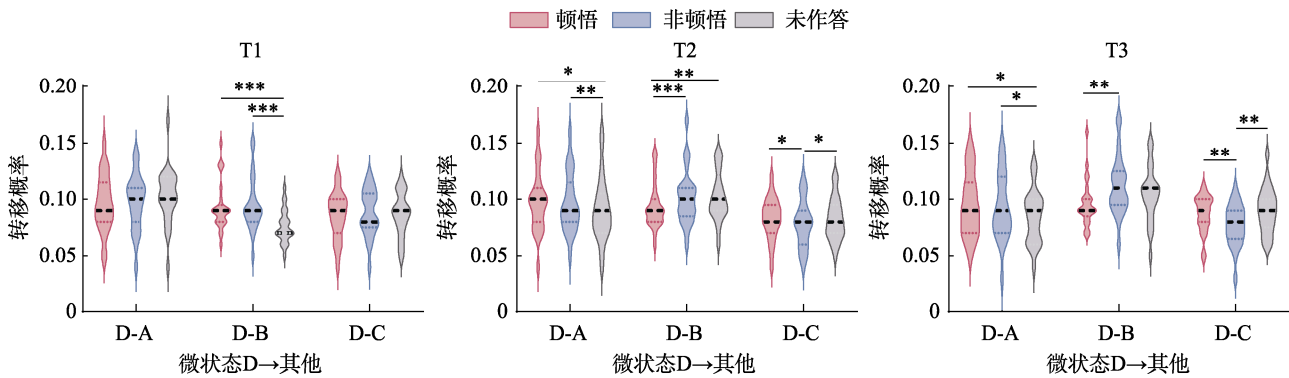


图 8 不同答案类型下从微状态 D 向其他微状态转移的概率差异

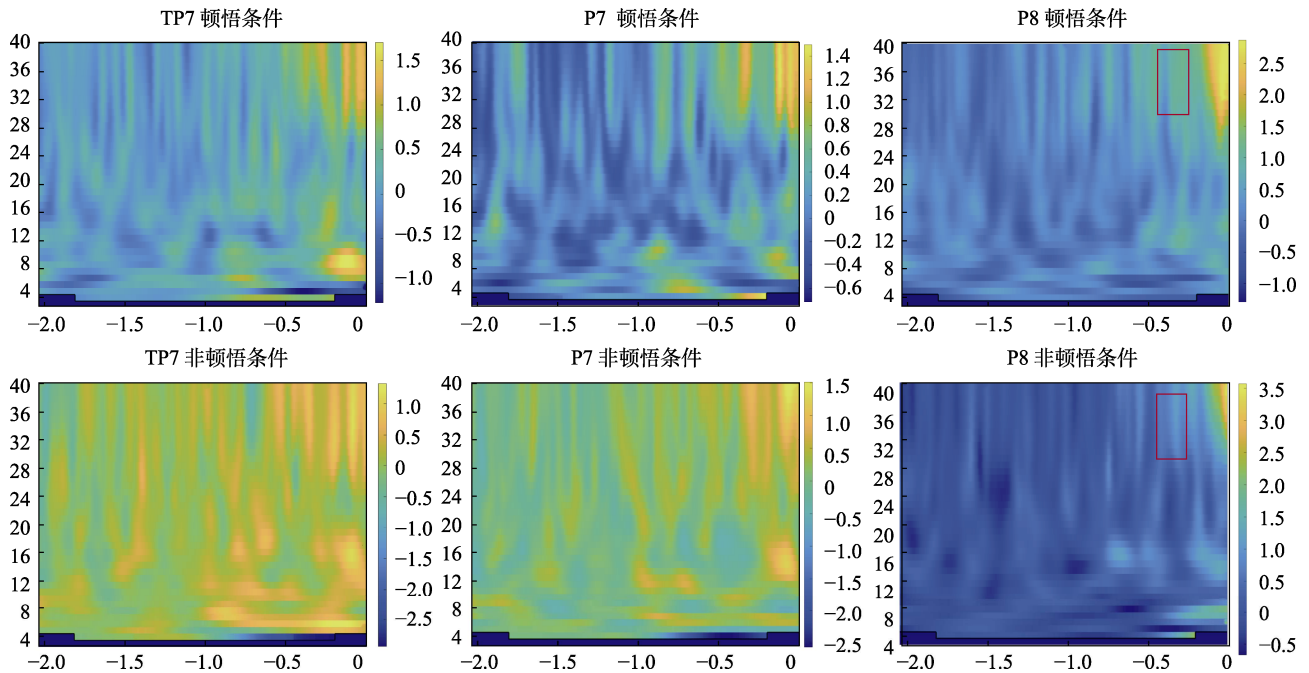


图 9 顿悟与非顿悟解决在 γ 频段上的响应差异(TP7、P7、P8 电极)

的微状态 C 激活模式可能与自传体记忆或情景记忆有关(Bréchet et al., 2019); 而在研究离散的情绪体验时, 微状态 C 对不同情绪可能反映了默认模式网络对于复杂情绪体验的处理、评估和构建(Satpute & Lindquist, 2019); 而在持续注意反应任务中发现的微状态 C 可能反映了心智游移、无意识状态(Croce et al., 2018; Zanesco et al., 2021)。根据顿悟问题解决过程的相关理论和已有研究, 其解决过程可能较少涉及自传体记忆、情景记忆或情绪加工, 因此推测在该框架中微状态 C 的结果更多地可能反映了被试对问题的无意识加工。本研究结果呼应了先前关于执行功能网络和默认模式网络在创造性思维中作用的研究(Beaty et al., 2015; Lin et al., 2022; Lloyd-Cox et al., 2022), 并验证了 Jung-Beeman 等人(2004)报告的顿悟问题解决前夕 γ 频段突然迸发的结果, 进一步描述了在顿悟问题解决的时间序列中多种认知过程是如何相互作用的, 为无意识加工和顿悟问题解决的关联提供了电生理的依据。

与先前几项研究中报告的微状态类型一致(Britz et al., 2010; Croce et al., 2018; Pan et al., 2020; Tarailis et al., 2024), 本研究通过数据驱动确定了 4 种具有最佳拟合效果的微状态地形图。基于存在统计差异的结果绘制了三种答案类型下微状态加工模式的示意图(图 10), 包括不同时间窗口内 4 种典型微状态的出现频率和转移概率信息。

4.1 未解决条件的神经加工模式

与两种成功解决条件相比, 未解决条件下微状态 C 在三个时间窗口内的出现频率都显著更高, 显著性水平随着问题解决的时间进程增加。先前的研究报告了微状态 C 在与默认模式网络相关区域内的活动, 表明微状态 C 与任务负性思维、心智游移、自我相关思维以及情绪和内感受加工的关系(Bréchet et al., 2019; Croce et al., 2018; Custo et al., 2017; Zanesco et al., 2021)。结合微状态 C 的心理功能和本实验任务条件, 微状态 C 在三个时间窗口内的主导地位可能表明了未能解决问题的主要因素之一是被试对问题缺乏自上而下的注意力资源投入。此外, 微状态 A 主要与听觉和视觉处理以及个体的唤醒度有关, 其神经溯源主要与颞叶皮层和听觉网络激活相关(Britz et al., 2010; Custo et al., 2017), 微状态 B 则与视觉加工、自我可视化、自传体记忆和场景可视化相关(Britz et al., 2010; Koenig et al., 2002); 在自传体记忆任务中, 其出现率更高, 并与“场景重构子系统”相关(Bréchet et al., 2019); 在视觉刺激后或睁眼状态下, 其存在时间增加(Tarailis et al., 2024)。在未解决条件下, 代表听觉信息加工过程的微状态 A 在问题呈现初期持续时间更长、出现频率更高, 我们认为有可能是被试在听觉层面对单词自身的发音和语义信息进行了深入的加工, 而在解决问题的中后期微状态 B 的平均持续时间更长可能与被试对刺激材料(视觉形式)的注

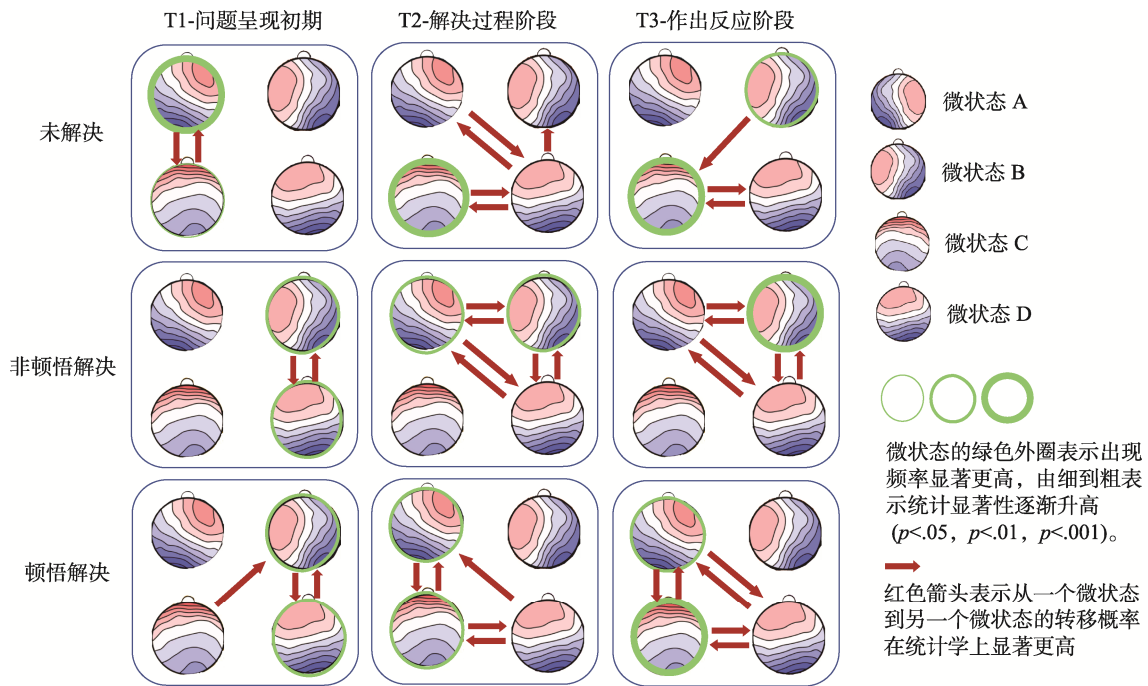


图 10 三种条件下不同时间窗内微状态的动态变化示意图

意固着有关。远距离联想测试要求被试在基于给定词汇的基础上快速的识别、联想, 因此对单词自身的发音和语义信息过度关注和后期对给定词汇的视觉注意固着可能影响了对单词之间联系的判断, 从而影响问题解决。

4.2 非顿悟式问题解决的神经加工模式

在两种成功的问题解决中, 微状态 D 都显示出相对较长的平均持续时间以及在问题呈现初期较高的出现频率。这一发现与先前关于执行功能在问题解决中所起重要作用的研究结果(Beaty et al., 2015; Lin et al., 2022; Lloyd-Cox et al., 2022)相一致, 表明成功解决问题依赖于执行功能对信息加工系统的调节作用。在问题解决的中、后期阶段, 微状态 D 主要通过与其他微状态的转换来促进问题解决。这可能意味着执行功能可能是通过多次频繁地与其他认知过程互动来实现更有效的信息加工, 从而促进问题解决。

在问题呈现初期, 顿悟解决和非顿悟解决的加工模式相似, 都显示出微状态 A 的平均持续时间较长以及微状态 B 的出现频率较高。随着过程推进, 非顿悟解决条件下微状态 A 的平均持续时间缩短, 而微状态 B 的平均持续时间增加, 并且微状态 B 的出现频率在反应阶段达到最高显著性水平 ($p < 0.001$)。非顿悟问题解决的特点在于依据刺激材料完成逻辑分析并得出答案, 在言语类问题中即表现为被试基于刺激呈现形式(视觉)对信息的有效激活

扩散, 微状态 B (代表与视觉注意和想象相关的认知过程)在非顿悟问题解决中的逐步增强也印证了这一点。通过图 10 可以直观看出, 在非顿悟解决条件下, 微状态 B 和微状态 D 的参与权重更高, 而微状态 C 在任何阶段都未表现出平均持续时间、出现频率或转移概率方面的优势。这些结果可能反映了执行功能对信息加工的积极调节作用, 而无意识加工在非顿悟解决中的作用可能很小, 至少在微状态上无法有效体现。这一结果与先前关于非顿悟问题解决(或称分析性问题解决)的研究结果一致, 表明顿悟与非顿悟问题解决在神经加工模式存在显著差异(Bieth et al., 2024; Jung-Beeman et al., 2004; Yu et al., 2022)。值得注意的是, 尽管微状态 A 没有表现出与微状态 B 类似的作用性, 但微状态 A 也在非顿悟式解决中发挥了一定的作用。非顿悟式问题解决在微状态时间序列上表现为在问题解决的中期和后期阶段, 微状态 A、微状态 B 和微状态 D 之间频繁出现的双向转换模式, 表明虽然听觉语义信息加工并非主导因素, 但它在解决过程中与视觉和与执行功能相关的状态之间存在较多的互动, 发挥了重要的参与作用。在先前的研究中, 也报告了微状态 A 和微状态 B 之间存在显著的相关性(Kleinert et al., 2024), 印证了感知信息加工以及多通道转换在非顿悟问题解决中的重要性。此外, 本研究中非顿悟问题解决始终由感知信息加工系统和执行功能系统支持, 并不涉及微状态 C, 支持了非顿悟问

题解决应当发生在意识之上的观点。

4.3 顿悟式问题解决的神经加工模式

在顿悟问题解决的问题呈现阶段,微状态 B 和微状态 D 的出现频率均显著高于其他微状态,这可能意味着早期阶段被试更多地依靠视觉处理任务中呈现的文字,执行功能在这一时期发挥了显著的调节作用。然而,在顿悟问题解决的中期和后期阶段,微状态 B 的平均持续时间和出现频率在三个时间窗口内持续显著降低。与此同时,微状态 A 在三个时间窗口内的平均持续时间和出现频率则持续显著增加,可能反映了在顿悟问题解决过程中信息处理模式的变化,即从早期阶段主要依靠视觉模态来表征问题,到逐渐以与听觉语义信息相关的模态占据主导地位。我们将这种特定的变化模式解释为对问题进行有效的初始表征后,顿悟问题解决可能借助了相对间接的模态(或更脱离刺激材料呈现形式的模态)共同处理问题信息。

此外,顿悟问题解决过程中的神经加工模式在时间序列上不仅依赖于执行功能发挥调节作用,还有与默认模式网络相关的激活增强作用。具体而言,在顿悟问题解决条件的问题呈现初期,微状态 C 到微状态 B 的转换显著增多;而在解决过程阶段与反应阶段,微状态 A、C 和 D 之间频繁转换,且微状态 C 在三个时间窗口内的出现频率逐渐增加。默认模式网络通常被认为是对任务不敏感的,且在大脑的静息状态或没有明确任务指示的情况下更为活跃(Dohmatob et al., 2020; Yeshurun et al., 2021)。先前研究在关于顿悟问题解决过程中是否存在无意识加工已达成了一致结论,但很少有研究直接探讨了无意识加工在顿悟问题解决过程中的运作方式,以及无意识加工是否与其他认知过程相互排斥。对此,本研究结果提供了清晰但相对粗略的回答。与任务无关、代表默认模式网络一部分的微状态 C 在顿悟导向的问题解决中活动更加显著,且随着时间的推移逐渐增强,在反应阶段达到最强。这一结果也与先前研究对顿悟问题解决过程的总结和反思一致(Bilalić et al., 2021; Shen et al., 2018),即当以常规方式无法解决问题时,个体会陷入思维僵局。在这个阶段,个体可能不再有意地继续思考问题,从外部注意力转向内部注意力,并进入对问题的无意识加工阶段。然而,顿悟往往会在一瞬间发生,所以在问题解决前夕,个体可能处于一种非常强烈的无意识加工状态下,并在正确答案涌现时迅速切换到有意识加工状态(Jung-Beeman et al., 2004),这

一结果也在本研究的时频分析结果中再次得到印证,右侧颞叶的 γ 频段在问题解决前的 0.50 s 到 0.45 s 的增强可能意味着语义整合促进了解决方案词的突然意识可用性。然而,值得考虑的是,在 Jung-Beeman 等(2004)的研究中右侧颞叶的 γ 爆发发生在问题解决前的 0.30 s 到 0.02 s,与本研究发现的问题解决前的 0.50 s 到 0.45 s 有一定差异。我们推测这种差异可能是由在中国被试中使用英文 CRA 任务导致的。尽管本研究行为结果和主要的神经结果均表明二语加工对本研究的影响不大,但二语加工的细微差异可能就体现在 γ 频段能量增加的窗口提前、时程变短上。英文 CRA 任务对中国被试而言可能有更大的语义距离,因此负责困难语义加工的右侧颞叶可能需要更早启动粗语义整合功能以弥补远距离联结的不足(Sun et al., 2015; Yang, 2012),而 γ 频段能量增加被认为是支持这种远程神经连接的机制(Bartoli et al., 2024; Van Der Werf et al., 2008),一旦联结完成,表征可能迅速进入意识,进而表现为 γ 爆发的提前且压缩。

最后,微状态 D 也在整个过程中通过与其他微状态的频繁互动支持了问题的顿悟式解决,这也呼应了此前在创造领域(包括顿悟问题解决)关于执行功能和默认模式网络的研究结果,即这两个看似拮抗的网络在创造性任务中存在一种协作的趋势,以不同的机制支持创造(Beaty et al., 2015; Shen et al., 2018)。然而,虽然以往研究使用 fMRI 结合 ROI-to-ROI 的分析揭示了默认模式网络和执行功能网络在任务中的耦合模式,但这种分析无法完全捕捉到这些网络在不同时间尺度上的复杂交互。因此本研究在此基础上探索了更敏感的时间尺度中创造性思维相关的脑活动是如何交互的。通过对三种解决条件的对比,我们认为默认模式网络相关的微状态指标与顿悟式的问题解决密不可分,在各个阶段以不同的形式(平均持续时间、出现概率以及与其他地形图的相互转换)支持问题的顿悟解决。该结果为无意识加工与顿悟问题解决的关系提供了一定启示,然而仅靠无意识加工不足以实现顿悟,成功解决问题仍然需要执行功能对信息加工进行自上而下的调控。

4.4 研究局限与展望

本研究数据结果支持最合适的微状态类别为 4 种,后续的结果、讨论也是基于这 4 种地形图的参数及其可能关联的认知意义得出的。虽然结果

表明顿悟问题解决可能最明显地包括这4种微状态,但无法排除其他微状态及其关联的认知过程也在顿悟式问题解决中发挥重要作用的可能性,后续研究可以在更具体的研究问题和实验设计下进一步探讨该问题。此外,尽管微状态能够对多个认知过程如何在时间序列中运作提供一个概览,但它们最大的意义在于为后续有目的地探索某一任务中若干认知过程的神经加工模式提供一个可能的方向。未来的研究可以结合机器学习或多模态分析来验证一些已被发现对顿悟问题解决起关键作用的指标,从而进一步阐明由多个微状态所代表的认知意义以及顿悟问题解决所涉及的关键过程。

鉴于本研究旨在描述在顿悟问题解决不同阶段中多种认知过程的交互形式,尤其是可能代表了无意识加工的认知过程是如何与其他过程交互的,因此使用能够引发被试更加丰富经验及联想的中文CRA任务并不是非常合适,可能会使得期间的认知过程变得更加复杂不可控,且本研究的结果是初步性的,英文CRA任务可以作为一种“通用”或“中立”的测试工具,减少因测试材料差异带来的混淆变量,从而使得研究结论更具说服力。尽管本研究所招募、筛选的中国高英语水平被试对英文CRA任务的平均解决率和顿悟解决率等结果与以往英语母语者完成英文CRA任务的结果十分类似(见3.1),可以被认为是使用英文CRA任务在中国被试进行测试无较大影响的证据,但这种处理方法只是权衡之后的结果,且在时频分析中与以往研究存在一定的时效差异,这提示着言语语用的差异在顿悟问题解决中是非常应当被考虑进去的,当语言障碍被最小化时,研究者可以更纯粹地考察创造性顿悟的认知机制。

5 结论

本研究通过对比的顿悟式问题解决、非顿悟式问题解决以及未解决条件,描述了顿悟式问题解决的特异性如何通过动态神经响应模式得以体现。结果发现,顿悟式问题解决至少涉及4个重要的认知过程;充分利用视觉图像信息和听觉语义信息来处理、检索和提取信息是成功解决问题的基本条件;无意识加工主要出现在问题解决的中后期阶段,在顿悟式问题解决中发挥关键作用。执行功能以调节的形式持续支持顿悟式问题解决中信息的反复选择和整合。

参 考 文 献

- Aziz - Zadeh, L., Kaplan, J. T., & Iacoboni, M. (2009). "Aha!": The neural correlates of verbal insight solutions. *Human Brain Mapping, 30*(3), 908–916.
- Bartoli, E., Devara, E., Dang, H. Q., Rabinovich, R., Mathura, R. K., Anand, A., ... Shofty, B. (2024). Default mode network electrophysiological dynamics and causal role in creative thinking. *Brain, 147*(10), 3409–3425.
- Beatty, 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.
- Benedek, M., Christensen, A. P., Fink, A., & Beaty, R. E. (2019). Creativity assessment in neuroscience research. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts, 13*(2), 218–226.
- Betz, R. F., Erickson, M. A., Abell, M., O'Donnell, B. F., Hetrick, W. P., & Sporns, O. (2012). Synchronization dynamics and evidence for a repertoire of network states in resting EEG. *Frontiers in Computational Neuroscience, 6*, 74.
- 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. (2021). 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. (2003). Normative data for 144 compound remote associate problems. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 35*, 634–639.
- Bréchet, L., Brunet, D., Birot, G., Gruetter, R., Michel, C. M., & Jorge, J. (2019). Capturing the spatiotemporal dynamics of self-generated, task-initiated thoughts with EEG and fMRI. *Neuroimage, 194*, 82–92.
- Britz, J., Van De Ville, D., & Michel, C. M. (2010). BOLD correlates of EEG topography reveal rapid resting-state network dynamics. *Neuroimage, 52*(4), 1162–1170.
- Brouwer, H., & Hoeks, J. C. (2013). A time and place for language comprehension: Mapping the N400 and the P600 to a minimal cortical network. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 758.
- Croce, P., Zappasodi, F., Spadone, S., & Capotosto, P. (2018). Magnetic stimulation selectively affects pre-stimulus EEG microstates. *NeuroImage, 176*, 239–245.
- Custo, A., Van De Ville, D., Wells, W. M., Tomescu, M. I., Brunet, D., & Michel, C. M. (2017). Electroencephalographic resting-state networks: Source localization of microstates. *Brain Connectivity, 7*(10), 671–682.
- Danek, A. H., Fraps, T., von Müller, A., Grothe, B., & Ollinger, M. (2014). Working wonders? investigating insight with magic tricks. *Cognition, 130*(2), 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.11.003>
- Darsaud, A., Wagner, U., Baletau, E., Desseilles, M., Sterpenich, V., Vandewalle, G., ... Maquet, P. (2011). Neural precursors of delayed insight. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(8), 1900–1910.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods, 134*(1), 9–21.
- Dijksterhuis, A., & Nordgren, L. F. (2006). A theory of

- unconscious thought. *Perspectives on Psychological Science*, 1(2), 95–109.
- Dohmatob, E., Dumas, G., & Bzdok, D. (2020). Dark control: The default mode network as a reinforcement learning agent. *Human Brain Mapping*, 41(12), 3318–3341.
- Erickson, B., Truelove-Hill, M., Oh, Y., Anderson, J., Zhang, F. Z., & Kounios, J. (2018). Resting-state brain oscillations predict trait-like cognitive styles. *Neuropsychologia*, 120, 1–8.
- Fink, A., Graif, B., & Neubauer, A. C. (2009). Brain correlates underlying creative thinking: EEG alpha activity in professional vs. novice dancers. *NeuroImage*, 46(3), 854–862.
- Fleck, J. I., & Kounios, J. (2009). Intuition, creativity, and unconscious aspects of problem solving. In W. P. Banks (Ed.), *Encyclopedia of consciousness* (pp. 431–446). Elsevier.
- Gao, Y., & Zhang, H. (2014). Unconscious processing modulates creative problem solving: Evidence from an electrophysiological study. *Consciousness and Cognition*, 26, 64–73.
- Gilhooly, K. J. (2016). Incubation and intuition in creative problem solving. *Frontiers in Psychology*, 7, 1076.
- Haavold, P. Ø., & Sriraman, B. (2022). Creativity in problem solving: Integrating two different views of insight. *ZDM—Mathematics Education*, 54(1), 83–96.
- Hill, A. T., Bailey, N. W., Zomorodi, R., Hadas, I., Kirkovski, M., Das, S., Lum, J. A. G., & Enticott, P. G. (2023). EEG microstates in early - to - middle childhood show associations with age, biological sex, and alpha power. *Human Brain Mapping*, 44(18), 6484–6498.
- 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., ... Kounios, J. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biology*, 2(4), e97.
- Khanna, A., Pascual-Leone, A., Michel, C. M., & Farzan, F. (2015). Microstates in resting-state EEG: Current status and future directions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 49, 105–113.
- Kleinert, T., Koenig, T., Nash, K., & Wascher, E. (2024). On the reliability of the EEG microstate approach. *Brain Topography*, 37(2), 271–286.
- Koenig, T., Prichep, L., Lehmann, D., Sosa, P. V., Braeker, E., Kleinlogel, H., ... John, E. R. (2002). Millisecond by millisecond, year by year: Normative EEG microstates and developmental stages. *NeuroImage*, 16(1), 41–48.
- Kohler, W. (1985). *The mentality of apes*. Routledge.
- Lehmann, D., Ozaki, H., & Pál, I. (1987). EEG alpha map series: Brain micro-states by space-oriented adaptive segmentation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 67(3), 271–288.
- Lehmann, D., Pascual-Marqui, R. D., & Michel, C. (2009). EEG microstates. *Scholarpedia*, 4(3), 7632.
- 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.
- Lin, J., Chen, Y., Xie, J., & Mo, L. (2022). Altered brain connectivity patterns of individual differences in insightful problem solving. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 16, 905806.
- Liu, C., Tu, S., Guan, J., Zhou, Z., Ma, J., & Shi, Z. (2024). How does unconscious processing promote creative problem-solving? An examination using priming methods. *Thinking & Reasoning*, 31(3), 374–397.
- Liu, D., Hao, L., Han, L., Zhou, Y., Qin, S., Niki, K., ... 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, Y., Nour, M. M., Schuck, N. W., Behrens, T. E. J., & Dolan, R. J. (2022). Decoding cognition from spontaneous neural activity. *Nature Reviews Neuroscience*, 23(4), 204–214.
- Lloyd-Cox, J., Chen, Q., & Beaty, R. E. (2022). The time course of creativity: Multivariate classification of default and executive network contributions to creative cognition over time. *Cortex*, 156, 90–105.
- 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.
- Lu, Y., & Singer, W. (2023). Dynamic signatures of the Eureka effect: An EEG study. *Cerebral Cortex*, 33(13), 8679–8692.
- Luo, J. (2004). Neural correlates of insight. *Acta Psychologica Sinica*, 36(2), 219–234.
- [罗劲. (2004). 顿悟的大脑机制. *心理学报*, 36(2), 219–234.]
- Mai, X. Q., Luo, J., Wu, J. H., & Luo, Y. J. (2004). “Aha!” effects in a guessing riddle task: An ERP study. *Human Brain Mapping*, 23(2), 128–128.
- Michel, C. M., Bréchet, L., Schiller, B., & Koenig, T. (2024). Current state of EEG/ERP microstate research. *Brain Topography*, 37(2), 169–180.
- Musso, F., Brinkmeyer, J., Mobascher, A., Warbrick, T., & Winterer, G. (2010). Spontaneous brain activity and EEG microstates. A novel EEG/fMRI analysis approach to explore resting-state networks. *NeuroImage*, 52(4), 1149–1161.
- 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.
- Pan, D. N., Hoid, D., Gu, R. L., & Li, X. (2020). Emotional working memory training reduces rumination and alters the EEG microstate in anxious individuals. *NeuroImage: Clinical*, 28, 102488.
- Pan, M. W., Song, J. Q., & Deng, H. (2019). Development and validation of self-rating scales in online English writing diagnostic tests. *Frontiers of Foreign Language Education Research*, 2(4), 33–41.
- [潘鸣威, 宋杰青, 邓华. (2019). 在线英语写作诊断测评中自评量表的开发与效度验证. *外语教育研究前沿*, 2(4), 33–41.]
- Poulsen, A. T., Pedroni, A., Langer, N., & Hansen, L. K. (2018). Microstate EEGlab toolbox: An introductory guide. *BioRxiv*, 289850.
- Qiu, J., Li, H., Jou, J., Liu, J., Luo, Y., Feng, T., ... Zhang, Q. (2010). Neural correlates of the “Aha” experiences: Evidence from an fMRI study of insight problem solving. *Cortex*, 46(3), 397–403.
- Ritter, S. M., & Dijksterhuis, A. (2014). Creativity—the unconscious foundations of the incubation period. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 215.
- Rominger, C., Papousek, I., Perchtold, C. M., Weber, B., Weiss, E. M., & Fink, A. (2018). The creative brain in the figural domain: Distinct patterns of EEG alpha power during idea

- generation and idea elaboration. *Neuropsychologia*, 118, 13–19.
- Satpute, A. B., & Lindquist, K. A. (2019). The default mode network's role in discrete emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(10), 851–864.
- Schiller, B., Gianotti, L. R., Baumgartner, T., Nash, K., Koenig, T., & Knoch, D. (2016). Clocking the social mind by identifying mental processes in the IAT with electrical neuroimaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(10), 2786–2791.
- Shen, W. B., Liu, C., Luo, J., & Yu, J. (2012). Brain perceived intuitively mental impasses in insight problem solving: An ERP study. *Acta Psychologica Sinica*, 44(7), 924–935. [沈汪兵, 刘昌, 罗劲, 余洁. (2012). 顿悟问题思维僵局早期觉察的脑电研究. *心理学报*, 44(7), 924–935.]
- 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.
- Sun, Y., Cai, Y., & Lu, S. (2015). Hemispheric asymmetry in the influence of language on visual perception. *Consciousness and Cognition*, 34, 16–27.
- 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.
- Van Der Werf, J., Jensen, O., Fries, P., & Medendorp, W. P. (2008). Gamma-band activity in human posterior parietal cortex encodes the motor goal during delayed prosaccades and antisaccades. *The Journal of Neuroscience*, 28(34), 8397–8405.
- Wang, H., Guo, Y., Tu, Y., Peng, W., Lu, X., Bi, Y., Iannetti, G. D., & Hu, L. (2023). Neural processes responsible for the translation of sustained nociceptive inputs into subjective pain experience. *Cerebral Cortex*, 33(3), 634–650.
- Wang, T., Zhang, Q., Li, H., Qiu, J., Tu, S., & Yu, C. (2009). The time course of Chinese riddles solving: Evidence from an ERP study. *Behavioural Brain Research*, 199(2), 278–282.
- Yang, J. (2012). The role of the right hemisphere in metaphor comprehension: A meta-analysis of functional magnetic resonance imaging studies. *Human Brain Mapping*, 35(1), 107–122.
- Yeshurun, Y., Nguyen, M., & Hasson, U. (2021). The default mode network: Where the idiosyncratic self meets the shared social world. *Nature Reviews Neuroscience*, 22(3), 181–192.
- Yu, Y., Oh, Y., Kounios, J., & Beeman, M. (2022). Dynamics of hidden brain states when people solve verbal puzzles. *NeuroImage*, 255, 119202.
- Yue, L., Iannetti, G. D., & Hu, L. (2020). The neural origin of nociceptive-Induced gamma-band oscillations. *The Journal of Neuroscience*, 40(17), 3478–3490.
- 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.
- Zhao, Q., Li, S., Chen, S., Zhou, Z., & Cheng, L. (2015). Dynamic neural processing mode of creative problem solving. *Advances in Psychological Science*, 23(3), 375–384. [赵庆柏, 李松清, 陈石, 周冶金, 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.]
- Zhao, Q., Wei, L., Li, Y., Zhou, Z., Zhao, L., & Tang, L. (2017). Right hemispheric dominance in forming novel semantic associations. *Acta Psychologica Sinica*, 49(11), 1370–1382. [赵庆柏, 魏琳琳, 李瑛, 周冶金, 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.]
- Zhou, S., Chen, S., Wang, S., Zhao, Q., Zhou, Z., & Lu, C. (2018). Temporal and spatial patterns of neural activity associated with information selection in open-ended creativity. *Neuroscience*, 371, 268–276.

The micro-dynamic neural processing model of insight problem-solving

CHEN Yan¹, LI Ying¹, LIU Guanxiong¹, YU Quanlei¹, LIANG Zheng^{1,2}, CHEN Shi^{3,4}, ZHAO Qingbai¹

⁽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⁾ Department of Psychological and Cognitive Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China) ⁽³⁾ Hubei Health Industry Development Research Center, School of Medical Humanities, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China)

⁽⁴⁾ Hubei Shizhen Laboratory, Wuhan 430000, China)

Abstract

Creative problem-solving relies upon distinct processes of reasoning and insight. Accumulating empirical evidence has demonstrated that insight, rather than manifesting as a transient ‘eureka!’ moment, constitutes a dynamic cognitive sequence. While descriptions of the ‘eureka moment’ itself provide information about potential neural markers present at the time of a problem is solved, our understanding of how multiple cognitive processes interact during insight problem-solving remains limited. Furthermore, unconscious processing is considered crucial for solving insight problems, yet due to its elusive nature, few studies have directly investigated this process.

Based on this, the present research investigated insight problem-solving in a simple random sample of 37 right-handed participants (average age 21.2 years old, 17 females) who spoke Chinese as their mother tongue and English as their second language, and English language proficiency was standardized as IELTS ≥ 7 / TOEFL ≥ 95 / the major of study at the university is English, and TEM4 ≥ 80 to participate in this experiment. The experiment employed the Compound Remote Associates (CRA) test, a classic verbal insight problem-solving paradigm. In this task, three words were simultaneously presented on the screen, requiring participants to generate a single word that could form a meaningful compound word or phrase with each of the three stimulus words. Electroencephalographic (EEG) activity was continuously recorded throughout task performance. In data analysis, the problem-solving process was artificially divided into three distinct stages: initial problem presentation, the process of problem solving, and response execution stage. Statistical comparisons of the microstates (derived from cluster-based topographic maps that reveal cognitive processes occurring at millisecond resolution) were conducted across these stages under insight, non-insight, and unresolved conditions. This approach aimed to characterize the neural response patterns associated with insight problem-solving.

The main results show that: (1) Microstate C, which reflects components of the default mode network, demonstrated a significantly higher rate of occurrence under the insight condition and exhibited more frequent transitions with both Microstate A (associated with speech information processing) and Microstate D (linked to attentional processes and executive functions); (2) Microstate B, associated with visual processing, showed a significantly increased rate of occurrence during the initial stage of both insight and non-insight problem-solving conditions. However, its presence persisted across all three processing stages exclusively in the non-insight condition; (3) In the unresolved condition, Microstate C displayed a significantly elevated rate of occurrence, with its dominance progressively increasing throughout the problem-solving process; (4) Microstate D exhibited significantly more frequent transitions to both Microstate B and Microstate A across successful problem-solving conditions. Furthermore, Microstate D demonstrated a significantly higher rate of occurrence during the initial problem presentation stage.

The experimental results revealed distinct neural response patterns across different problem-solving conditions at the electrophysiological level. Successful problem-solving was found to depend on both the comprehensive representation of information and the active engagement of executive functions. Notably, the microstate associated with the default mode network (DMN) exhibited significant activation exclusively during the insight condition. This suggests that unconscious cognitive processes may play a crucial role in insight problem-solving.

Keywords insight problem-solving, microstate, unconscious processing

附录:

中国英语能力自评量表

附表1 组构知识运用能力自我评价量表

九级	我能在学习、职场等各种场合的语言活动中自如运用组构知识,恰当选用词汇和句式结构,篇章结构严谨,表达自然流畅,口头表达时语音、语调自然。 我能有目的地通过多种途径不断学习新的语言知识。
八级	我能在不同场合表达不同的目的、观点和态度时做到语音语调得体流畅。 我能根据交际目的和职场需求,选用恰当的词汇和句式结构组织信息,表达准确自然。 我能选择、分析、归纳、整合多种信息,形成连贯、逻辑的语言表达。 我能通过阅读、参加学术活动等多种途径来巩固和提高英语水平。
七级	我能在学术或职场言语交际中有效使用多种语音语调手段,做到自然流畅。 我能在语言表达中准确、恰当地使用词汇和多种句式结构。 我能根据语言活动或任务要求运用语篇知识,有效组织信息,表达得体。 我能利用各种适合自己的英语学习工具和学习方式来巩固英语语言知识。
六级	我能理解和使用常见固定表达、句式结构。 我能使用较为丰富的词汇和句式结构表达思想,做到意义准确,语音、语调自然。 我能恰当使用修辞和衔接手段表达对比、对照、分类或递进等语篇关系。 我能自行纠正或向他人求助纠正自己表达中的语法错误。
五级	我能就日常学习或工作交流的需要进行表达,语音、语调准确。 我能选用恰当的词语、句式结构和语法手段进行陈述、阐释、劝说。 我能使用衔接手段表示对比、因果、递进或转折,表达连贯、有逻辑性。 我能使用多种参考资料和工具书解决较复杂的语言疑难问题。
四级	我能使用恰当的词汇描述事物、行为、特征及定义概念等。 我能借助多种句式结构理解信息、描述事件或表达个人意愿,口头表达时语音、语调正确。 我能使用简单的衔接手段表达意义,使内容连贯、有逻辑性。 我能总结自己语法知识的弱项,并寻求改进的方法。
三级	我能运用基本句式结构知识理解信息和表达信息。 我能在进行表达时用词恰当,意义清晰,语音、语调基本正确。 我能理解语篇上下文间的逻辑关系,并能使用简单的衔接手段表达转折、因果等关系。 我能运用相关背景知识辅助理解词汇与语法现象,并通过多种方法学习或巩固语法知识。
二级	我能使用基本的词语、句式和时态就熟悉的话题进行交流。 我能使用简单连接词连贯表达,语音、语调基本正确。 我能书写英语字母、单词,注意大小写,格式规范。 我能使用适合自己的方法学习语法和语篇知识。
一级	我能用正确的语音、语调朗读字母表。 我能使用最常用的单词或短句表达问候,进行简单介绍。 我能通过多种方式学习语音、词汇和固定表达。

附表2 听力理解能力自我评价量表

九级	我能听懂各种话题、各种形式的口头表达,掌握要点和细节,理解言外之意,并对所听内容进行分析、推断与评价。
八级	我能听懂相近领域的专业讲座和演讲,理解主旨大意。 我能听懂语速较快的含有方言的电视访谈节目,领会说话者的观点和态度。 我能看懂带有口音的影视剧,理解台词在特定语境中的言外之意。 我能听懂语速较快的新闻节目、纪录片等,理解其所涉及的社会文化内涵。
七级	我能听懂有关政治、经济、历史、文化等抽象话题的讨论和辩论,评价说话者的观点与立场。 我能听懂语速较快的含有双关语、隐喻等修辞手段的对话,理解说话者话语的隐含意义。
六级	我能听懂与自己专业领域相关的公开课,理解其主要内容。 我能听懂与自己专业领域相关的讲座和报告,掌握报告的主要内容,理解信息组织方式,如整体框架、衔接手段等。 我能听懂有关社会、文化热点问题的广播和电视节目,理解其主要内容,分辨相关观点和态度。 我能听懂商务交流、求职面试等场合中语速正常的对话,理解说话者的意图。

续表

- 五级 我能听懂语速正常的讲座或报告, 获取要点和细节。
我在与英语为母语者就一般性话题进行交流时, 能理解对方话语的文化内涵。
我能听懂电视节目中的简短新闻, 借助图像理解大意。
- 四级 我能听懂语速正常、与自己兴趣相关的演讲, 理解大意。
我在与人就熟悉话题进行交谈时, 能明白对方的观点和态度。
我能听懂发音清晰、话题熟悉的辩论, 把握辩论双方的主要论点和论据。
- 三级 我能听懂语速较慢的简短发言, 获取关键信息。
我在收听感兴趣的广播节目时, 能识别其主题。
我在观看熟悉的电视节目时, 能获取主要信息。
- 二级 我能听懂简短的故事, 获取人物、时间、地点等信息。
我能听懂简单的日常生活对话, 获取天气、电话号码、年龄等信息。
我能听懂语速很慢的简单指令、口头通知等, 如“Could you please open the door?”。
- 一级 我在听简单对话时, 能听懂与自己、家庭、学校有关的单词和短语, 如 school。
我能听懂关于周边事物的简单介绍, 如“This is a chair。”。
我在观看简单动画片时, 能听懂其中的简短对话。

附表 3 阅读理解能力自我评价量表

- 九级 我能读懂语言复杂、内容深刻、跨专业的各类材料, 如学术论文、文学原著或应用文等。
我能从多个角度评价阅读材料的价值。
- 八级 我能读懂语言复杂的文学原著, 并欣赏作者的语言表达艺术。
我能读懂专业领域相关的学术论文或科技文献并评价其研究方法。
我能通过研读多篇同类型阅读材料, 综合评价作品的语言风格。
- 七级 我能读懂语言复杂的小说及文化类作品, 并鉴赏作者的语言特点。
我能读懂相关专业领域的书评。
我能通过浏览目录, 预测全书(文)的主要内容。
- 六级 我能读懂语言较复杂的小说和议论文。
我能理解和概括说明性材料中被说明对象的主要特征。
我能读懂相关专业领域的操作指令并理解专业术语。
我能通过阅读材料的选词、修辞方式等, 推测作者态度。
- 五级 我能阅读一般题材的议论文或话题熟悉的评论性文章。
我能理解语言较复杂的社会生活故事中的各种常见修辞手法。
我能在读应用文, 如会议纪要等时, 提取主要信息。
我能在阅读中适时概括已读过的内容。
- 四级 我能阅读简短的故事、散文或说明文。
我能读懂旅游见闻中关于事件、人物、地点等信息。
我能从社会生活相关的简短议论文中分析作者的观点。
我能利用略读、寻读、跳读等不同的阅读技巧, 找出文章中的重要信息。
- 三级 我能读懂语言简单的各类故事。
我能从散文中提取人物、景物及其他细节信息。
我能理解简短书信中作者的观点。
我能通过关键词或主题句帮助理解文章的主要内容。
- 二级 我能读懂语言简单的有关日常生活的短文。
我能从便条、通知、任务指令等材料中获取具体信息。
我能从文章的描写中概括人物或事物的主要特征。
我能借助插图理解图文小故事。
- 一级 我能阅读语言简单的绘本或小故事, 识读其中的常见词并理解其主要内容。
我能感受童谣中的押韵。

附表 4 口头表达能力自我评价量表

- 九级 我能在各种场合中就广泛的话题进行自如、深入的交流和讨论。
我能就复杂、有争议的问题进行有效的交流和磋商, 语言幽默、机智。
我能就专业性话题发表富有感染力的即兴演说, 根据听众的反应恰当地调整表达内容和方式。

八级	我能就广泛的话题展开充分、有效的讨论。 我能全面、有条理地分析和总结内容较抽象的文章或讲话。 我能在学术研讨中就专业性话题准确、自如地发表自己的观点。 我能在商务电话交流、纠纷处理中,就各种事宜进行有效的沟通和协商。
七级	我能简要分析文学评论,说明文学作品的艺术效果。 我能就抽象的话题发表个人观点,阐述充分、有条理。 我能在专业讨论中综合提炼讨论要点,恰当评述他人观点。 我能就社会热点问题与他人即兴交流,表达时观点明确、思路清晰。
六级	我能生动、详细地描述个人经历。 我能在表达中及时地自我纠正语言错误,适时转移话题。 我能就社会热点问题或专业领域内熟悉的话题与他人展开讨论。 我能在处理日常纠纷或突发情况时,进行有效的口头交流或协商。 我能清楚地分析社会热点问题的现状、成因和解决方法,并发表意见,表明立场。
五级	我能详细讲述个人经历,准确表达个人感受。 我能在准备后有条理地阐述对社会热点问题的看法。 我能就日常生活事宜,如商务、旅游、购物等进行有效的口头交流或协商。 我能在准备后就与自己专业相关的话题简短地发表意见,发言时按逻辑顺序陈述观点,突出主要思想。
四级	我能详细描述自己的人生计划或理想。 我能详细介绍自己的学习或工作情况。 我能在发言中对主要观点进行解释,并适当地用证据予以支持。 我能就一些日常交流,如电话预订、接待外宾、购物等进行简单的交谈。 我能在日常交际中,如谈话、聊天中适时地回应对方,使用重复、中英文转换、字面翻译等手段确保理解无误。
三级	我能简单地表达个人需求、意愿和感受。 我能就日常熟悉话题简单谈论自己的观点。 我能在描述或介绍时,适当使用图片等多媒体辅助手段。 我能就熟悉的话题与他人进行简单交流,语音、语调和时态基本正确,表达比较连贯。
二级	我能简单地描述熟悉的物品和地方。 我能用简单的语言进行基本的日常交流,发音清楚,语调正确。 我能经过准备,作简短的口头陈述,或讲述简单、熟悉的小故事。 我能在课堂中根据文字提示或借助老师帮助,简单表达自己的看法。
一级	我能与他人互致问候或祝福。 我能简短地介绍自己或熟悉的人。 我能在听不懂的情况下,用简单的词汇要求对方重复。

附表5 书面表达能力自我评价量表

九级	我能为英文报刊撰写社论。 我能进行专业文学创作。
八级	我能对所收集的文献进行综述和评价。 我能撰写学术会议发言稿。 我能借助现代信息技术收集相关学术文献。
七级	我能撰写文学或影视作品的评论。 我能就专业相关话题整理文献。 我在听学术讲座时,能做准确、详细的笔记。 我能借助修辞手法增强表达效果。 我能在完成论文初稿后从内容、结构和格式等方面进行修改。
六级	我能撰写专业论文的英语摘要。 我能写简短的影评、书评或剧评。 我能写信或邮件向媒体反映社会、民生等问题。 我能用同义词或近义词来避免表达中的词语重复。
五级	我能写国际交流项目的申请书。 我能写电影、戏剧、展览的观后感。我能写读书报告。 我能通过收集不同来源的材料来提高写作质量。 我能根据老师或同学的反馈修改文章结构和内容。 我能写符合学术规范的议论短文。我能写与学习、工作相关的常见应用文。

续表

-
- 四级 我能就自己熟悉或感兴趣的话题发表看法。
我能根据所读材料写概要。
我能就某一社会实践活动写出简短汇报。我能写个人简历。
我能在校报等媒体写简短的新闻报道。
我能在写作前列出写作提纲。我能用主题句突出段落的主旨大意。
我能检查并改正作文中的用词和衔接错误。
- 三级 我能根据老师给的提示编写小故事。
我能就熟悉的话题写作文。我能写信或邮件告诉朋友我的近况。
我能为班级活动写出日程安排。
我能在写作文前收集有用的词句。
我能使用连接词来连接句子。我能检查并修改明显的语法错误。
- 二级 我能给同学写生日或节日贺卡。
我能描述动物的特征。
我能写信介绍自己。我能描述对天气或季节的感受。
我能在老师的帮助下改正拼写、语法、标点错误。
- 一级 我能正确书写 26 个英文字母。
我能根据老师给的词语或例句简单描述图片。
我能根据图片提示写单词。
我能检查并改正自己的拼写错误。
-

附表 6 语用能力自我评价量表

-
- 九级 我能准确领会各种交际场合中对方表达的意图。
我能用不同的修辞手法,巧妙表达批评或讽刺等意图。
我能灵活运用恰当的语言与他人交流,得体地应对不同交际情境,表达纯正。
- 八级 我能理解正式场合中多方表达的不同立场。
我能根据交际情境,恰当使用多种方式实现交际目的。
我能在不同场合准确表明立场、倾向、态度等。
- 七级 我能甄别多种劝说方式的细微差异,如“no smoking”和“It would be nice if you could...”的区别。
我能在正式场合得体地表达感谢和慰问。
我能理解文化差异引起的言语冲突,并有效地给予解释。
我能根据交际对方的文化背景选择得体的语言进行交际。
- 六级 我能在正式场合中理解并委婉地表达质疑,如“Your performance would have been better if you had done...”。
我能理解正式场合的恭维并合理地做出回应,如“Your topic is very interesting.”、“Thank you. I am glad you like it, but...”。
我能根据不同的社交场合选择恰当的话语,以实现交际目的。
- 五级 我能在不同社交场合中理解并表达遗憾或惋惜,如“I wish I could go back and start all over again.”。
我能在较为正式场合理解并得体地表达感谢,如“Thanks go first to...”。
我能在较为正式场合用简单的话语表达协商,如“Could I interrupt you for a minute?”。
- 四级 我能在一般社交场合中理解并合理地表达抱怨,如“I have been waiting for two hours, but...”。
我能在日常生活中理解并表达简单的邀请,如“Wanna come?”。
我能在一般社交场合中礼貌地与他人交谈。
- 三级 我能理解日常生活中较委婉的请求,如“Could you...please?”。
我能理解并恰当地表达简单的建议,如“Why don't you speak slowly?”。
我能在餐馆、商店等公共场合请求服务,如“Can I have...?”等。
- 二级 我能理解并表达日常生活中的简单请求,如“Excuse me.”、“Can you help me please?”。
我能理解日常生活中的简单指示,如“Sit down.”、“Come in.”。
我能用简单的话语表达祝福,如“Happy New Year!”、“Merry Christmas!”。
- 一级 我能理解并恰当地表达日常生活中的简单问候,如“Hello!”、“How are you?”。
我能领会日常生活中的赞赏并简单地表示感谢,如“Great!”、“Thank you.”。
我能用简单的话语表达歉意或请求原谅,如“Sorry.”。
-

复合远距离联想测验(CRA):

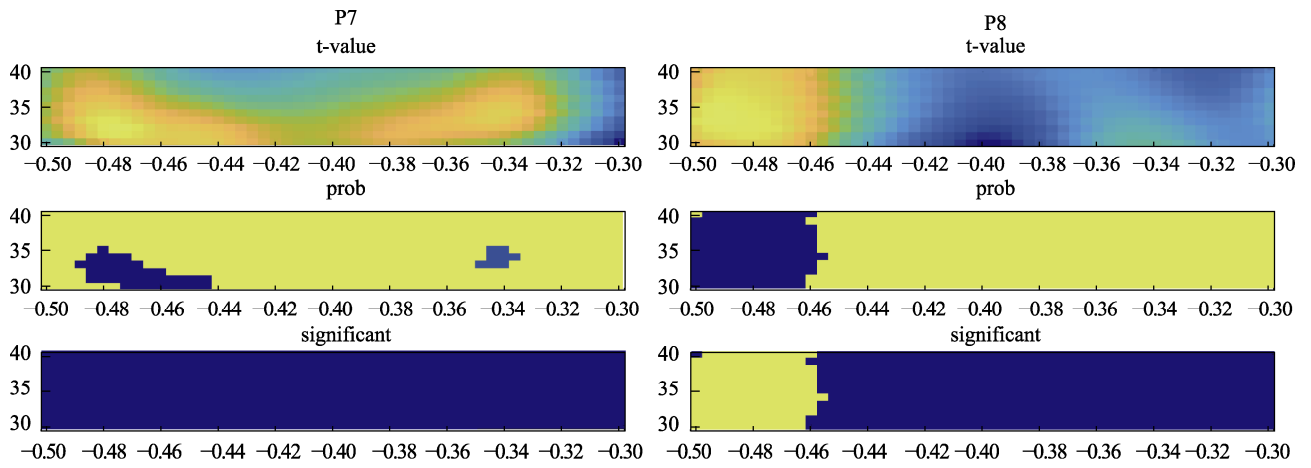
	问题	答案
1	aid/rubber/wagon	band
2	flake/mobile/cone	snow
3	cracker/fly/fighter	fire
4	safety/cushion/point	pin
5	cane/daddy/plum	sugar
6	dream/break/light	day
7	fish/mine/rush	gold
8	political/surprise/line	party
9	measure/worm/video	tape
10	high/district/house	school/court
11	sense/courtesy/place	common
12	worm/shelf/end	book
13	piece/mind/dating	game
14	flower/friend/scout	girl
15	river/note/account	bank
16	print/berry/bird	blue
17	pie/luck/belly	pot
18	date/alley/fold	blind
19	opera/hand/dish	soap
20	cadet/capsule/ship	space
21	fur/rack/tail	coat
22	stick/maker/point	match
23	hound/pressure/shot	blood
24	fox/man/peep	hole
25	sleeping/bean/trash	bag
26	dust/cereal/fish	bowl
27	light/birthday/stick	candle
28	food/forward/break	fast
29	shine/beam/struck	moon
30	peach/arm/tar	pit
31	water/mine/shaker	salt
32	palm/shoe/house	tree
33	basket/eight/snow	ball
34	wheel/hand/shopping	cart
35	right/cat/carbon	copy
36	home/sea /bed	sick
37	nuclear/feud/album	family
38	sandwich/house/golf	club
39	cross/rain/tie	bow
40	sage/paint/hair	brush
41	french/car/shoe	horn
42	boot/summer/ground	camp
43	chamber/mask/natural	gas
44	mill/tooth/dust	saw
45	main/sweeper/light	street
46	pike/coat /signal	turn

续表

	问题	答案
47	office/mail/hat	box
48	fly/clip/wall	paper
49	age/mile/sand	stone
50	catcher/food/hot	dog
51	wagon/break/radio	station
52	tank/hill/secret	top
53	health/taker/less	care
54	lift/card/mask	face
55	dress/dial/flower	sun
56	force/line/mail	air
57	guy/rain/down	fall
58	eight/skate/stick	figure
59	down/question/check	mark
60	animal/back/rat	pack
61	officer/cash/larceny	petty
62	pine/crab/sauce	apple
63	house/thumb/pepper	green
64	carpet /alert/ink	red
65	master/toss/finger	ring
66	hammer/gear/hunter	head
67	knife/light/pal	pen
68	foul/ground/mate	play
69	change/circuit/cake	short
70	way/board/sleep	walk
71	blank/list/mate	check
72	tail/water/flood	gate
73	marshal/child/piano	grand
74	cover/arm/wear	under
75	rain/test/stomach	acid
76	time/blown/nelson	full
77	pile/market /room	stock
78	mouse/bear/sand	trap
79	cat /number/phone	call
80	keg/puff/room	powder
81	trip/house/goal	field
82	fork/dark/man	pitch
83	fence/card/master	post
84	test/runner/map	road
85	dive/light/rocket	sky
86	man/glue/star	super
87	tooth/potato/heart	sweet
88	illness/bus/computer	terminal
89	type/ghost/screen	writer
90	mail/board/lung	black
91	teeth/arrest /start	FALSE
92	iron/shovel/engine	steam

续表

	问题	答案
93	wet/law/business	suit
94	rope/truck/line	tow
95	off/military/first	base
96	spoon/cloth/card	table
97	cut/cream/war	cold
98	note/chain/master	key
99	shock/shave/taste	after
100	wise/work/tower	clock
101	grass/king/meat	crab
102	baby/spring/cap	shower
103	break/bean/cake	coffee
104	cry/front/ship	battle
105	hold/print/stool	foot
106	roll/bean/fish	jelly
107	horse/human/drag	race
108	oil/bar/tuna	salad
109	bottom/curve/hop	bell
110	tomato/bomb/picker	cherry
111	pea/shell/chest	nut
112	line/fruit/drunken	punch
113	bump/egg/step	goose
114	fight/control/machine	gun
115	home/arm/room	rest
116	child/scan/wash	brain
117	nose/stone/bear	brown
118	end/line/lock	dead
119	control/place/rate	birth
120	lounge/hour/napkin	cocktail
121	artist/hatch/route	escape
122	pet/bottom/garden	rock
123	mate/shoes/total	running
124	self/attorney/spending	defense
125	board/blade/back	switch
126	land/hand/house	farm
127	hungry/order/belt	money
128	forward/flush/razor	straight
129	shadow/chart/drop	eye
130	way/ground/weather	fair
131	cast /side/jump	broad
132	back/step/screen	door
133	reading/service/stick	lip
134	over/plant/horse	power



附图 1 顿悟条件与非顿悟条件下的置换检验(电极 P7、P8)