

# 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\*

邢 强<sup>1</sup> 孙海龙<sup>2</sup> 占丹玲<sup>3</sup> 胡 婧<sup>1</sup> 刘 凯<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 广州大学教育学院; 未成年人心理健康与教育神经科学实验室, 广州 510006) (<sup>2</sup> 暨南大学管理学院, 广州 510632)

(<sup>3</sup> 广东松山职业技术学院, 韶关 512126)

**摘 要** 执行功能是否影响顿悟问题解决, 顿悟问题解决中的表征重组阶段是否涉及执行功能仍存在争议。基于此, 通过 2 个研究探讨执行功能对顿悟问题解决的影响。研究 1 初步探讨执行功能与个体顿悟能力之间的关系, 结果发现个体的执行功能与其顿悟问题解决成绩之间存在显著正相关, 刷新功能可以显著预测顿悟成绩; 研究 2 使用汉字字谜任务, 通过行为与 ERPs 技术探讨执行功能对言语顿悟问题解决的影响, 其中研究 2a, 行为实验发现高工作记忆刷新能力的个体反应时显著小于低工作记忆刷新能力的个体, 说明执行功能中工作记忆刷新亚成分影响顿悟问题解决。研究 2b 脑电结果发现, “顿悟”条件较之“无顿悟”条件诱发了一个更强的早期成分 P2 和 N2, 以及中晚期 P3。P2 可能主要反映人脑对思维僵局的早期觉察, 受到执行功能高低的影响。280~500 ms 内, 中晚期 P3 则主要体现以新旧思路交替为特征的僵局打破过程, 不受执行功能高低的影响, 结果表明汉字字谜顿悟问题的表征重组阶段并未受到执行功能的影响, 更倾向认为该阶段为一个突进的过程。综合 2 个研究说明, 执行功能影响顿悟问题解决, 其主要作用于顿悟问题解决过程的问题空间搜索阶段, 而表征重组阶段是一个突进式的过程。

**关键词** 顿悟; 表征重组; 执行功能; 无意识; 事件相关电位

**分类号** B842

## 1 引言

问题解决是指在问题空间中进行搜索, 以便使问题的初始状态达到目标状态的思维过程, 问题解决过程中, 需要执行功能的参与。执行功能是一个囊括所有复杂、高级认知过程的集合概念, 这些高级认知过程是个体在实施目的行为过程中以动态、灵活的方式协调多个认知子系统活动的复杂认知过程(谭金凤, 伍姗姗, 徐雷, 王丽君, 陈安涛, 2013)。一般认为执行功能包含 3 个亚成分: 抑制功能、转换功能和工作记忆刷新功能(周雅, 2013)。

顿悟则是一类特殊的问题解决, 解决者在解决顿悟问题后并不能像一般问题一样报告其解题步骤。Bowden 和 Jung-Beeman (2007)认为顿悟是一种

突然地、直觉性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”体验的现象。那么, 顿悟是如何发生的? 作为特殊问题解决的顿悟问题是否会受到执行功能的影响?

已有研究认为顿悟问题解决可以区分为多个不同阶段, 如 Ash 和 Wiley (2006)认为顿悟问题解决的过程主要包含 4 个阶段: 初始表征阶段、问题空间搜索阶段、僵局阶段和表征重组阶段。其中在初始表征阶段, 问题解决者会对问题产生不适当的表征; 问题空间搜索阶段则贯穿于整个解决者形成错误初始表征的错误问题空间中, 从而导致僵局的产生; 表征重组阶段则是一个打破之前形成的僵局而重组问题表征, 进而使问题得到解答的阶段。Gilhooly 和 Fioratou (2009)通过比较个体的顿悟与

收稿日期: 2016-01-25

\* 国家自然科学基金(31571144)和广州市教育科学规划面上重点项目(1201421342)资助。

通讯作者: 邢强, E-mail: qiang\_xingpsy@126.com

非顿悟问题解决过程的差异,认为顿悟问题解决中同样受到执行功能的影响。具体而言,这两种类型的问题都在问题的初始表征阶段存在一个内部表征。在问题空间搜索阶段,都可能会采取常规的分析方法来解题,非顿悟问题在这个阶段能得到答案。然而,顿悟问题却需要打破僵局、重组问题表征才能得到答案。换言之,顿悟和非顿悟问题一样,在初始表征阶段都有一个问题表征搜索过程,这个阶段是一个进行渐进解答的阶段,需要执行功能的参与(Gilhooly & Fioratou, 2009)。如 Gilhooly 和 Murphy (2005)探讨了顿悟问题解决与图形流畅性任务(该任务用于测量优势反应的抑制以及基础反应的转换)的关系,结果发现在顿悟问题解决中均有抑制与转换的参与。Chein 和 Weisberg (2014)通过比较不同工作记忆容量和注意能力的个体在解决顿悟问题上的差异,同样发现个体在工作记忆容量和注意能力上的差异可以显著预测个体顿悟问题解决的成绩。因此,研究者认为顿悟问题解决过程中同时涉及工作记忆容量和注意资源。但与非顿悟问题不一样的是,非顿悟问题可以通过问题表征的搜索找到答案,而顿悟问题的解决则需要问题表征搜索之后的表征重组到一个适当结构,问题才能得到解决。由此可见,表征重组是解决顿悟问题认知机制的关键。然而表征重组阶段是否受到执行功能的影响仍存在争议。Fleck 和 Weisberg (2004)认为重组是发生在解决问题失败后,在改变初始表征的一些少量增加的、可报告的步骤中。与之相反,有研究认为重组包含潜意识的改变问题表征,是导致问题在现象逻辑上突然解决的一种不可报告的过程(Jung-Beeman et al., 2004; Öllinger, Jones, & Knoblich, 2006)。

随着当前认知神经科学技术的发展,事件相关电位技术(ERPs)为解决顿悟问题的认知机制提供了新的手段。ERP 的研究需要经过多次的叠加从而将认知事件相关的微弱电位变化从 EEG 中提取出来,这需要大量的刺激资源(邢强等, 2013)。而汉字字谜的丰富性为研究顿悟问题重组阶段的认知机制提供了充足的材料。但以往研究中汉字字谜字数不固定(Luo & Niki, 2003; Luo, Niki, & Philips, 2004; 罗劲, 2004; 邱江, 张庆林, 2007)。这种字谜谜面数目不确定或过长可能会产生不同程度的工作记忆负荷,以致对随后谜底的进一步加工产生影响(沈汪兵, 刘昌, 张小将, 陈亚林, 2011),因此参考前人研究的字谜任务(沈汪兵等, 2011; 邢强等,

2013),本实验均采用三字谜,答案为一个汉字的字谜任务作为脑电实验的实验材料。

关于顿悟问题解决的认知机制,买晓琴、罗劲、吴建辉和罗跃嘉(2005)运用事件相关电位(ERPs)技术对顿悟的时间进程进行了研究。研究发现呈现谜语答案以后,“有顿悟”反应比“无顿悟”反应的 ERP 波形在 250~500 ms 内有一个更加负性的偏移。这个差异波的潜伏期约为 380 ms (N380),且最大波幅值锁定在 Cz 电极点。他们认为 N380 可能与 N2、ERN/Ne 或 Stroop 效应中的 ERP 成分一样,主要与认知冲突有关。沈汪兵、刘昌、罗劲和余洁(2012)以三字谜为实验对象探讨了顿悟过程中思维僵局早期觉察的脑电机制,结果发现“无僵局”和“有僵局”谜题主动解题过程的脑认知活动差异主要表现为早期 P170 和晚期的晚正成分 LPC (620~800 ms)上。“无僵局”谜题的解题过程诱发了较小的 P170 和 LPC,“有僵局”谜题的解题过程则诱发了较大的 P170 和 LPC。根据已有研究,我们推测顿悟问题解决的不同阶段可能存在着特定 ERP 成分。因此,我们通过在个体执行功能水平的个体顿悟问题解决过程中的脑电特点,探讨执行功能与言语顿悟问题解决的关系。据此,分 2 个研究加以探讨。研究 1 初步探讨执行功能与顿悟问题解决能力的相关关系,研究 2 则针对言语顿悟问题,其中研究 2a 运用行为实验,研究 2b 则采用 ERPs 技术进一步探讨执行功能对顿悟问题解决的作用。

## 2 研究 1 执行功能与顿悟问题解决能力的关系研究

### 2.1 研究目的

初步探讨执行功能与顿悟能力之间的关系。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 被试

随机选取广州大学 86 名本科生与研究生(男生 36 人,女生 50 人)。被试年龄在 20~25 岁,经测试所有被试均为右利手,视力或者矫正视力正常,无色盲及色弱现象,本人或直系亲属中无精神病史。所有被试之前均未参加过类似实验。由于实验采取匿名形式,且并不存在明显的伦理道德问题,实验前获得被试口头知情同意后收集数据。实验结束后,被试获得若干报酬。

#### 2.2.2 实验材料

##### (1) 执行功能任务

工作记忆刷新测验采用点色位置刷新任务

(color dots updating) (陈天勇, 李德明, 2005)。首先, 在电脑屏幕中央有一个 4×4 的栅格, 格子中有 3 个不同颜色的圆点(红、黄、绿), 被试需要尽快记住格子中 3 个点所在的位置(呈现时间为 4 s)。随后, 在格子的中央以 2 s/个的速度, 逐个出现一些带颜色的箭头(箭头呈现 1500 ms, 空屏 500 ms), 要求被试在头脑中进行以下操作: 与箭头颜色相同的圆点按箭头所指方向移动一格。当所有箭头呈现完毕后, 被试在答题纸上分别写下 3 个色点移动后的位置。每回答正确一个得 1 分, 完全正确得 3 分。箭头呈现数量分别为 3、4 和 5 个三种系列, 每一系列中每种颜色的箭头各出现 1~2 次。在实验中, 三种系列的箭头随机安排, 被试事先不知箭头何时呈现完毕。

每个被试首先练习 3 个 trails 以熟悉实验流程, 正式测验, 每种长度各 4 个 trails, 共计 12 个 trails。计分规则为得分越高工作记忆刷新能力越强, 范围(0~36)分。

抑制测验则参考经典的色-词 Stroop 任务(van Veen & Carter, 2005), 测验包含两种情况: 第一, 基线任务。在计算机屏幕中呈现注视点“+”500 ms, 之后屏幕中央出现一个带颜色的小方块(红、黄、蓝、绿), 要求被试对小方块的颜色在确认的情况下尽快按键反应(4 种颜色分别对应 R/Y/B/G 键); 第二, 冲突任务。500 ms 的注视点之后, 随机呈现红、黄、蓝、绿四种颜色的汉字, 且汉字意义与颜色不匹配, 如一个黄色的“红”字, 要求被试对所呈现汉字的颜色在确认的情况下尽快进行按键反应。

基线任务与冲突任务测验采用 ABBA 的顺序, 共 4 个 blocks (组块), 包含 2 个基线任务组块, 两个冲突任务组块, 每个组块均有 24 个 trails。被试的成绩为冲突任务下的平均反应时减去基线任务的平均反应时, 冲突任务下的反应时小于基线任务下平均反应时为无效数据, 计分规则为反应时差值越大, 优势反应抑制能力越差。

转换任务采用连线测验(the Trial Making Test, TMT) (Kortte, Horner, & Windham, 2002), 该任务是一项纸笔测验, 任务规则是让被试按所要求的顺

序把图片上的字母和数字用线连起来(见图 1)。共有 3 种实验材料类型: a 图中只有字母(A-H); b 图中只有数字(1~8); c 图中数字字母各半。对于 a 图, 要求被试从 A 开始按字母升序(A-B-C-D)用线连起来; 对于 b 图, 要求被试从数字 8 开始, 按降序(8-7-6-5)连起来; 对于 c 图, 要求被试用字母的升序, 数字的降序(A-4-B-3-C-2)连起来。材料中, 5 张 a 图, 5 张 b 图, 10 张 c 图。被试成绩为完成 c 图的总时间减去完成 a 图和 b 图的总时间。剔除错误与负值数据, 时间差值越大, 注意转换能力越差。

## (2) 顿悟材料

顿悟问题解决能力测验使用纸笔测试。顿悟问题材料来源于已有研究中的经典顿悟问题 (Sternberg, 1999; Knoblich, Ohlsson, & Raney, 2001; Gilhooly & Fioratou, 2009; Ash & Wiley, 2006; 邢强, 张忠炉, 孙海龙, 张金莲, 王菁, 2013; 邢强等, 2013), 共挑选 40 题。由不参与正式实验的 36 大学生(男、女生各 18 人)解答上述顿悟问题, 并对材料进行熟悉性评定, 无时间限制。首先, 依据熟悉频率大于 0.05 (即超过 1 人评定答过此题, 且知道答案为标准)去掉熟悉性材料 13 题; 剩下的 27 道题的平均解答率由高到低排序, 前 33%和后 33%的题目作为容易材料(解答率高)和困难材料(解答率低)剔除, 最终挑选出 10 道问题作为正式研究的顿悟材料(平均解答率为 0.47)。

## 2.2.3 程序

整体研究分为两个部分, 执行功能测试(包含有 3 个子成分的测量)与顿悟问题解决测试, 所有被试在 30 min 内可以完成所有任务。执行功能的 3 个子成分测验任务之间的顺序, 以及执行功能与顿悟问题解决测试顺序 ABBA 平衡, 但要求被试一次性完成整套实验。其中, 执行功能的抑制与刷新功能的测试使用 Eprime 2.0 程序编程, 显示器为 1024×768 高分辨率的显示器, 连线测试与顿悟问题解决测试则均使用秒表计时施测, 连线任务要求 10 min 之内完成, 顿悟问题答对一题记 1 分, 顿悟问题要求被试在 10 min 内完成。

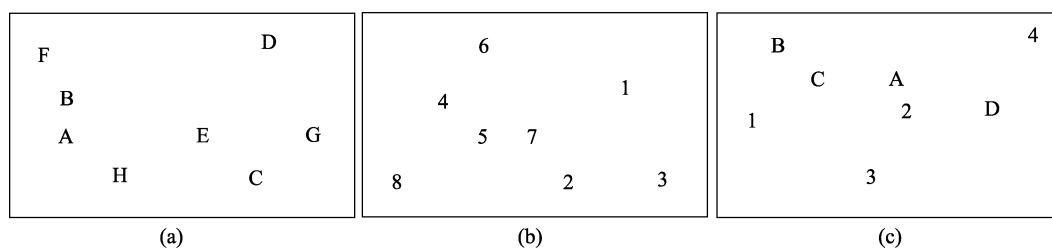


图 1 连线任务图例

## 2.3 结果分析与讨论

### 2.3.1 执行功能子成分与顿悟问题解决的关系

首先分析执行功能各子成分得分之间的相关性,将执行功能各子成分及其顿悟问题成绩转化为标准分数,计算各指标相关系数矩阵(表 1)。结果发现,转换与抑制能力、转换与刷新功能呈显著正相关;抑制与刷新相关性不显著。顿悟得分与个体执行功能的刷新与转换能力呈显著正相关。

表 1 执行功能子成分与顿悟问题解决成绩相关关系矩阵( $N = 86$ )

项目	转换	抑制	刷新	顿悟
转换	1			
抑制	0.375**	1		
刷新	0.407**	0.165	1	
顿悟	0.238*	0.117	0.386**	1

注: \*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$

进一步的,将顿悟问题解决成绩作为结果变量,执行功能 3 个子成分的成绩作为预测变量进行逐步回归分析,结果发现顿悟问题解决能力与预测变量刷新之间的相关系数值为  $R = 0.386$ ,表明顿悟与刷新存在高度显著的线性关系。回归方程能解释总变差的 14.9%,确定系数显示拟合度良好(如表 2)。检验回归系数的显著性,  $F(3, 82) = 5.10$ ,  $p < 0.01$ ,即回归系数具有显著意义。根据下面的回归系数表,可以认定顿悟与刷新直接的回归方程为:顿悟 =  $0.078 \times \text{刷新} + 3.238$ 。

表 2 以顿悟问题解决成绩为因变量(以转换、抑制与刷新功能为自变量)的逐步回归( $N = 86$ )

Model	非标准化系数		标准化系数		
	<i>B</i>	<i>SE</i>	<i>Beta</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
1 常数	3.238	0.857		3.780	0.001
刷新	0.078	0.025	0.345	3.113	0.003

### 2.3.2 执行功能总体水平高低与顿悟的关系

将工作记忆刷新任务、抑制控制任务、注意转换任务的各项测验成绩均高于对应各项平均数的被试定为高执行功能者,均低于对应平均数的定为低执行功能者(李美华,白学军,闫国利,2007),得到高执行功能水平组为 28 人,低执行功能水平组 29 人。对高低执行功能组被试的顿悟成绩进行独立样本  $t$  检验,结果发现高执行功能组的被试顿悟问题解决成绩显著高于低执行功能水平组,  $t(55) = 5.161$ ,  $p < 0.001$ , Cohen's  $d = 0.82$ 。

根据顿悟问题解决的平均成绩 4.81 ( $SD = 1.59$ ),将被试的顿悟成绩分成高低两组,其中,低分组 41 人,高分组 45 人。分别计算顿悟高低得分下与执行功能 3 个子成分的相关,结果表明低顿悟得分与转换得分、刷新得分之间显著相关,  $r = 0.37$ ,  $r = 0.61$ ,高顿悟得分与 3 个子成分之间均无显著相关。

把被试顿悟问题解决得分作为结果变量,执行功能水平高低(3 个分测验成绩低于平均分为低分组,3 个分测验成绩均高于相应平均数为高分组)为预测变量,进一步做回归处理。结果发现,顿悟得分与预测变量水平高低之间的相关系数为  $r = 0.571$ ,即二者存在高线性相关,并且回归方程能解释总变差的 31.4%,拟合度良好,且回归系数具有显著意义( $p < 0.05$ )。

上述结果表明,高执行功能水平组个体的顿悟成绩显著高于低执行功能水平组,执行功能中的刷新功能对顿悟成绩有显著预测作用。刷新主要涉及信息的存储与更新,即通过用新的信息替代旧的信息来更新记忆内容(Collette & van der Linden, 2002)。而顿悟问题解决过程中,顿悟的表征阶段、搜索阶段与重组阶段都是对信息的整合、更新与转换(Ash & Wiley, 2006; Sternberg, 1999; 罗劲, 2004)。在初始表征阶段,对问题的注意状态无疑是形成初始表征的重要因素;而在问题空间的搜索阶段,会受到个体的认知资源广度、分配与监控能力的交互影响(Gilhooly & Fioratou, 2009)。

## 3 研究 2 执行功能对言语顿悟问题解决的影响

### 3.1 研究 2a 执行功能对言语顿悟问题解决影响的行为研究

#### 3.1.1 研究目的

探究执行功能水平的高低是否会对字谜顿悟问题的解决产生影响。

#### 3.1.2 研究方法

##### (1) 被试

被试为广州大学本科生 100 名(女生 49 人,男生 51 人),平均年龄为  $(18.15 \pm 3.1)$  岁。根据研究 1 的方法,区分高低执行功能人数,其中高执行功能 17 人,低执行功能为 19 人。被试的母语均为汉语,均未做过相关实验,实验后给予一定报酬。

##### (2) 材料

在中国汉字字谜词典中收集 180 个三字字谜材料,答案均为一个字,比如,字谜“顶破天”,谜底

“夫”。汉字均为高频字, 由不参与正式研究的 20 名被试对其进行难度评定, 在难度评分高区(较难)与难度评分低区(较易)中各选 65 个字谜作为正式材料, 其中 10 条为练习测试材料, 120 条为正式测验材料。选取较难的字谜主要是为了让被试不容易想出问题的答案, 以便他看到屏幕所呈现的可能谜底(正确匹配的谜底或错误匹配的谜底)时能产生瞬时的顿悟(Qiu et al., 2006; 邱江, 罗跃嘉, 吴真真, 张庆林, 2006; 沈汪兵等, 2012), 例如, 谜面“古代人”, 谜底是“杏”。而较容易的字谜(例如, “三张口”, 谜底是“品”), 被试很容易猜出正确答案, 因此, 当呈现答案时, 他发现自己所猜出的谜底与所给谜底一致时就不会产生顿悟。实验所用字谜的谜面和谜底长度均是固定的, 谜面长度为 3 个汉字, 谜底长度为一个汉字。谜面和谜底均以 38 号楷体呈现于电脑屏幕正中央。

### (3) 程序

实验期间, 所有试次随机呈现。实验分为练习和正式实验两个部分, 正式实验包含 120 个 trials (试次), 其中 110 个谜面与谜底正确匹配, 10 个谜面与谜底错误匹配, 以免被试在实验中产生反应定势(沈汪兵等, 2011)。实验共 3 个 blocks, 每个 block 包括 40 个 trials, block 之间被试休息, 休息时间被试通过按键自行控制。最后只分析了正式实验的 110 个正确匹配试次的实验结果。为了让被试熟悉实验流程, 研究设置了一个 10 trials (8 个谜面与谜底正确匹配的试次和 2 个谜面与谜底错误匹配的试次)的练习阶段, 练习阶段的程序与正式实验一致。

如图 2 所示, 每个试次(trial)开始时, 屏幕中央呈现一个 1000 ms 的“十”字注视点, 紧接着屏幕上出现三字谜的谜面(如“二月平”), 谜面呈现时间为 8000 ms, 要求被试在这 8000 ms 内认真思考字谜的答案, 不需进行反应。之后谜面消失, 出现一个随机时长的空屏(800~1200 ms), 然后给被试呈现字谜的谜底, 为避免记忆负荷的影响, 谜面持续呈

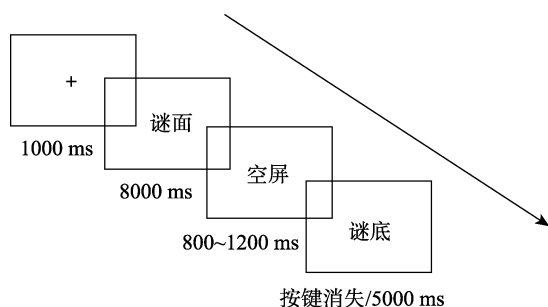


图 2 字谜顿悟问题解决实验流程

现时间为 5000 ms, 被试需在谜底呈现后立即做出反应判断。若完成则直接跳入下一个试次。若未完成在 5000 ms 后谜底也自动消失, 随后进入下一个试次。具体而言, 被试的按键存在 3 种情况: 当被试猜出谜底且所猜谜底与屏幕所给谜底一致时, 被试按键盘的“f”键, 表示“无顿悟”; 当被试没有猜出字谜或猜不出谜底, 但能理解屏幕所给谜底且认为所给谜底合理时, 被试按键盘的“j”键, 表示“有顿悟”; 当被试没猜中或没有猜出谜底, 同时又对屏幕所给正确匹配谜底不能理解时, 则不做任何按键。考虑到在猜谜任务中, 被试有可能做出不诚实的按键反应, 在最终的统计数据时以这 10 对谜面与谜底错误匹配作为剔除指标, 即如果被试对这 10 对材料有按键反应(无论按“f”键还是“j”键), 其数据记为无效数据予以剔除。

### 3.1.3 结果分析

#### (1) 顿悟问题

剔除 4 份超过 3 个标准差以外的极端数据, 对 96 名被试的顿悟问题解决的成绩进行分析。其中, 顿悟问题的平均个数为 40.36 ( $SD = 16.79$ ), 无顿悟问题的个数为 50.5 ( $SD = 15.94$ )。顿悟问题的平均反应时间为 2440.15 ( $SD = 486.53$ ) ms, 无顿悟问题的平均反应时间为 1022.13 ( $SD = 406.52$ ) ms, 对顿悟和无顿悟条件下个体的反应时进行独立样本  $t$  检验, 结果发现顿悟问题条件下的平均反应时显著长于无顿悟问题的反应时,  $t(189) = 21.80, p < 0.001$ , Cohen's  $d = 3.16$ 。

上述结果表明, 在猜中(“无顿悟”)的情况下, 被试可能较快地意识到自己猜出了答案, 并较迅速地做出了按键反应; 在未猜中(“顿悟”)情况下, 被试则由于自己陷入了错误的思路或需要更长时间来理解谜底与谜面的匹配关系, 因此按键反应相对滞后(沈汪兵等, 2011)。对无法及时按键的反应(overtime response)而言, 它一方面反映了被试对它的理解需要花费更长的时间, 另一方面反映了被试可能对自己所猜结果信心不足, 以致自己不能确定究竟是作何反应或无法及时做(沈汪兵等, 2011)。结果说明实验材料能够有效地区分顿悟与非顿悟, 可有效地用于顿悟研究。

#### (2) 执行功能高低对顿悟问题解决的影响

所有被试执行功能中转换亚成分的平均成绩为 43.98 ( $SD = 21.15$ ) s、工作记忆刷新的平均成绩为 27.75 ( $SD = 7.88$ ) s、抑制功能的平均成绩是 182.41 ( $SD = 149.67$ ) ms。按照研究 1 的方法, 将执

行功能 3 个亚成分均大于相应平均值的个体计为高执行功能组, 均低于平均值的为低执行功能组, 得到高执行功能组 17 人, 低执行功能组 19 人。

表 3 不同执行功能条件下个体在顿悟条件与无顿悟条件的反应时( $M \pm SD$ )

项目	顿悟条件	无顿悟条件
高执行功能	2488.52 $\pm$ 328.87	848.19 $\pm$ 233.55
低执行功能	2491.88 $\pm$ 415.56	1025.61 $\pm$ 298.48

如表 3 所示, 对不同执行功能水平个体在顿悟条件与无顿悟条件下的平均反应时进行 2 执行功能(高 vs. 低)  $\times$  2 问题类型(顿悟 vs. 无顿悟)的重复测量方差分析, 结果发现, 顿悟类型主效应,  $F(1, 36) = 208.95, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.85$ , 表明顿悟问题的反应时显著长于无顿悟问题的反应时; 执行功能主效应不显著( $F < 1$ ), 交互作用不显著,  $F(1, 36) = 3.03, p > 0.05$ 。表明不同执行功能水平下个体解决顿悟问题与无顿悟问题的平均反应时均无显著差异。

分别依据执行功能子成分的平均得分的前 33%, 后 33% 对个体刷新能力、抑制能力和转换能力进行高低分组。对于工作记忆刷新能力, 进行 2 工作记忆刷新能力(高工作记忆刷新能力 vs. 低工作记忆刷新能力)  $\times$  2 问题类型(顿悟 vs. 无顿悟)的两因素混合设计方差分析。结果发现工作记忆刷新能力高低水平主效应显著,  $F(1, 63) = 5.20, p = 0.03, \eta_p^2 = 0.08$ , 说明高刷新能力个体的反应时显著快于低刷新能力的个体; 顿悟类型主效应显著, 顿悟条件下反应时(2450.32  $\pm$  50.56)显著长于无顿悟条件(967.46  $\pm$  33.60),  $F(1, 63) = 619.69, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.9$ 。交互作用不显著。此外, 抑制能力、转换能力高低的个体在顿悟问题与非顿悟问题的平均反应时之间均无显著差异。

### 3.2 研究 2b 执行功能对言语顿悟问题解决影响的 ERPs 研究

#### 3.2.1 研究目的

以汉字字谜为材料, 探讨不同执行功能水平的个体在解决言语顿悟问题过程中的认知神经机制。

#### 3.2.2 研究方法

##### (1) 被试

从研究 1 的被试中, 挑选出执行功能高水平组的被试 23, 低水平组 23(符合条件者本为高水平组 28 人, 低水平组 29 人, 但是部分被试由于个人原因并未参加脑电实验)。被试的母语均为汉语, 实验

后给予一定报酬。

##### (2) 材料

同研究 2 的三字谜材料。

##### (3) 程序

同研究 2 的实验流程。

##### (4) ERP 记录

用 32 导 BP (德国 Brain Product) 电极帽对 EEG 进行记录, 将双耳乳突的连线当作参考电极, 左眼上下约 1 cm 处安置电极记录垂直眼电(VEOG), 左眼外侧约 1 cm 处安置电极记录水平眼电(HEOG)。每个电极的头皮电阻阻抗降到 5 k $\Omega$  以下。滤波带通为 0.1~30 Hz, 采样频率为 500 Hz/导。

##### (5) ERP 分析

数据进行离线分析时以左右乳突的平均电极做参考值, 自动校正水平和垂直眼电, 并去除眨眼或者眼动产生的伪迹。根据实验目的与要求, 本实验只分析字谜谜底呈现后所诱发的 ERP。依据被试的按键反应结果, 分别对“顿悟”和“无顿悟”反应 EEG 进行叠加, 叠加次数在 30~70 次之间。剔除任何通道中波幅超过  $\pm 80 \mu V$  的受眼动、过度肌肉活动和眨眼影响的试次, 以字谜谜底呈现前 200 ms 时段的 ERP 为基线, 分析谜底呈现后 1000 ms 内的 ERP 变化。

根据 ERP 的时程分析总平均图和脑电地形图分布, 参考以往同类研究(买晓琴等, 2005; 沈汪兵等, 2011), 以及前、中、后和左、中、右的电极选取规律, 最终选择以下 14 个电极(前部: F3, F4, Fz; 中部: C3, C4, Cz; 后部: P3, P4, Pz, Oz; 两侧: FT7, FT8, TP7, TP8)进行统计分析, 本实验主要研究 N1 (着重分析 Fz, Cz, Pz 这 3 个电极点), N2, P2, P3 这几个成分。对 N1 在 80~180 ms 的时间窗进行波峰探测, 在 180~240 ms 的时间窗对 N2 成分进行波峰探测, 对 P2 和 P3 成分进行波峰探测的时间窗分别设置在 190~260 ms 和 280~500 ms。

对上述研究成分的平均波幅和潜伏期分别进行重复测量方差分析, 其中执行功能水平(高组和低组)为被试间变量, 谜底反应(顿悟和无顿悟)和脑区(前部脑区、中部脑区和后部脑区)为被试内变量, 根据球形检验的结果进行校正。

#### 3.2.3 结果分析

##### (1) 行为结果

剔除两名不诚实的被试, 对 44 组(高水平组 23 人, 低水平组 21 人)被试的数据进行分析, 结果显示, 字谜的无顿悟数量的平均值为 63.07 ( $SD = 6.74$ ), 平均反应时 700.62 ( $SD = 215.20$ ) ms; 顿悟

数量的平均值为 36.58 ( $SD = 3.81$ ), 平均反应时为 2781.07 ( $SD = 358.25$ ) ms。在性别与执行功能上, 无顿悟字谜的平均数量、反应时与顿悟字谜的平均数量、反应时之间均无显著差异。

## (2) ERP 结果

两名被试(高、低水平组各一名)的数据在顿悟反应条件下的有效叠加不到 30 次, 因此被剔除, 最终 42 名被试进入 ERP 数据分析。根据前人研究和总平均图, 从图 3 中可以看到, 顿悟与无顿悟条件下均引发了不同的相关成分。

当向被试呈现一字谜底后, 被试首先接受视觉信息并对其进行相应加工, 脑电上在 80~180 ms 的时间窗内诱发了明显的早期成分 N1, 对于 N1 的平均波幅进行 2 执行功能(高 vs. 低)  $\times$  2 顿悟类型(有 vs. 无)  $\times$  3 电极点(Fz, Cz, Pz)的重复测量方差分析, 结果表明电极主效应显著,  $F(2, 80) = 56.55, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.62$ , 事后比较表明 Fz 点波幅最大, Cz 点次之, Pz 点最小; 其他主效应、交互作用均不显

著。这表明高低执行功能组在顿悟与无顿悟条件下有关的早期物理性加工没有差异。

由总平均图可知, 谜底呈现后的 180~240 ms 内顿悟条件比无顿悟条件诱发了一个更负的负波 N2。对 N2 进行 2 执行功能(高 vs. 低)  $\times$  2 顿悟类型(有 vs. 无)  $\times$  3 脑区(前, 中, 后)的重复测量方差分析, 结果发现脑区主效应显著, 后部脑区引发更负的 N2 成分,  $F(2, 80) = 11.25, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.22$ ; 顿悟类型的主效应显著,  $F(1, 40) = 4.99, p = 0.031, \eta_p^2 = 0.11$ ; 其余主效应、交互作用均不显著。同样的, 对 190~260 ms 诱发的正波 P2 成分, 进行方差分析, 结果发现脑区主效应显著,  $F(2, 80) = 45.47, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.53$ ; 执行功能和顿悟类型的交互作用显著,  $F(1, 40) = 4.15, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.09$ 。简单效应分析发现, 在高执行功能条件下, 无顿悟过程比顿悟过程引起更大的 P2 成分( $p = 0.050$ )。比较两种顿悟类型下 P2 成分的潜伏期, 发现在高执行功能水平组, 顿悟条件下的潜伏期显著早于无顿悟,

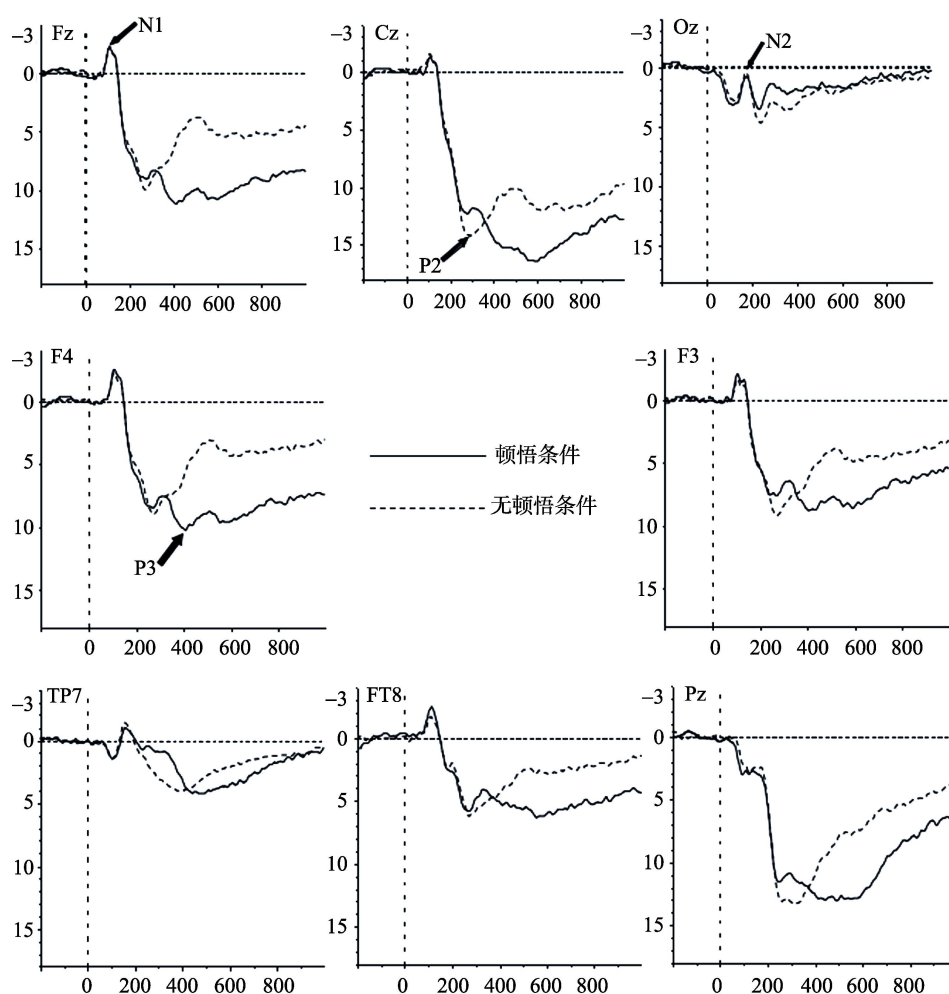


图3 顿悟和无顿悟条件在 Fz、Cz、Oz、F4、F3、TP7、FT8、Pz 等 8 个电极点上别引起的 ERP 时程变化



$F(1, 40) = 8.39, p < 0.01$ 。

在 280~500 ms 时间窗内对执行功能、顿悟类型以及脑区进行三因素重复测量方差分析。结果表明, 顿悟类型的主效应显著,  $F(1, 40) = 6.25, p = 0.017, \eta_p^2 = 0.14$ , 即个体在顿悟条件比无顿悟条件下引起了更正的 P3 成分; 脑区主效应显著,  $F(2, 80) = 21.47, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.35$ , 中部脑区引发的 P3 波幅显著大于前、后脑区; 两者交互作用显著,  $F(2, 80) = 24.89, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.38$ 。进行简单效应分析发现, 在中部和前部脑区, 个体在顿悟条件比无顿悟条件下引起了更正的 P3 成分。其余主效应及交互作用均不显著。两种顿悟类型下的 P3 潜伏期存在显著差异, 顿悟条件显著晚于无顿悟,  $F(1, 40) = 51.72, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.42$ 。

### 3.2.4 讨论

研究 2 是采用三字谜为实验材料的言语顿悟问题, 其中研究 2a 的行为结果发现执行功能中的工作记忆刷新亚成分影响顿悟问题解决, 高工作记忆刷新功能的个体在顿悟条件下的反应时显著快于低工作记忆刷新功能的个体。而研究 2b 脑电数据进一步表明, “有顿悟”、“无顿悟”均诱发了早期刺激加工成分 N1, 且高低执行功能组, 以及有无顿悟两种反应所诱发的 N1 成分均不存在显著差异。N1 成分更多的与刺激的物理特性(颜色、大小等)相关, 说明不同条件下在早期的视觉加工上没有差异。但被试在对三字字谜进行较高级的视知觉加工过程中, 在谜底呈现后的 180~240 ms 内, 顿悟条件较之无顿悟条件诱发了一个更负的早期成分 N2, N2 与无关信息的门控作用或者早期的选择注意功能的聚集有关(Fuerst, Gallinat & Boutros, 2007; Boutros et al., 2009; 邢强等, 2013), 表明随着物理刺激早期视觉加工的结束, 顿悟条件下个体需要花费更多的选择注意, 通过注意筛选的刺激将会被进一步加工(沈汪兵等, 2012)。在 190~260ms 内顿悟条件与无顿悟条件均诱发 P2 成分, 且在高执行功能条件下, 无顿悟条件下比顿悟条件下诱发更大波幅的 P2 成分。P2 也与注意加工以及短时记忆有关(Carretié, Mercado, Tapia, & Hinojosa, 2001; Luck & Hillyard, 1994), 高执行功能的条件下, 无顿悟的个体会有意识的投入更多注意资源优先加工其更为熟悉的问题表征以确认结果的正确性。此外, 沈汪兵等(2012)发现, 个体在顿悟问题解决过程的早期知觉阶段能够直觉性的觉察到僵局的存在, 顿悟条件下 P2 潜伏期早于无顿悟条件, 我们认为极有可能是个

体对顿悟问题僵局的觉察引发的。

本研究中, P3 成分主要引发于额叶-中央脑区, 且在这两个脑区中, 顿悟条件的波幅显著大于无顿悟条件, 说明相比较确认和判断(无顿悟)按键过程, 个体在顿悟条件中看到刺激得到错误的反馈之后, 需要打破自己先前的猜谜规则, 并且根据答案联系之前呈现的字谜来产生新的连接方式和工作记忆表征, 在这个过程中需要投入更多的注意资源和工作记忆(邢强等, 2013)。而顿悟条件的 P3 潜伏期显著长于无顿悟条件, 也说明了由于个体发现答案错误, 在理解答案时需要联系之前所呈现的谜面信息, 所以记忆资源损耗大, 回忆时间也较长。在对被试间变量执行功能水平高低组进行分析时, 发现高低执行功能水平组被试引发的 P3 成分并无显著差异。因此, 我们认为言语顿悟问题虽然在顿悟条件下进行问题表征搜索, 僵局产生阶段引发更大波幅的 P3 成分, 但在僵局打破、实现表征重组并不受到执行功能高低的影响。

## 4 总讨论

本研究通过 2 个研究考察执行功能对言语顿悟问题解决的影响。研究 1 初步探讨执行功能与顿悟问题解决能力的相关关系, 结果发现总体上执行功能与顿悟问题成绩呈显著正相关, 执行功能中工作记忆刷新亚成分可以显著预测顿悟问题成绩。研究 2 则针对言语顿悟问题, 通过行为与 ERPs 技术进一步探讨执行功能对字谜顿悟问题解决的作用。行为结果发现高工作记忆刷新能力的个体反应时显著小于低工作记忆刷新能力的个体, 说明执行功能中工作记忆刷新亚成分影响顿悟问题解决。脑电结果上, “顿悟”条件较之“无顿悟”条件诱发了一个更强的早期成分 P2 和 N2 和中晚期 P3。其中, 我们认为 P2 主要反映人脑对思维僵局的早期觉察, 受到执行功能高低的影响。280~500 ms 内, 中晚期 P300 则主要体现以新旧思路交替为特征的僵局打破过程, 不受执行功能高低的影响, 因此进一步确认对于言语顿悟问题而言, 顿悟问题的表征重组阶段较少受到执行功能的影响。

研究结果发现执行功能与顿悟问题解决具有密切的联系。具体来说, 研究 1 的结果显示个体的转换和刷新功能与顿悟能力存在显著正相关, 且刷新功能在一定程度上能够预测个体的顿悟成绩。执行功能中的转换功能亚成分主要涉及思维定势与动作的转换, 由注意机制控制, 因此其与顿悟问题



解决的相关关系可能更多的体现在影响顿悟过程中限制解除。而刷新功能则是在短时信息存储及加工系统中, 对于多重表征予以稳固维持, 同时在特定刺激出现时快速刷新表征。主要展现了个体的工作记忆与信息更新能力, 更多的涉及认知资源与意识过程(Collette & van der Linden, 2002; 周雅, 2013)。此外, 结果发现刷新功能对顿悟问题解决具有显著的预测作用。该结果与以往的研究是相一致的(Jung-Beeman et al., 2004; Murray & Byrne, 2005; Fleck, 2008; Chein & Weisberg, 2014; 吕凯, 谭顶良, 2015)。研究2采用字谜顿悟为材料, 结果同样发现高工作记忆刷新能力的个体反应时显著小于低工作记忆刷新能力的个体, 说明执行功能中工作记忆刷新功能影响顿悟问题解决, 谜题呈现 280~500 ms 后, 在前部和中部脑区, 顿悟条件下比非顿悟条件下诱发了一个更强的正性中晚期成分 P3。前人研究表明, P3 与记忆更新、编码和提取有关(Donchin & Coles, 1988; Kutas, McCarthy, & Donchin, 1977), 并且更大的 P3 波幅反映了更多的注意资源的投入(Donchin & Coles, 1988)。在进一步的解字谜谜底的时候, 需要更新工作记忆的表征, 这个更新过程表现在: 一方面减弱强而无效的联结, 一方面产生弱而有效的新联结。进一步说明在顿悟问题解决过程确实需要认知过程与资源的参与。

目前研究者普遍认为顿悟问题解决是一个复杂的过程, 可以区分为多个不同阶段(Ash & Wiley, 2006)。但执行功能对顿悟的重组过程有何影响仍然存在争议(Schooler, Ohlsson & Brooks, 1993; Öllinger et al., 2006; 吕凯, 谭顶良, 2015)。在言语顿悟问题解决中同样可以发现顿悟问题僵局产生、新旧思维转换阶段, 诱发更大波幅 P3 成分。P3 成分主要引发于额叶-中央脑区, 且在这两个脑区中, 顿悟条件的波幅显著大于无顿悟条件, 说明相比较确认和判断(无顿悟)按键过程, 个体在顿悟条件中看到刺激得到错误的反馈之后, 需要打破自己先前的猜谜规则, 并且根据答案联系之前呈现的字谜来产生新的连接方式和工作记忆表征, 在这个过程中需要投入更多的注意资源和工作记忆(邢强, 张忠炉, 王梦偌等, 2013)。但在对被试间变量执行功能水平高低组进行分析时, 发现高低执行功能水平组被试引发的 P3 成分并无显著差异。因此, 我们的研究结果更倾向支持顿悟的重组过程是一个突进式的特殊过程, 不涉及执行功能。

由于研究范式的限制, 本研究主要着眼于汉字

字谜这类言语顿悟问题, 探讨了执行功能对于言语顿悟问题(Verbal insight problem)的影响, 并未对空间顿悟问题(Spatial insight problem)进行深入研究。虽然不管是采用空间类顿悟还是采用言语类顿悟问题都强调了思维僵局与表征转换作为顿悟问题的重要特征, 但现有的研究结果发现空间顿悟与言语顿悟的心理与神经机制存在差异(Gilhooly, Fioratou, & Henretty, 2010; Cushen & Wiley, 2012)。因此, 以后的研究应进一步区分顿悟问题类型, 探讨执行功能对空间顿悟问题的影响。

## 5 结论

(1)个体的执行功能中的转换、工作记忆刷新亚成分与顿悟能力呈显著的正相关, 刷新功能在一定程度上能够预测顿悟成绩。

(2)“顿悟”条件与“无顿悟”条件均诱发早期成分 P2 和中晚期成分 P3 成分。其中, P2 主要反映人脑对思维僵局的早期觉察, 受到执行功能高低的影响。中晚期成分 P3 则主要体现以新旧思路交替为特征的僵局打破过程, 不受执行功能高低的影响。

(3)言语顿悟问题解决中的表征重组阶段是一个突进的过程, 并不涉及执行功能。

致谢: 感谢匿名外审专家的宝贵意见; 感谢辽宁师范大学张忠炉博士参与讨论并提出意见; 感谢广州大学夏静静、王蕊、余玉荣等收集数据。

## 参 考 文 献

- Ash, I. K., & Wiley, J. (2006). The nature of restructuring in insight: An individual-differences approach. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(1), 66-73.
- Boutros, N. N., Brockhaus-Dumke, A., Gjini, K., Vedeniapin, A., Elfakhani, M., Burroughs, S., & Keshavan, M. (2009). Sensory-gating deficit of the N100 mid-latency auditory evoked potential in medicated schizophrenia patients. *Schizophrenia Research*, 113(2-3), 339-346.
- Bowden, E. M., & Jung-Beeman, M. (2007). Methods for investigating the neural components of insight. *Methods*, 42(1), 87-99.
- Carretié, L., Mercado, F., Tapia, M., & Hinojosa, J. A. (2001). Emotion, attention, and the 'negativity bias', studied through event-related potentials. *International Journal of Psychophysiology*, 41(1), 75-85.
- Chein, J. M., & Weisberg, R. W. (2014). Working memory and insight in verbal problems: Analysis of compound remote associates. *Memory & Cognition*, 42(1), 67-83.
- Chen, T. Y., & Li, D. M. (2005). The diversity of executive functions in normal adults: A latent variable analysis. *Acta Psychologica Sinica*, 37(2), 210-217.
- [陈天勇, 李德明. (2005). 执行功能可分离性及与年龄关系的潜变量分析. *心理学报*, 37(2), 210-217.]

- Collette, F., & van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(2), 105–125.
- Cushen, P. J., & Wiley, J. (2012). Cues to solution, restructuring patterns, and reports of insight in creative problem solving. *Consciousness and Cognition*, 21(3), 1166–1175.
- Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating. *Behavioral Brain Science*, 11(3), 357–374.
- Fleck, J. I. (2008). Working memory demands in insight versus analytic problem solving. *European Journal of Cognitive Psychology*, 20(1), 139–176.
- Fleck, J. I., & Weisberg, R. W. (2004). The use of verbal protocols as data: An analysis of insight in the candle problem. *Memory & Cognition*, 32(6), 990–1006.
- Fuerst, D. R., Gallinat, J., & Boutros, N. N. (2007). Range of sensory-gating values and test-retest reliability in normal subjects. *Psychophysiology*, 44(4), 620–626.
- Gilhooly, K. J., & Murphy, P. (2005). Differentiating insight from non-insight problems. *Thinking & Reasoning*, 11(3), 279–302.
- Gilhooly, K. J., & Fioratou, E. (2009). Executive functions in insight versus non-insight problem solving: An individual differences approach. *Thinking & Reasoning*, 15(4), 355–376.
- Gilhooly, K. J., Fioratou, E., & Henretty, N. (2010). Verbalization and problem solving: Insight and spatial factors. *British Journal of Psychology*, 101(1), 81–93.
- 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.
- Knoblich, G., Ohlsson, S., & Raney, G. E. (2001). An eye movement study of insight problem solving. *Memory & Cognition*, 29(7), 1000–1009.
- Kortte, K. B., Horner, M. D., & Windham, W. K. (2002). The trail making test, Part B: Cognitive flexibility or ability to maintain set. *Applied Neuropsychology*, 9(2), 106–109.
- Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, 197(4305), 792–795.
- Li, M. J., Bai, X. J., & Yan, G. L. (2007). The eye-movement experiment of mental rotation for the high or low level of executive function of the college students. *Psychological Exploration*, 27(3), 55–60.
- [李美华, 白学军, 闫国利. (2007). 执行功能水平高与低的大学生心理旋转眼动实验. *心理学探新*, 27(3), 55–60.]
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Spatial filtering during visual search: Evidence from human electrophysiology. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 20(5), 1000–1014.
- 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.]
- Luo, J., & Niki, K. (2003). Function of hippocampus in ‘insight’ of problem solving. *Hippocampus*, 13(3), 316–323.
- Luo, J., Niki, K., & Philips, S. (2004). Neural correlates of the ‘Aha! reaction’. *Neuroreport*, 15(13), 2013–2017.
- Lv, K., & Tan, D. L. (2015). The effects of working memory on the different phases during insight problem solving. *Psychological Exploration*, 35(3), 217–221.
- [吕凯, 谭顶良. (2015). 顿悟问题解决不同阶段中工作记忆的作用. *心理学探新*, 35(3), 217–221.]
- Mai, X. Q., Luo, J., Wu, J. H., & Luo, Y. J. (2005). The ERP effects of insight in a riddle guessing task. *Acta Psychologica Sinica*, 37(1), 19–25.
- [买晓琴, 罗劲, 吴建辉, 罗跃嘉. (2005). 猜谜作业中顿悟的 ERP 效应. *心理学报*, 37(1), 19–25.]
- Murray, M. A., & Byrne, R. M. J. (2005). Attention and working memory in insight problem-solving. *Proceedings of Cognitive Science Society*, 27(27), 1571–1575.
- Öllinger, M., Jones, G., & Knoblich, G. (2006). Heuristics and representational change in two-move matchstick arithmetic tasks. *Advances in Cognitive Psychology*, 2(4), 239–253.
- Qiu, J., Li, H., Luo, Y. J., Chen, A. T., Zhang, F. H., Zhang, J. M.,... Zhang, Q. L. (2006). Brain mechanism of cognitive conflict in a guessing Chinese logograph task. *Neuroreport*, 17(6), 679–682.
- Qiu, J., Luo, Y. J., Wu, Z. Z., & Zhang, Q. L. (2006). A further study of the ERP effects of ‘Insight’ in a riddle guessing task. *Acta Psychologica Sinica*, 38(4), 507–514.
- [邱江, 罗跃嘉, 吴真真, 张庆林. (2006). 再探猜谜作业中“顿悟”的 ERP 效应. *心理学报*, 38(4), 507–514.]
- Qiu, J., & Zhang, Q. L. (2008). “Aha!” effects in a guessing Chinese logograph task: Evidence from event-related potential study. *Chinese Science Bulletin*, 53(3), 384–391.
- [邱江, 张庆林. (2007). 字谜解决中的“啊哈”效应: 来自 ERP 研究的证据. *科学通报*, 52(22), 2625–2631.]
- Schooler, J. W., Ohlsson, S., & Brooks, K. (1993). Thoughts beyond words: When language overshadows insight. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(2), 166–183.
- 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. B., Liu, C., Zhang, X. J., & Chen, Y. L. (2011). The time course and hemispheric effect of “Insight” in three-character Chinese riddles task: An ERP study. *Acta Psychologica Sinica*, 43(3), 229–240.
- [沈汪兵, 刘昌, 张小将, 陈亚林. (2011). 三字字谜顿悟的时间进程和半球效应: 一项 ERP 研究. *心理学报*, 43(3), 229–240.]
- Sternberg, R. J. (1999). Intelligence as developing expertise. *Contemporary Educational Psychology*, 24(4), 359–375.
- Tan, J. F., Wu, S. S., Xu, L., Wang, L. J., & Chen, A. T. (2013). Prefrontal cortex with executive functions involved in dual-task performance. *Advances in Psychological Science*, 21(12), 2127–2135.
- [谭金凤, 伍姗姗, 徐雷, 王丽君, 陈安涛. (2013). 前额叶皮层与双任务加工执行功能. *心理科学进展*, 21(12), 2127–2135.]
- van Veen, V., & Carter, C. S. (2005). Separating semantic conflict and response conflict in the Stroop task: A functional MRI study. *NeuroImage*, 27(3), 497–504.
- Xing, Q., Zhang, Z. L., Sun, H. L., Zhang, J. L., & Wang, J. (2013). The mechanism of constraint relaxation and chunk decomposition and the related prototype elicitation effect in logograph tasks. *Acta Psychologica Sinica*, 45(10), 1061–1071.
- [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.]
- Xing, Q., Zhang, Z. L., Wang, M. R., Zhang, J. L., Wang, J., Yao, Y. F., & Zhan, D. L. (2013). The electrophysiological mechanisms of constraint relaxation studied with a Chinese logograph task. *Acta Psychologica Sinica*, 45(5), 508–516.
- [邢强, 张忠炉, 王梦偌, 张金莲, 王菁, 姚艳芬, 占丹玲. (2013). 汉字字谜任务中限制解除的电生理机制. *心理*

学报, 45(5), 508–516.]

Zhou, Y. (2013). The effects of emotional states on executive functioning. *Advances in Psychological Science*, 21(7),

1186–1199.

[周雅. (2013). 情绪唤起对执行功能的作用. *心理科学进展*, 21(7), 1186–1199.]

## The effect of executive function on verbal insight problem solving: Behavioral and ERPs studies

XING Qiang<sup>1</sup>; SUN Hailong<sup>2</sup>; ZHAN Danling<sup>3</sup>; HU Jing<sup>1</sup>; LIU Kai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Psychology, Guangzhou University;

Juveniles Mental Health and Educational Neuroscience Laboratory, Guangzhou 510006, China)

(<sup>2</sup> Management School, Jinan University, Guangzhou, 510632, China)

(<sup>3</sup> Guangdong Songshan Polytechnic College, 512126, China)

### Abstract

The insight problem solving has been proposed to involve different phases: First, there is an initial structuring phase in which the problem's starting conditions, goal and possible actions, as given in the problem statement, are represented internally. A second general stage involves searches within the problem space, which may take the form of means-ends analysis or forward search. However, the initial structuring phase is misleading and solution cannot be reached without re-structuring of the problem representation. Thus, with insight tasks, re-structuring of the problem representation is necessary for the problem to be solved. However, the debate of the psychological mechanism focused on the representation restructuring process, and there are two interpretations: consciousness processing and unconscious processing.

We conducted three studies to explore the psychological mechanism of the insight problem solving. Study 1 showed there is a significant positive correlation between the executive functions and the insight problem solving, and updating of working memory representations can predict individual insight scores. Study 2 investigated verbal insight problems, using behaviors and ERPs to explore the effect of executive functions on insight problems. The results showed that the insight, compared with no-insight impasses, elicited a more positive potential P2 and in the time windows 620~800 ms (P3). P2 may reflect that people perceive intuitively mental impasses at the perceptual stage, whereas the P3 is associated with the process of constraint relaxation characterized by the alternation between the old and new ways of thinking. These results suggest that executive function influences searching within the problem space, but not the re-structuring of the problem representation.

**Key words** insight; representation restructuring; executive functions; unconsciousness; ERPs