

创造性思维四阶段的神经基础^{*}

詹慧佳¹ 刘 昌¹ 沈汪兵^{1,2}

(¹ 南京师范大学心理学系暨认知神经科学实验室, 南京 210097)

(² 河海大学公共管理学院应用心理学研究所, 南京 210098)

摘 要 华莱士(Wallas)四阶段论是创造性思维过程研究的重要模型, 该模型认为创造性思维包括准备期、酝酿期、明朗期、验证期。相关神经机制研究表明, 准备期主要包括题目呈现前大脑状态和静息状态的研究, 内侧额叶/ACC 及颞叶构成准备期网络; 酝酿期主要包括酝酿期提示、延迟顿悟以及心智游移的相关研究, 这一阶段涉及左右脑的共同参与, 海马、腹内侧前额叶等脑区在酝酿过程中起重要作用; 现有顿悟研究反映明朗期和验证期神经活动, 前额叶、扣带回、颞上回、海马、楔叶、楔前叶、舌回、小脑等在脑区构成其神经基础, 其中, 扣带回、前额叶在不同角度进行的研究中均有参与, 颞上回是负责远距离联想的关键脑区, 海马参与定势打破与新颖联系形成, 外侧额叶是定势转移的关键脑区, 楔前叶、左侧额下/额中回、舌回在原型激活中起关键作用, 左外侧前额叶参与对答案细节性的验证加工。未来研究可从研究对象、研究内容、研究手段三方面加以改进, 以对创造性思维过程作更系统的探讨。

关键词 创造性思维; 四阶段; 神经基础; 酝酿; 顿悟

分类号 B842; B845

1 引言

创造力(creativity)又称创造性, 众多研究者对创造力的定义中包含两个最典型特征——“新颖性”(originality)和“实用性”(usefulness), 即个体产生新颖奇特且有价值的观点或产品的能力(Sternberg & Lubart, 1999)。1950 年吉尔福特在美国心理协会就职演讲的报告中指出, 创造力的研究极其重要, 但一直被研究者所忽视, 并呼吁研究者对创造力加以重视, 从此这一领域开始受到日益广泛的关注。创造性思维(creative thinking)是创造性的具体表现, 是个体高级认知活动。吉尔福特所倡导的创造力研究更倾向将创造性归于一种能力, 而根据认知心理学的观点, 将人脑比喻成计算机, 创造性思维则可看作产生“输出”(创造性思维产品)的运行过程, 对这一过程的研究也成为创造性研究的一个基本问题。进一步的,

创造性活动作为高级认知过程, 有模式可循吗? 也即, 其是否具有一定的普遍规律性? 不同研究者创造性过程模型的提出正是对这一问题的探究。

创造性思维认知过程的理论研究始于 20 世纪初。其中, 最具代表性的模型是华莱士(Wallas, 1926)提出的创造性思维的四阶段论(four steps for creative production)。该模型认为创造性思维包括: 准备期(preparation)、酝酿期(incubation)、明朗期(illumination)、验证期(verification)四个阶段。华莱士提出酝酿期的概念, 首次将无意识引入创造性思维过程中, 认为酝酿期个体不再有意意识的思考问题而是潜意识过程(Ritter, Van Baaren, & Dijksterhuis, 2012)。这一潜意识思维相对于显意识思维而言, 更擅长信息整合和联结, 具有发散性和联系性, 从而有利于产生更多原创性的新颖想法(Dijksterhuis & Nordgren, 2006)。四阶段理论强调显意识和潜意识的综合作用, 得到广泛认可且具有较强的影响力。在华莱士之后有众多研究者对创造性过程阶段进行重新定义, 但大多是基于四阶段模型这一经典理论框架的进一步发展

收稿日期: 2014-04-13

^{*} 江苏省第四期“333 高层次人才培养工程”科研项目和中央高校基本科研业务费专项资金(2014B15314)资助。

通讯作者: 刘昌, E-mail: cglew@163.com

(如 Parnes, 1962; Amabile, 1988 等)。

四阶段模型在得到众多理论支持的同时,也有研究者对其提出质疑,较有力的观点来自吉尔福特(Guilford, 1950),认为从心理学的角度,华莱士四阶段论对创造性过程的分析较为表面化(superficial),没有涉及其过程中包含的具体心理操作,并提出要探讨创造性,首先要研究所包含的子过程(subprocesses)。对创造性所包含的子过程进行探讨较有代表性的理论是 Finke, Ward 和 Smith (1992)提出的生成探索模型(Geneplore Model)。但这一理论分歧的实质是对创造性过程从两个不同层面的探讨,两者并不矛盾。以生成探索模型为例,该模型认为创造性思维包括生成过程(Generative process)和探索过程(Exploration process),强调对心理表征的提炼和重建。其与四阶段论实际存在相通之处,生成探索模型的生成过程建构最初的心理表征相当于准备期,探索阶段的提炼和反复修改过程相当于酝酿期和明朗期,而四阶段模型对这一过程进行了更完整细致的划分。同时,这一理论不足之处也提示,从经典的创造性阶段论模型出发,对各阶段涉及的具体心理过程及机制作系统探讨十分必要。综上所述,对创造性四阶段及其神经活动基础的研究具有重要的理论和现实意义。

近年来,随着认知神经科学的高度发展,高时间分辨率的脑电技术(如 EEG、ERP)及高空间分辨率神经影像技术(如 fMRI)被广泛使用,研究者得以采用更直观精细的手段考察其脑机制,从而在此基础上阐明创造力的本质。在现有创造性神经基础研究中,刘春雷、王敏和张庆林(2009)从顿悟、发散性思维、远距离联想、言语创造性和图画创造性等方面阐明创造性思维脑机制,另有研究者(沈汪兵,刘昌,陈晶晶,2010)从脑结构和脑功能两个层面对创造力的脑神经基础进行探讨。但截至目前,创造性思维四阶段神经基础尚不明确。本文沿华莱士创造力四阶段的理论框架进行文献梳理,对与四阶段相关的研究加以总结,并对未来的创造性思维研究进行展望。

已有研究采用不同实验范式从不同角度系统的探索了创造性思维的脑机制。下文将分别从准备期、酝酿期、明朗期、验证期四个心理阶段来展开。

2 准备期的神经活动基础

创造性活动准备期包括知识的积累和对信息

的搜集,对创造性问题本身进行细致分析,初步尝试进行问题解决,是有意识的努力阶段。在这一阶段,对于顿悟或创造性问题解决而言,个体可能陷入困境,形成思维僵局,即问题解决者感觉(至少是当前可见的)所有可能的问题解决方式和办法均已尝试过但仍不知如何成功解题的心理状态(沈汪兵,刘昌,袁媛,张小将,罗劲,2013)。通过文献梳理,现有准备期神经基础研究主要包括对题目呈现之前大脑活动及静息状态的考察。

“机会青睐于有准备的头脑”(Chance favors only the prepared mind.)。Kounios 等人(2006)基于先前有关顿悟脑机制的研究,提出了一个心理准备期的概念,认为存在某种形式的准备能够促进顿悟问题的解决,并表现为特定的大脑状态。研究者以复合远距离联想任务(Compound Remote Associations, CRA)为实验材料,呈现三个单词,要求被试找到一个单词能够与给定的三个单词均组成新的复合词(如 :pine, crab, sauce; 答案 :apple)。在实验一中采用高时间分辨率脑电图(EEG)记录 19 名被试题目呈现之前 2 s 的脑电,结果发现顿悟条件较无顿悟条件而言,在额中及双侧颞叶皮层等区域存在显著差异。这一结果表明是否有顿悟与题目呈现之前大脑状态有关,但 EEG 空间分辨率有限,因此在实验二中研究者另选 25 名被试,采用高空间分辨率功能性磁共振成像(fMRI)技术对这一状态加以考察,并且将实验一中 2 s 的固定时长改为随机时间间隔。脑成像数据分析结果显示,顿悟相较于无顿悟条件,显著激活内侧额叶(medial frontal areas, 如 ACC)以及双侧颞叶(bilateral temporal areas)。前者与认知控制有关,后者与语义准备有关。以往研究中的准备期包括问题相关背景知识积累,从实证研究的角度较难加以严格界定, Kounios 等人(2006)基于前人研究提出的心理准备期更具有可操控性,易于研究者进行实验设计。

随即,我国学者张庆林及其团队在“原型启发”顿悟理论下对题目呈现前准备期进行了研究,并且为上述 Kounios 等人的结论提供了有利支持。他们采用学习——测试范式将解题分为两个阶段,原型学习阶段生成对原型的表征,测试阶段需要激活适当的原型信息从而顿悟。Qiu, Li, Jou, Wu 和 Zhang (2008)采用事件相关电位(ERP)考察“一对一”学习——测试范式下字谜解决准备期脑电

活动。结果表明,有顿悟相比于无顿悟条件,在字谜呈现前1000 ms至800 ms内诱发了更正向的脑电波偏移,溯源分析显示该差异正成分定位于前扣带回ACC/内侧额叶。进一步的“多对多”学习——测试范式下的准备期的脑成像研究(Tian et al., 2011)结果则显示,这一状态下左侧额中回、内侧额叶/ACC、左侧额中/上回、右侧小脑等区域激活。其中,内侧额叶/ACC负责认知控制,提前抑制无关思维活动,而左侧额中/上回反映语义激活准备,同时额叶及右侧小脑的激活还可能与原型启发信息维持及工作记忆提取有关。综合以上三项研究,不同范式下准备期研究观测到内侧额叶、ACC、额叶较一致的激活,其中内侧额叶/ACC主要负责认知控制,提前抑制无关思维,而额叶负责语义激活准备。

在2006年研究的基础上,Kounios等人(2008)对解题前准备期作了进一步的探讨,认为解题前大脑状态对创造性问题解决的影响很可能与更基本的过程——静息状态有关,进而对这一状态与创造性问题解决的关系进行了考察。他们采用EEG记录26名被试休息时的脑电,随后让其完成字谜问题解决任务,并根据该任务中被试解题策略选择倾向将被试分为高顿悟(倾向使用顿悟策略,13名)、低顿悟(倾向使用分析策略,13名)两组,对脑电数据频谱分析结果显示,高顿悟组相对于低顿悟组而言,枕区、右侧前额、顶、颞皮层在不同波段均表现出显著差异,结果支持顿悟相关的弥散注意理论(attentional diffusion theory)和右半球不对称(right lateralized hemispheric asymmetry)的假设,从而揭示了静息状态与后续问题解决策略之间的联系。但静息状态与创造性问题解决的关系仍存在有待阐明的问题:1)有研究者(Sheth, Sandkühler, & Bhattacharya, 2009)在需要转换势的难题解决的研究中,对问题呈现之前静息状态进行分析,结果并不支持Kounios等人的结论,因此可能存在题目特异性;2)个体差异的研究(Smit, Boomsma, Schnack, Hulshoff Pol, & de Geus, 2012)表明静息状态受遗传因素的影响,是相对稳定。而在创造性问题解决研究中则发现情绪对顿悟的影响(Topolinski & Deutsch, 2012; Subramaniam, Kounios, Parrish, & Jung-Beeman, 2009),并且Subramaniam等人(2009)的研究显示情绪的促进作用与准备期ACC及与邻近的内侧额叶激活有

关。另有研究(Wegbreit, Suzuki, Grabowecky, Kounios, & Beeman, 2012)发现不同注意条件启动对解题策略倾向性存在显著影响。综合表明,这一状态的稳定性有待未来研究作深入的考察。

题目呈现后准备期主要体现在个体的主动求解。这一问题空间的初步探索阶段需要左右半球的共同参与。由于创造性问题解决需要打破常规思维或构建远距离联想,部分脑区激活较常规问题解决存在显著差异,并且不同类型创造性活动中激活的脑区也有所不同。如组块破解任务(Luo, Niki, & Knoblich, 2006)中紧密结构(创造性问题)相对于松散结构(常规问题)在主动求解阶段激活了左侧额上回、内侧额叶等脑区,而常见物体新颖用途生成的研究(Fink et al., 2010)中则观察到左侧缘上回、角回等脑区差异。此外,沈汪兵等人(2013)对思维僵局的脑电研究显示在准备期存在思维僵局的早期觉察,但目前尚没有脑成像研究的结论。

综上所述,创造性思维准备期起关键作用的脑区包括内侧额叶、ACC、额叶,其中,内侧额叶/ACC负责认知控制,提前抑制无关思维活动,额叶负责语义激活准备,并且这一准备期还与静息状态存在密切联系。目前解题前大脑状态的研究主要集中于言语创造任务,未来研究可加强对不同类型创造性问题解决准备期的考察,同时,对静息状态与创造性问题解决的关系的研究也有待作进一步的深入。

3 酝酿期的神经活动基础

根据华莱士的观点,当个体遭遇解题困境,暂时离开当前问题情境有助于问题解决,这一离开问题的时间阶段就是酝酿(Wallas, 1926)。在酝酿期,问题暂被搁置,个体将逐一转向其他无关的活动,而在潜意识水平上对问题加工继续进行。已有大量研究从行为实验的层面证实了酝酿效应并且这一效应大小受诸多因素调节。Sio和Ormerod (2009)对酝酿期相关行为研究进行元分析,结果显示,其影响因素包括间隔任务类型、酝酿期长短、准备期长短、嵌入酝酿期任务认知负荷高低、提示信息等,另有研究(Nordgren, Bos, & Dijksterhuis, 2011; Gilhooly, Georgiou, Garrison, Reston, & Sirota, 2012)还表明即时酝酿和延迟酝酿条件下酝酿效应也存在显著差异。

对酝酿期认知机制众多研究者也提出了不同的理论。Segal (2004)将先前研究者酝酿理论归为两大类:自发过程假说(Autonomous-Processes Hypotheses)和外部线索假说(External-Cues Hypotheses),自发过程假说认为酝酿是自然发生的无意识加工过程,而外部线索假说则强调间隔期外部线索的作用。同时,在此基础上提出注意减退理论认为注意从当前问题转移从而为正确表征的激活提供机会,当再次回到问题时表征重组从而产生顿悟。Hélie 和 Sun (2010)的内隐外显交互理论(The Explicit-Implicit interaction theory, EII)显示,创造性准备期主要为外显加工过程,而酝酿期主要为内隐加工,并有可能在外显知识作用下产生顿悟。不同研究者行为实验结果也为不同的认知机制理论提供支持(如 Sio & Ormerod, 2014; Gilhooly, Georgiou, & Devery, 2013)。在酝酿期认知神经研究方面,针对这一阶段进行的神经机制研究相对较少,主要包括创造性问题解决中酝酿期呈现提示和延迟顿悟的研究。前者反映的是在外部提示作用下实现的酝酿过程,后者是自发酝酿过程。

Bhattacharya 小组(Sandkühler & Bhattacharya, 2008; Sheth et al., 2009)先后对 CRA 和需要转换思路的难题呈现提示解题过程的脑电加以考察。实验首先呈现题目要求被试主动求解并以按键反应报告解题失败;随后,呈现解题关键提示,让被试尝试重新解决;最后,要求在解题成功时按键。两项研究均表明右侧顶枕区脑电活动对个体是否能在提示帮助下成功解决问题具有预测性。与此同时,唐晓晨、庞娇艳和罗劲(2009)则采用高时间分辨率的事件相关电位 ERP 考察创造性问题解决中解题失败与提示信息加工时的左右脑活动差异。他们采用组块破解任务作为实验材料,以被试按键报告解题失败时刻作为思维僵局形成和酝酿期开始的标志。对大脑在求解失败以及提示呈现两个阶段脑电活动的半球差异进行分析,结果表明,问题求解失败在右半球诱发了更大的 P150 成分,酝酿期提示呈现时,未解决问题相较于成功解决而言,右脑的 P2 波幅有增强趋势而左脑不受影响。研究认为,问题求解失败引起右半球对相关问题信息的保持增强,并最终导致右半球对相关提示信息更加敏感。上述研究综合表明,以思维僵局为标志的酝酿期存在右半球对问题相关信息的保持增强,并且这一大脑状态可能使得个

体更善于接受线索所提供的新信息,从而与已有的认知表征结合形成解题方案。

尽管创造性问题解决早期解题失败后酝酿期存在右半球优势,但对个体形成有意识反应之前潜意识加工相关脑电分析则显示,表征转换过程存在广泛脑区的共同参与。Sheth 等(2009)采用 EEG 考察需要转换常规思路的难题解决的脑神经活动,对正确解决不同条件下解答之前 β 、 γ 波进行分析。结果显示,题目呈现阶段正确解答相对于不正确解答而言,按键前($\square 8$ s 到 $\square 1$ s)右侧额中区 γ 增强,无需提示相比于提示作用下的成功顿悟,在被试反应之前($\square 6$ s 到 0 s)广泛脑区表现为 β 波显著降低,主要为颞区及右侧顶中区。研究认为其可能反映形成有意识反应之前的潜意识加工。朱新秤、李瑞菊和周冶金(2009)对字谜问题解决线索作用的行为研究显示,阈上及阈下有效规则线索均对顿悟具有促进作用。最近, Gao 和 Zhang (2014)对顿悟问题线索呈现作了脑电研究,实验设置为阈上线索、阈下线索(掩蔽刺激)及无线索提示三个条件,结果表明,阈下线索呈现相对于无线索条件而言,诱发了 N280-340、P350-450、P500-760 成分,分别定位于右顶下小叶、右侧海马旁回、右侧颞上回,而较晚阶段的脑电活动较无提示阶段无显著差异,研究者认为其反映对启发信息的无意识加工。从上述研究可知,参与表征转换并触发随后顿悟的酝酿过程可能涉及额区、顶区、颞区在内的广泛脑区的激活,并且左右脑均有参与。

在原型顿悟的研究中,朱海雪等人(2012)采用高空间分辨率脑成像技术对 34 名被试原型启发顿悟进行考察,根据原型位置区分“问题在先”和“原型在先”两个条件。结果显示,“问题先导”原型启发条件下左侧额中回、左侧颞中回的参与,与此对应的认知过程是相关问题的自动激活与启发式思维,而“原型先导”条件下对应激活脑区则为左侧扣带回和左侧中央前回。其中,“问题在先”条件原型信息实际类似于提示(提示信息为原型)呈现,其可能反映酝酿期脑活动。另有研究者(张忠炉,邢强,唐志文,徐争鸣,蔡新华,2012)也采用“问题在先”模式,并进一步的改进以解决字谜——原型启发——继续解谜——呈现答案的实验流程模拟 Wallas 的顿悟四阶段,同时增加无效提示条件作为基线,考察酝酿期脑电活动。结果表

明,有效提示对靶字谜的解决有更大的促进作用,脑电数据分析显示,有效提示在左侧前额叶分别在300s~400 ms, 400~600 ms, 600~800 ms诱发了更大的P300-400、P400-600、P600-800成分。研究认为左侧前额叶可能参与酝酿期连接和整合字谜与提示信息关系的加工。因此,结合两项研究认为左侧前额叶可能参与原型顿悟酝酿期的加工,反映对题目及原型信息的整合加工并实现定势转移的过程。对“原型在先”条件下原型顿悟的研究中,原型事件的自动激活可能贴近于无意识思维,朱海雪等人(2012)虽然结合前人研究推测左侧扣带回在酝酿期的作用,但该脑区在创造性酝酿中的具体效应与机制仍有待未来研究验证。

Darsaud 等人(2011)采用数字递减任务(Number Reduction Task, NRT)为实验材料运用高空间分辨率的脑成像技术对36名被试延迟顿悟脑神经机制加以考察。该任务向被试呈现由三个数字组合而成的数字序列,这些数字序列包含相同规则(same rule)和相异规则(different rule),要求根据这两项规则和所给数字序列生成相应数字,所生成数字最终也组成一个新的序列,并且这个序列中前3项与后3项具有对称性,将被试发现这一规则后解题反应时骤降作为顿悟发生的标志。实验分为初始训练(晚上8:00~10:00)和再次测试(第二天8:00~10:00)两个部分。研究者将再次测试的第一个block和初始训练的最后一个block脑成像数据进行比较,认为这一差异反映初始训练之后的离线(off-line)加工过程。结果显示,初试训练中尝试解决但未成功解决者,再次测试阶段顿悟相较于无顿悟条件腹内内侧前额叶激活显著增强,说明这一脑区参与内隐规则学习的离线加工。

有关数字递减任务的行为研究(Wagner, Gais, Haider, Verleger, & Born, 2004)表明,睡眠能促进延迟顿悟。借助远距离联想任务的创造性研究(Cai, Mednick, Harrison, Kanady, & Mednick, 2009)也获得了类似结论。Darsaud 等人(2011)的延迟顿悟脑成像研究中,对初始训练规则内隐学习过程中未成功解决和成功解决的被试脑成像数据进行分析,结果表明,前者相较于后者,更多的激活了海马,海马在这一过程中的显著激活,说明其可能参与了规则发现的酝酿过程。在同样需要规则学习的关系推理脑成像研究(Greene, Gross, Elsingher, & Rao, 2006)中结合被试报告意识水平

的行为指标对数据进行分析,结果显示,对规则加工无意识的被试海马区域显著激活,并且在关系学习阶段的海马激活对测试表现具有预测性。而新近睡眠的脑成像研究(Andrade et al., 2011)表明海马功能连接及其强度与总体信息转换功能及隔离信息的加工等过程相关。综上可知,海马在无意识的酝酿过程中起重要作用——催化心理表征重组从而促使顿悟的产生。

除以上创造性问题解决的研究,对特殊意识状态——心智游移(Mind Wandering, MW)的研究也可间接揭示酝酿期脑机制。心智游移是个体在清醒状态下自发产生的一种意识状态,在该状态下个体意识从当前主要任务转移而被内源性心理表征占据(Smallwood & Schooler, 2013)。在以往研究中,不同研究者对心智游移现象冠以不同的名称(如,白日梦、任务无关思维、刺激独立思维、自发思维、离线思维,Gruberger, Ben-Simon, Levkovitz, Zangen, & Hendler, 2011)。心智游移状态下的信息加工是与当前主要任务相分离的,在任务执行中出现的心智游移,可表现为与任务相关思维相平行的离线加工,而这一信息的离线加工过程可能对认知及记忆均具有促进作用,现有的心智游移脑成像及功能连接分析的研究(Christoff, Gordon, Smallwood, Smith, & Schooler, 2009; Christoff, 2012)显示这一状态与默认网络(default network)存在密切联系。已有的行为研究(Baird et al., 2012)也表明心智游移有助于个体创造性任务表现,而酝酿的心理要义在于触发顿悟的产生,从这个角度而言,酝酿可能有着与心智游移相似的神经基础。换言之,酝酿活动可能会显著激活默认网络相关的脑区,包括内侧额叶、后扣带回、楔前叶、颞顶联合区等。

基于上述研究,可以得出以下结论:作为酝酿期一个重要特征的思维僵局会引起右半球信息保持增强,并且这一右侧优势有利于个体接受有效信息从而顿悟;而个体经过表征转换并触发随后顿悟的酝酿过程,包含额叶、颞叶、顶叶在内的广泛脑区共同参与;海马、腹内内侧前额叶等参与酝酿期的加工,在实现信息离线加工及催化表征重组过程中起重要作用;对特殊意识状态心智游移的考察可间接反映酝酿期机制,对与之显示密切相关的默认网络,在未来研究中可作进一步分析。

4 明朗期和验证期的神经活动基础

明朗期(illumination), 是个体经过潜意识加工的答案突然出现在个体意识中的阶段(Kounios & Beeman, 2009), 通常指的是顿悟或“Aha”时刻, 是突然以直觉性方式清晰地获得问题解决方法(Bowden, Jung-Beeman, Fleck, & Kounios, 2005), 并伴随有“Aha”体验。在验证期(verification)个体对明朗期获得的答案进行细节正确性验证。这两个阶段的神经基础均体现在顿悟(insight)的相关研究中, 但从实验技术角度, 两个阶段较难以刺激呈现或按键反应为标记加以严格的实质性的分离, 由此, 综合现有顿悟研究对这两个阶段神经基础进行探讨。总的来说, 传统顿悟问题, 如经典的“九点问题”, 存在两个主要缺陷, 一是解决时间较长, 二是题目本身变化方式及数量较少。截至目前, 已有许多研究者开始探索新的实验范式, 由于顿悟的复杂性, 不同任务模式下的研究有不同侧重点, 主要可分为三类: 远距离联想形成、思维定势打破以及原型激活。

远距离联想形成的研究最具代表性的任务模式来自 Bowden 和 Jung-Beeman (2003) 开创的复合远距离联想任务(compound remote associates, CRA), CRA 克服了传统顿悟问题解决时间长的难点, 其顿悟发生的关键在于形成新颖联系。Jung-Beeman 等人(2004)采用 EEG 及 fMRI 技术结合考察顿悟脑神经活动, fMRI 数据分析显示, 顿悟相对于非顿悟解决方式, 显著激活了右颞上回、左侧后扣带回、左内侧额叶、双侧海马旁回。左扣带回在顿悟非顿悟两种条件下均有激活, 并且在反应阶段才出现, 因此与答案生成后按键反应有关。而 EEG 数据分析表明在顿悟前 0.3 秒处有一个突然发生的高频 γ 波起源于右侧颞上回, 研究者认为, 右侧前颞区与远距离联系形成有关。Zhang, Tian, Wu, Liao 和 Qiu (2011)对顿悟的脑电研究为右侧颞上回的作用提供了进一步的支持。可以看出, 右侧颞上回是构建远距离联想过程中起关键作用的脑区。

在同样以复合远距离联想任务为实验材料的脑电研究(Sandkühler & Bhattacharya, 2008)中发现, 在被试反应之前($\square 1.5 \sim 0.25$ s)成功实现表征重组条件表现为右侧前额区 α 波(8~12 Hz)下降, 因而, 前额区可能参与有意识的问题表征重组过

程。Anderson, Anderson, Ferris, Fincham 和 Jung (2009)为探讨前额叶及 ACC 在顿悟问题解决中的作用, 采用功能磁共振成像技术考察了复合远距离联想任务及词干补笔任务顿悟问题解决的脑机制, 对这两种词汇联想任务中前额叶及 ACC 激活程度分析得到相似的结果, 问题未成功解决条件下, 前额叶始终有较强激活。而在问题成功解决条件下, CRA 任务左外侧前额叶下部激活在顿悟前和前扣带回激活无显著差异, 顿悟后其激活显著弱于前扣带回, 词干补笔任务中左外侧前额叶下部激活显著强于前扣带回而顿悟后激活程度相当。研究者认为前扣带回主要负责问题解决的子目标设定与过程监控, 而前额叶主要负责主动求解和答案搜寻及提取。综合以上远距离联想形成的研究表明, 这一过程中前额叶、ACC、右颞上回、左内侧额叶等脑区均有参与, 其中右侧颞上回是远距离联想形成的关键脑区。

根据罗劲(2004)的观点, 顿悟是瞬间实现的、问题解决视角的“新旧交替”过程, 它包含两个方面, 一是新的有效的问题解决思路如何实现, 二是旧的无效的思路如何被抛弃。复合远距离联想任务自发顿悟并不包含明显的定势打破, 研究者对需要转换常规定势的创造性问题解决研究反映的则是这一过程的神经机制。相关脑电研究(Zhang et al., 2011; Zhao et al., 2011)也观察到打破心理定势和新颖联系形成相关的不同成分。

Luo 和 Niki (2003)在 Hippocampus 杂志上发表了第一项有关人类顿悟过程的脑成像的研究(罗劲, 张秀玲, 2006)。他们采用高空间精度磁共振成像技术对 7 名大学生被试脑筋急转弯问题的顿悟过程加以考察。首先让被试对题目进行判断, 选出其中“能理解但不知道答案”的题目作为正式实验材料。正式实验分为两个阶段, 第一阶段呈现题目, 第二阶段呈现正确答案, 并让被试对是否理解答案进行判断。仅对呈现答案阶段能理解情况下的脑成像数据进行分析, 结果显示, 相对于基线条件, 顿悟条件下, 激活了包括额叶、颞叶、顶叶在内的广泛脑区, 如额叶、ACC、颞上回、海马等。研究者重点对海马的作用进行探讨, 认为海马在功能上与表征重组, 打破思维定势形成新颖联系过程有关。为进一步明确 ACC 在顿悟问题解决中的作用, Luo, Niki 和 Phillips (2004a)在实验中设置两种类型字谜作为不同条件, 以字

谜解决仅涉及相同规则条件作为对照组, 而字谜涉及不同规则的作为实验组。脑成像数据分析表明, 实验组相对于对照组, 显著激活了 ACC。同时综合对这一过程的脑电研究(Mai, Luo, Wu, & Luo, 2004)结果认为, 扣带前回在一般性的自上而下的信息加工不起作用时会以“早期预警系统”身份参与顿悟。综上表明, 诱发式顿悟下包含额叶、ACC、海马等区域的参与, 其中, 海马是参与定势打破新颖联系形成的关键脑区。

Goel 和 Vartanian (2005)较早采用 fMRI 技术对需要定势转移的火柴棒问题顿悟过程进行了考察。实验选取 13 名正常被试, 将基线任务设置为被试对问题解决方案数目准确性的判断。结果表明, 与基线任务相比, 火柴棒问题的解决激活了右腹外侧前额叶(right ventral lateral PFC)和左背外侧前额叶(left dorsal lateral PFC)。进一步的分析显示, 较之于未成功解决条件, 成功解决条件显著激活了右腹外侧前额叶、左侧额中回(left middle frontal gyrus)和左侧额极(left frontal pole), 而火柴棒问题顿悟发生的关键在于被试是否发生定势转移, 研究者认为右腹外侧前额叶与定势转移或表征转换有关。另有针对“啊哈谜语”顿悟问题解决过程的脑成像研究(Luo, Niki, & Phillips, 2004b)中, 研究者设置包含思维定势打破的顿悟项目和不包含思维定势打破的一般项目两种条件, 数据分析显示, 顿悟项目相较于一般项目, 有明显的前扣带回与左腹外侧前额叶的激活, 说明左腹外侧前额叶参与思维定势打破过程。而在需要发现规则实现定势转移的延迟顿悟研究(Darsaud et al., 2011)中, 顿悟后较顿悟前腹外侧前额叶的激活也为上述结果提供了支持。由此可以看出, 外侧额叶在定势转移过程中起关键作用。

此外, Luo 等人(2006)采用脑成像技术考察了汉字组块破解问题解决的脑机制。对两种条件下脑成像数据进行分析比较: 1)在题目呈现阶段已顺利解决的松散结构问题(视为常规问题); 2)在题目呈现阶段没有解决而在提示作用下顺利解决的紧密结构问题(视为顿悟问题)。锁时事件为提示呈现阶段的脑成像, 结果表明, 紧密结构相比于松散结构而言, 左枕中回、右枕中回、左额上/中/下回、右额中/下回等脑区表现为独特正激活, 右额上/中回、右楔前叶、左额上回、左楔前叶、左楔叶等脑区独特负激活。而 Wu, Knoblich, Wei 和

Luo (2009)针对这一过程的脑电研究显示, 紧密结构相较于松散结构反应前 500 ms 存在顶枕区 α 波增强, 结合脑成像研究结果表明视觉信息抑制在组块破解中的必要性。更进一步, 研究者(Wu et al., 2013)结合 ERP 及 fMRI 技术对包括组块紧密性和组块熟悉度两因素的组块破解做进一步的考察。结果表明, 克服这两个关键障碍机制有所差异。组块紧密性的加工需要视觉空间信息处理, 包括额叶、顶叶在内的广泛区域的参与, 而知觉熟悉性加工主要与前额叶(尤其外侧前额叶)有关, 脑成像数据分析显示两条件交互作用分析定位于 ACC。综上可知, 在组块破解研究中起作用的脑区包括前额叶、ACC、颞上回、楔前叶、楔叶等, 并且视觉信息抑制也是表征重构的必要条件。创造性问题常常包含多个需要克服的关键因素且各因素间还可能存在交互作用, 不同障碍的解除及其相应的脑机制也可能有所不同。

顿悟的“原型启发”理论认为, 在解决顿悟问题的思考过程中, 如果能够在脑中激活恰当的原型及其所包含的“启发信息”, 那么顿悟就能够发生(邱江, 张庆林, 2011)。原型启发顿悟范式分为学习、测试两个阶段, 而顿悟发生的关键在于原型关键信息的激活。Qiu, Li 和 Yang (2008)采用“一对一”学习测试范式, 记录测试阶段脑电活动, 结果显示, 顿悟(成功解决)相对于无顿悟(未成功解决)条件, 诱发了 P200-600、N1500-2000 及 N2000-2500。P200-600 在中后部差异最明显, 偶极子溯源分析结果显示, 这一正成分主要源于左侧颞上回以及顶枕联合区, 两个负成分分别起源于前扣带回(ACC)附近、后扣带回(PCC), 研究者认为在顿悟产生的早期, 顶枕颞联合区的活动可能与原型激活后形成丰富的语义联系有关, ACC 可能主要与思维定势的成功打破和新颖联系的形成有关, PCC 激活与随后产生的 Aha 情绪体验有关。进一步采用“多对多”的学习-测试范式原型顿悟脑成像研究(Qiu et al., 2010)中, 研究者以成功解决 No-aha 为基线条件, 分析原型激活促发顿悟的大脑激活情况, 结果表明, 相对于基线任务而言, Aha 条件显著激活了楔前叶(precunes)、左侧额下/中回(left inferior/middle frontal gyrus)、枕下回(inferior occipital gyrus)和小脑(cerebellum)等脑区。研究者认为, 楔前叶与原型激活和关键信息提取有关, 左侧额下/中回与形成新异联系和打破

心理定势有关,枕下回和小脑与注意资源重新分配和知觉重组有关。

进一步的,罗俊龙等人(2012)指出现有字谜、远距离联想任务材料仍停留于非科学问题,生态效度不高,并在后续研究(Luo et al., 2013)中以创造发明问题为材料,在学习测试范式下对其顿悟的原型启发脑机制加以考察。他们将新颖科学发明问题解决作为实验条件,以常识性例子的发明问题作为基线。实验一中对30名被试顿悟问题解决脑成像数据分析显示,实验条件相较于基线条件显著激活了舌回(lingual gyrus, LG)。而在实验二中,研究者采用实验一相似的实验流程但让被试在正式实验前一天完成原型学习,对8名被试脑成像数据分析显示舌回和楔前叶的显著激活,研究认为舌回与形成新颖联系有关。楔前叶参与原型信息的自动激活。也有创造发明脑成像研究(Zhang, Liu, & Zhang, 2014)报告了左侧额下回和舌回的激活,并认为左侧额下回与新颖联系形成有关,舌回与视觉意象加工有关。相较于字谜材料顿悟研究,创造发明问题的研究激活了舌回,可能与创造发明问题语义加工中将问题情境转化为视觉表征有关。这些研究提示,楔前叶、左侧额下/中回、舌回可能是原型激活的关键脑区。其中,楔前叶可能主要负责原型激活以及相关信息的提取,左侧额下/中回、舌回与参与新颖联系形成的过程。

从理论上讲,顿悟实际可能包含从时间上相对较早的明朗期和较晚的验证期两部分,但从现有研究不足以从实验设计的角度对两者加以严格分离,自发顿悟脑机制研究主要反映的是明朗期,罗劲等人提出的以答案呈现催化的“诱发式”顿悟研究范式能较直观反映验证期,其呈现答案催化顿悟实际包含两个子过程,一是个体需要形成题目与答案之间的新颖联系,二是对答案进行细节性的验证。他们(Luo et al., 2004a)在实验中设置两种类型字谜作为不同条件以字谜解决仅涉及相同规则的作为对照组,而字谜涉及不同规则的作为实验组。其中,两组条件在第二个子过程上具有一致性,研究者对两种条件相对于静息状态的脑区激活分别进行分析,结果显示,两种条件下左外侧前额叶下部的激活程度相当。另有研究者(Shen, Luo, Liu, & Yuan, 2013)综合不同顿悟研究中前额叶的激活对其作用进行细致分析,认为当

激活区域接近左外侧前额叶上部时,它协助右脑前额叶完成定势转移的可能性更大。相反,当激活区域临近左脑前额叶的外侧下部时,其参与工作记忆与记忆提取的可能性更大。因此,综合认为Luo等人研究中的左外侧前额叶下部活动与工作记忆有关,反映对答案细节上的验证加工。

综合以上顿悟研究可以看出,前额叶、扣带回、颞上回、海马、楔叶、楔前叶、舌回、小脑为主的脑区构成明朗期和验证期神经基础,根据研究范式的不同,明朗期所涉及的关键认知过程也有所差异,其中,扣带回、前额叶在不同角度进行的研究中均有参与,颞上回负责远距离联想的形成,海马参与定势打破形成新颖联系,外侧额叶是定势转移的关键脑区,楔前叶、左侧额下/额中回、舌回在原型激活中起关键作用。左外侧前额叶参与对答案细节性的验证加工。

5 总结与展望

综上所述,内侧额叶/ACC、颞叶构成解题前准备期网络,其中,内侧额叶/ACC负责认知控制,提前抑制无关思维活动,颞叶负责解题信息的语义激活准备。此外,这一准备期与静息状态存在密切联系,有待未来研究作深入探讨;酝酿期的一个重要特征是思维僵局会引起右半球信息保持增强,但并不意味着酝酿期是右脑的功能,这一无意识加工由包含额叶、颞叶、顶叶在内的广泛脑区的激活共同实现,其中海马、腹内侧前额叶参与酝酿期的加工,在实现催化表征重组过程中起重要作用;现有顿悟相关研究反映明朗期和验证期的神经机制,其起作用的脑区包括扣带回、前额叶、颞上回、海马、楔叶、楔前叶、舌回、小脑等,其中,前扣带回、前额叶在不同角度进行的研究中均有参与,颞上回负责远距离联想的形成,海马与定势打破新颖联系形成过程有关,外侧额叶负责定势转移,而楔前叶、左侧额下/额中回、舌回在原型激活中起关键作用,左外侧前额叶负责对答案的细节性验证加工。

根据不同研究中研究者所关注的认知过程的不同归为不同阶段,初步总结了创造性四阶段的神经机制,如图1所示。同时,对创造性阶段性及其神经机制的研究不仅具有理论价值,也有一定的应用价值,现有研究也为提高个体创造性顿悟的提供了启示,如Hao等人(2014)关于酝酿期的

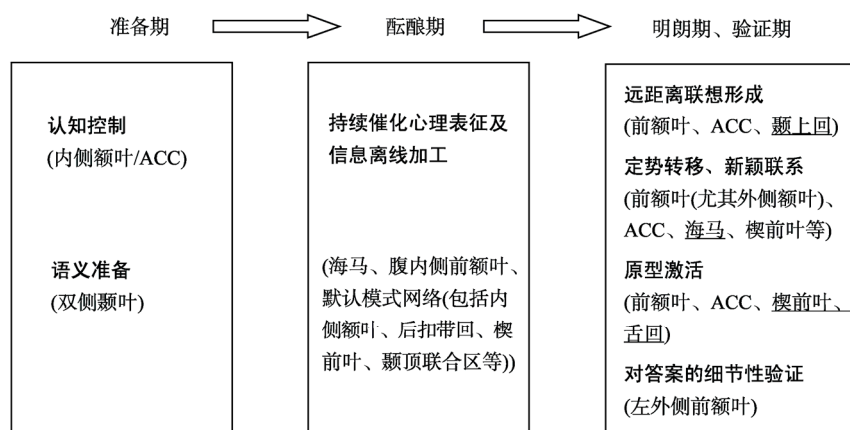


图1 创造性思维四阶段神经基础

研究表明，在酝酿期内嵌入诱发个体远距离联想的任务能提高个体创造性，并且这一促进作用与嵌入任务的认知负荷高低无关。认知神经研究方面，对顿悟相关脑区的经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)对个体创造性顿悟任务表现具有促进作用，如与远距离联想形成有关的右侧颞上回(Chi & Snyder, 2011)、与定势转移有关的左腹外侧前额叶(Metuki, Sela, & Lavidor, 2012)。但就目前研究而言，仍缺乏对这一过程的系统探讨，对各阶段的研究也有待进一步的深入。未来研究可从以下三方面加以改进：

第一，研究对象方面。对创造性阶段性的研究，实质是在探究创造力作为一种高级认知所包含的普遍规律，其遵循创造性的领域普遍观。因而加强对高创造力个体的研究，对认识创造性高低的个体差异具有重要的现实意义。另外，应结合脑损伤病人的研究，对现有研究所观察到的脑区作用进行更严格的验证。

第二，研究内容方面。首先，由于创造性思维的复杂性，不同研究者之间在研究范式及研究技术上均存在差异，因而仍需通过更合理严密的实验设计，增强研究之间的可比性；其次，目前对准备期、酝酿期神经基础研究仍然较少。就准备期而言，对解题前静息状态的分析显示其与创造性问题解决联系密切，而个体认知风格、人格等因素与创造性问题解决能力，尤其是认知风格的相关研究显示，在创造性任务表现及静息状态脑连接模式上存在个体差异性(Furnham, Batey, Booth, Patel, & Lozinskaya, 2011; Miller, Donovan, Bennett,

Aminoff, & Mayer, 2012)，因而未来研究应结合具体实验设计对静息状态作进一步的分析。就酝酿期而言，对与酝酿相关的默认模式网络探讨也有待未来深入研究。酝酿期提示及原型顿悟的研究为创造性阶段性的研究提供了可参考的范式，未来可加强对这一过程的系统探讨；再次，情绪与创造性思维的关系是一个值得关注的问题，主要体现在两个方面：一是创造性思维过程可能涉及情绪脑的相关脑区，如有研究者(Zhao et al., 2013)以谜语为材料的顿悟脑电研究中，观察到与 Aha 体验有关的晚期 ERP 成分，定位于杏仁核。二是现有研究表明积极的心境或情绪均对创造性顿悟具有促进作用，如在准备期题目呈现引发不同情绪状态(Topolinski & Deutsch, 2012)，及酝酿期解题失败后呈现情绪图片(Sakaki & Niki, 2011)的相关研究。由上可知，创造性思维过程涉及的主要脑区可能与情绪脑功能区存在信息交流，并且情绪还对创造性问题解决具有促进作用。但现有研究仍不足以阐明与此相关的具体神经机制，应在未来作进一步的深入探讨。

第三，研究手段方面。创造性思维的每一阶段需要多个脑区的共同参与，且不同脑区活动极可能存在联系及交互作用，但目前对此分析较少，因此需结合 fMRI 脑成像数据处理方法充分挖掘数据规律，包括采用相关分析、一般线性模型(generalized linear model, GLM)等方法进行的功能连接分析，以及采用结构方程模型(structural equation modeling, SEM)、多变量回归模型(multivariate auto regressive modeling, MAR)、Granger 因果分

析等方法进行的有效连接分析(梁夏, 王金辉, 贺永, 2010)。同时, 未来仍需进一步结合高时间精度的脑电技术和高空间精度的脑成像技术, 才能更精确的定位相应脑区与认知过程的关系。

参考文献

- 梁夏, 王金辉, 贺永. (2010). 人脑连接组研究: 脑结构网络和脑功能网络. *科学通报*, 55(16), 1565–1583.
- 刘春雷, 王敏, 张庆林. (2009). 创造性思维的脑机制. *心理科学进展*, 17(1), 106–111.
- 罗劲. (2004). 顿悟的大脑机制. *心理学报*, 36(2), 219–234.
- 罗劲, 张秀玲. (2006). 从困境到超越: 顿悟的脑机制研究. *心理科学进展*, 14(4), 484–489.
- 罗俊龙, 覃义贵, 李文福, 朱海雪, 田燕, 邱江, 张庆林. (2012). 创造发明中顿悟的原型启发脑机制. *心理科学进展*, 20(4), 504–513.
- 邱江, 张庆林. (2011). 创新思维中原型激活促发顿悟的认知神经机制. *心理科学进展*, 19(3), 312–317.
- 沈汪兵, 刘昌, 袁媛, 张小将, 罗劲. (2013). 顿悟类问题解决中思维僵局的动态时间特性. *中国科学: 生命科学*, 43(3), 254–262.
- 沈汪兵, 刘昌, 陈晶晶. (2010). 创造力的脑结构与脑功能基础. *心理科学进展*, 18(9), 1420–1429.
- 唐晓晨, 庞娇艳, 罗劲. (2009). 顿悟中的蔡格尼克效应: 左右脑在解题失败与提示信息加工时的活动差异. *科学通报*, 54(22), 3464–3474.
- 张忠炉, 邢强, 唐志文, 徐争鸣, 蔡新华. (2012). 酝酿期有效提示和无效提示的比较. *心理科学*, 35(4), 901–905.
- 朱海雪, 杨春娟, 李文福, 刘鑫, 邱江, 张庆林. (2012). 问题解决中顿悟的原型位置效应的 fMRI 研究. *心理学报*, 44(8), 1025–1037.
- 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.
- Amabile, T. M. (1988). A model of creativity and innovation in organizations. In B. M. Staw & L. L. Cummings (Eds.), *Research in organizational behavior* (Vol. 10, pp. 123–167). Greenwich, CT: JAI Press.
- Anderson, J. R., Anderson, J. F., Ferris, J. L., Fincham, J. M., & Jung, K. (2009). Lateral inferior prefrontal cortex and anterior cingulate cortex are engaged at different stages in the solution of insight problems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(26), 10799–10804.
- Andrade, K. C., Spoormaker, V. I., Dresler, M., Wehrle, R., Holsboer, F., Sämann, P. G., ... Czeisler, M. (2011). Sleep spindles and hippocampal functional connectivity in human NREM sleep. *The Journal of Neuroscience*, 31(28), 10331–10339.
- Baird, B., Smallwood, J., Mrazek, M. D., Kam, J. W., Franklin, M. S., & Schooler, J. W. (2012). Inspired by distraction: Mind wandering facilitates creative incubation. *Psychological Science*, 23(10), 1117–1122.
- Bowden, E. M., Jung-Beeman, M., Fleck, J., & Kounios, J. (2005). New approaches to demystifying insight. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 322–328.
- Bowden, E. M., & Jung-Beeman, M. (2003). Normative data for 144 compound remote associate problems. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(4), 634–639.
- Cai, D. J., Mednick, S. A., Harrison, E. M., Kanady, J. C., & Mednick, S. C. (2009). REM, not incubation, improves creativity by priming associative networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(25), 10130–10134.
- Chi, R. P., & Snyder, A. W. (2011). Facilitate insight by non-invasive brain stimulation. *PLoS One*, 6(2), e16655.
- Christoff, K. (2012). Undirected thought: Neural determinants and correlates. *Brain Research*, 1428, 51–59.
- 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.
- Darsaud, A., Wagner, U., Baeteau, E., Desseilles, M., Sterpenich, V., Vandewalle, G., ... Boly, M. (2011). Neural precursors of delayed insight. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(8), 1900–1910.
- Dijksterhuis, A., & Nordgren, L. F. (2006). A theory of unconscious thought. *Perspectives on Psychological Science*, 1(2), 95–109.
- Fink, A., Grabner, R. H., Gebauer, D., Reishofer, G., Koschutnig, K., & Ebner, F. (2010). Enhancing creativity by means of cognitive stimulation: Evidence from an fMRI study. *Neuroimage*, 52(4), 1687–1695.
- Finke, R. A., Ward, T. B., & Smith, S. M. (1992). *Creative cognition: Theory, research, and applications* (pp. 17–28). Cambridge, MA: MIT press.
- Furnham, A., Batey, M., Booth, T. W., Patel, V., & Lozinskaya, D. (2011). Individual difference predictors of creativity in Art and Science students. *Thinking Skills and Creativity*, 6(2), 114–121.
- 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., Georgiou, G. J., Garrison, J., Reston, J. D., & Sirota, M. (2012). Don't wait to incubate: Immediate versus delayed incubation in divergent thinking. *Memory & Cognition*, 40(6), 966–975.
- Gilhooly, K. J., Georgiou, G., & Devery, U. (2013). Incubation and creativity: Do something different. *Thinking & Reasoning*, 19(2), 137–149.
- Goel, V., & Vartanian, O. (2005). Dissociating the roles of right ventral lateral and dorsal lateral prefrontal cortex in generation and maintenance of hypotheses in set-shift problems. *Cerebral Cortex*, 15(8), 1170–1177.
- Greene, A. J., Gross, W. L., Elsinger, C. L., & Rao, S. M.

- (2006). An fMRI analysis of the human hippocampus: Inference, context, and task awareness. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(7), 1156–1173.
- Gruberger, M., Ben-Simon, E., Levkovitz, Y., Zangen, A., & Hendler, T. (2011). Towards a neuroscience of mind-wandering. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 56.
- Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, 5, 444–454.
- Hao, N., Ku, Y. X., Liu, M. G., Hu, Y., Grabner, R. H., & Fink, A. (2014). Enhancing verbal creativity via brief interventions during an incubation interval. *Creativity Research Journal*, 26(1), 30–38.
- Hélie, S., & Sun, R. (2010). Incubation, insight, and creative problem solving: A unified theory and a connectionist model. *Psychological Review*, 117(3), 994–1024.
- 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.
- Kounios, J., Fleck, J. I., Green, D. L., Payne, L., Stevenson, J. L., Bowden, E. M., ... Jung-Beeman, M. (2008). The origins of insight in resting-state brain activity. *Neuropsychologia*, 46(1), 281–291.
- Kounios, J., Frymiare, J. L., Bowden, E. M., Fleck, J. I., Subramaniam, K., Parrish, T. B., ... Jung-Beeman, M. (2006). The prepared mind neural activity prior to problem presentation predicts subsequent solution by sudden insight. *Psychological Science*, 17(10), 882–890.
- Kounios, J., & Beeman, M. (2009). The Aha! Moment the cognitive neuroscience of insight. *Current Directions in Psychological Science*, 18(4), 210–216.
- Luo, J. L., Li, W. F., Qiu, J., Wei, D. T., Liu, Y. J., & Zhang, Q. L. (2013). Neural basis of scientific innovation induced by heuristic prototype. *PLoS One*, 8(1), e49231.
- Luo, J., Niki, K., & Knoblich, G. (2006). Perceptual contributions to problem solving: Chunk decomposition of Chinese characters. *Brain Research Bulletin*, 70(4–6), 430–443.
- Luo, J., Niki, K., & Phillips, S. (2004a). The function of the anterior cingulate cortex (ACC) in the insightful solving of puzzles: The ACC is activated less when the structure of the puzzle is known. *Journal of Psychology in Chinese Societies*, 5(2), 195–213.
- Luo, J., Niki, K., & Phillips, S. (2004b). Neural correlates of the 'Aha! reaction'. *NeuroReport*, 15(13), 2013–2017.
- Luo, J., & Niki, K. (2003). Function of hippocampus in "insight" of problem solving. *Hippocampus*, 13(3), 316–323.
- Mai, X. Q., Luo, J., Wu, J. H., & Luo, Y. J. (2004). "Aha!" effects in a guessing riddle task: An event-related potential study. *Human Brain Mapping*, 22(4), 261–270.
- Metuki, N., Sela, T., & Lavidor, M. (2012). Enhancing cognitive control components of insight problems solving by anodal tDCS of the left dorsolateral prefrontal cortex. *Brain Stimulation*, 5(2), 110–115.
- Miller, M. B., Donovan, C., Bennett, C. M., Aminoff, E. M., & Mayer, R. E. (2012). Individual differences in cognitive style and strategy predict similarities in the patterns of brain activity between individuals. *NeuroImage*, 59(1), 83–93.
- Nordgren, L. F., Bos, M. W., & Dijksterhuis, A. (2011). The best of both worlds: Integrating conscious and unconscious thought best solves complex decisions. *Journal of Experimental Social Psychology*, 47(2), 509–511.
- Parnes, S. J. (1962). Can creativity be increased? In S. J. Parnes & H. F. Harding (Eds.), *A source book for creative thinking* (pp. 185–191). New York: Scribner's.
- 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.
- Qiu, J., Li, H., Jou, J., Wu, Z., & Zhang, Q. (2008). Spatiotemporal cortical activation underlies mental preparation for successful riddle solving: An event-related potential study. *Experimental Brain Research*, 186(4), 629–634.
- Qiu, J., Li, H., Yang, D., Luo, Y., Li, Y., Wu, Z., ... Zhang, Q. (2008b). The neural basis of insight problem solving: An event-related potential study. *Brain and Cognition*, 68(1), 100–106.
- Ritter, S. M., van Baaren, R. B., & Dijksterhuis, A. (2012). Creativity: The role of unconscious processes in idea generation and idea selection. *Thinking Skills and Creativity*, 7(1), 21–27.
- Sakaki, M., & Niki, K. (2011). Effects of the brief viewing of emotional stimuli on understanding of insight solutions. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 11(4), 526–540.
- Sandkühler, S., & Bhattacharya, J. (2008). Deconstructing insight: EEG correlates of insightful problem solving. *PLoS One*, 3(1), e1459.
- Segal, E. (2004). Incubation in insight problem solving. *Creativity Research Journal*, 16(1), 141–148.
- Shen, W., Luo, J., Liu, C., & Yuan, Y. (2013). New advances in the neural correlates of insight: A decade in review of the insightful brain. *Chinese Science Bulletin*, 58(13), 1497–1511.
- Sheth, B. R., Sandkühler, S., & Bhattacharya, J. (2009). Posterior beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(7), 1269–1279.
- Sio, U. N., & Ormerod, T. C. (2009). Does incubation enhance problem solving? A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 135(1), 94–120.
- Sio, U. N., & Ormerod, T. C. (2014). Incubation and cueing effects in problem-solving: Set aside the difficult problems but focus on the easy ones. *Thinking & Reasoning* (ahead-

- of-print), 1–17.
- Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2013). The restless mind. *Psychology of Consciousness: Theory, Research, and Practice*, 1(S), 130–149.
- Smit, D. J., Boomsma, D. I., Schnack, H. G., Hulshoff Pol, H. E., & de Geus, E. J. (2012). Individual differences in EEG spectral power reflect genetic variance in gray and white matter volumes. *Twin Research and Human Genetics*, 15(3), 384–392.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1999). The concept of creativity: Prospects and paradigms. *Handbook of Creativity*, 1, 3–15.
- Subramaniam, K., Kounios, J., Parrish, T. B., & Jung-Beeman, M. (2009). A brain mechanism for facilitation of insight by positive affect. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(3), 415–432.
- Tian, F., Tu, S., Qiu, J., Lv, J. Y., Wei, D. T., Su, Y. H., ... Zhang, Q. L. (2011). Neural correlates of mental preparation for successful insight problem solving. *Behavioural Brain Research*, 216(2), 626–630.
- Topolinski, S., & Deutsch, R. (2012). Phasic affective modulation of creativity. *Experimental Psychology*, 59(5), 302–310.
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427(6972), 352–355.
- Wallas, G. (1926). *The art of thought*. New York: Harcourt Brace Jovanovich.
- Wegbreit, E., Suzuki, S., Grabowecky, M., Kounios, J., & Beeman, M. (2012). Visual attention modulates insight versus analytic solving of verbal problems. *The Journal of Problem Solving*, 4(2), 94–115.
- Wu, L., Knoblich, G., & Luo, J. (2013). The role of chunk tightness and chunk familiarity in problem solving: Evidence from ERPs and fMRI. *Human Brain Mapping*, 34(5), 1173–1186.
- Wu, L., Knoblich, G., Wei, G., & Luo, J. (2009). How perceptual processes help to generate new meaning: An EEG study of chunk decomposition in Chinese characters. *Brain Research*, 1296, 104–112.
- Zhang, H., Liu, J., & Zhang, Q. (2014). Neural representations for the generation of inventive conceptions inspired by adaptive feature optimization of biological species. *Cortex*, 50, 162–173.
- Zhang, M., Tian, F., Wu, X., Liao, S., & Qiu, J. (2011). The neural correlates of insight in Chinese verbal problems: An event related-potential study. *Brain Research Bulletin*, 84(3), 210–214.
- 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, Y. F., Tu, S., Lei, M., Qiu, J., Ybarra, O., & Zhang, Q. L. (2011). The neural basis of breaking mental set: An event-related potential study. *Experimental Brain Research*, 208(2), 181–187.

Neural Basis of Creative Thinking during Four Stages

ZHAN Huijia¹; LIU Chang¹; SHEN Wangbing^{1,2}

(¹ Laboratory of Cognitive Neuroscience and Department of Psychology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

(² Institute of Applied Psychology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Wallas put forward an important creative process model and defined four stages of creativity as follows: preparation, incubation, illumination, and verification. The investigations of brain state before the presentation of a creative problem show that the neural activity of the preparation stage is associated with medial PFC/ACC and temporal areas. The neuroscientific researches on presentation of a hint during incubation, delayed insight and mind-wandering reflect the neural correlates of incubation, and the main active brain regions during this stage include hippocampus and ventrolateral PFC. The last two stages are associated with a neural network consisting of several brain regions including PFC, ACC, superior temporal gyrus, hippocampus, precunes, cunes, lingual gyrus and cerebellum et al. The PFC and ACC are involved in different kinds of insight problem solving; the superior temporal gyrus is responsible for the formation of remote associations; the hippocampus is associated with the process of mental set breaking and formation of novel associations; the lateral prefrontal cortex is responsible for mental set shifting; the precunes, left middle/inferior frontal gyrus and lingual gyrus participate in the process of prototype activation. In addition, the verification of the details of solution is found to rely on the left lateral prefrontal cortex. Future studies can be improved in the aspects of research subjects, contents and methods, so that the process of creative thinking can be investigated systematically.

Key words: creative thinking; four stages; neural correlates; incubation; insight