

# 顿悟脑的 10 年: 人类顿悟脑机制研究进展

沈汪兵<sup>①</sup>, 罗劲<sup>②③\*</sup>, 刘昌<sup>①\*</sup>, 袁媛<sup>①</sup>

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 首都师范大学学习与认知北京市重点实验室, 北京 100083;

③ 中国科学院心理健康重点实验室, 北京 100101

\* 联系人, E-mail: luoj@psych.ac.cn; cglew@163.com

2012-02-27 收稿, 2012-04-01 接受

国家自然科学基金(30770708)、国家重点基础研究发展计划(2010CB833900)和江苏省第 4 期“333 高层次人才培养工程”资助项目

**摘要** 自 21 世纪首次借助脑成像技术对解决字谜任务过程中顿悟一瞬间的大脑活动状况进行研究以来, 目前已有近 10 年的历史, 获得了许多富有价值的研究. 这些研究从顿悟的时间进程和脑神经基础两方面对顿悟的大脑机制进行了丰富的探讨, 并形成了有关人类解决顿悟问题的“顿悟脑”的神经框架. 研究显示, 顿悟脑主要由外侧前额叶、扣带回、海马、颞上回、梭状回、楔前叶、楔叶、脑岛和小脑组成. 就各脑区的功能而言, 外侧前额叶主要负责顿悟难题思维定势的转移和打破, 扣带回则参与新旧思路的认知冲突以及解题进程的监管, 海马、颞上回和梭状回组成了“三维一体”的、专门负责新异而有效联系形成的神经网络, 问题表征的有效转换则依赖于楔叶和楔前叶组成的“非言语的”视觉空间信息加工网络, 脑岛负责认知灵活性和顿悟相关情绪体验, 反应相关手指运动的皮下控制则依赖于小脑.

## 关键词

顿悟问题解决  
顿悟脑  
创造性思维  
神经影像  
事件相关电位

顿悟(insight)是指主体通过观察, 在对问题全局的整体把握或对由起始状态达到相应目标的途径有所了解的情况下, 在主体内部建立起手段和相应目标之间完形关系的过程. 它肇始于格式塔心理学家. 格式塔心理学家 Kohler<sup>[1]</sup>曾以黑猩猩为对象, 对动物的问题解决能力进行了深入研究, 发现问题解决过程可以“突变”方式发生. 他随即在此基础上构建起了一种新的学习理论——“顿悟说”, 并首次以科学方法界定了人类的高级认知过程——顿悟<sup>[2]</sup>. 尽管顿悟概念兴起较早, 但顿悟脑(insightful brain)的研究直到近年才起步. 具体而言, 顿悟脑源自顿悟的脑机制研究. 顿悟十分复杂, 其脑机制研究限于多方面原因也十分困难, 但它不仅在创造性思维中占有重要地位, 而且在促进人类社会以及科技文明的发展和进步方面也具有重要作用(人类历史上的许多重要而伟大的科技发明和科学发现都是通过顿悟解决的, 如阿基米德原理的发现和苯环结构的发现等), 这使得

研究者创造性地设计了各类任务和范式来探讨顿悟的脑机制. 自首项借助认知神经科学技术开展的顿悟脑机制的研究<sup>[2]</sup>诞生至今, 已有近 10 年历史, 期间涌现出大量原创的顿悟脑机制研究. 它们主要从电生理研究和脑成像研究两方面展开, 凭借其精确的时间精度和空间精度, 大体勾勒出了顿悟涉及的脑活动区域. 研究显示, 顿悟过程较多涉及了前额叶、扣带回、海马和海马旁回以及颞叶等区域(图 1). 这些区域与少数其他区域(如脑岛、小脑和顶枕皮层等)共同形成了顿悟脑的神经框架. 为早日揭开顿悟之谜, 对近 10 年内有关顿悟脑机制的研究进行了系统回顾和梳理, 并在此基础上对目前研究所勾勒出的顿悟脑的重要的脑区及其相应作用进行了总结和细致分析, 以期能够为未来这方面的研究提供某些有益的启示.

## 1 前额叶

前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)是顿悟涉及

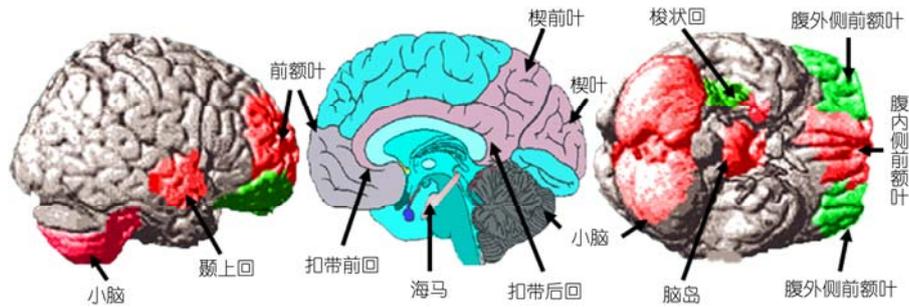


图1 顿悟脑的轮廓图

左为外侧面图，中为正中矢状切面图，右为底面图。顿悟脑主要涉及前额叶(PFC)、扣带回(ACC)、后扣带回(PCC)、海马(hippocampus)、颞上回(STG)、梭状回(fusiform gyrus)、楔前叶(precunes)、楔叶(cunes)、脑岛(insula)以及小脑(cerebellum)等大脑功能区。这些区域在结构上有着丰富的神经和突触联系，并在功能上彼此相互交流和协作，共同形成了负责顿悟的认知过程和情感体验的神经网络

的主要脑区之一。它包括背外侧前额叶(dorsolateral PFC)、腹外侧前额叶(ventrolateral PFC)、眶额皮层(orbital PFC)以及内侧额叶(medial PFC)等区域。作为心理活动的执行系统和协调中心，它在近乎所有的高级心理活动中都有不同程度的激活<sup>[3~6]</sup>。顿悟作为一项高级思维活动，前额叶皮层自然也会参与。研究显示，顿悟更多激活了背外侧前额叶和腹侧前额叶(ventral PFC)区域<sup>[7]</sup>。

Goel 和 Vartanian<sup>[7]</sup>借助高空间精度的功能影像技术对人们解决火柴棒问题的顿悟过程进行了探讨。研究设置了2种条件，其中，基线条件要求被试对所给火柴棒问题解决方案数目的准确性进行评估；实验任务则要求被试主动解答并尽可能全面列举出所有的解决方案。结果显示，顿悟任务较之基线任务有明显的右腹外侧前额叶和左背外侧前额叶的激活。任务的成功解决过程(针对多解难题，被试至少知晓了1种解法)较之未成功解决过程(未获得任何正确方案)更多伴有右腹外侧前额叶、左额中回和左额极等区域的激活。尽管基线任务较之实验任务显著激活了右枕叶，但未解决的顿悟任务与基线任务所激活的区域并无差异。上述分析显示，右腹外侧前额叶在顿悟中具有重要作用。考虑到该区激活主要与成功顿悟有关，顿悟的一个显著特征是获得答案后会有较强烈的“啊哈”体验。因此，上述结果可能意味着前额叶的激活与顿悟体验有关。但脑损伤研究<sup>[8]</sup>和许多脑成像报告<sup>[9~11]</sup>并不支持该观点，以往研究较少观察到外侧前额叶区域与情绪刺激或情绪体验的加工有关。更重要的是，有关顿悟的脑成像研究显示，当向被试呈现问题答案后被试顿悟体验阶段激活的区域

主要是海马而非前额叶<sup>[10]</sup>。这表明前额叶不参与顿悟体验加工。针对前额叶的作用，创造性思维研究提供了启示。研究显示，结构不良创造性问题的解决总伴随着右侧前额叶的激活，说明该区的激活主要与问题表征加工有关<sup>[12~14]</sup>。因此，右腹外侧前额叶主要负责顿悟问题的表征转换或定势转移。当然，这并不能说明思维僵局打破和表征重构是由右腹外侧前额叶独立完成的，只表明右腹外侧前额叶是实现顿悟难题思维僵局成功打破和认知表征重构不可或缺的功能基础。这有两方面原因：一是思维僵局的打破作为顿悟最关键的过程之一，基本上不可能只是单个区域的激活就能实现的。如上所述，顿悟难题较之基线任务除激活右腹外侧前额叶外，还激活了左背外侧前额叶；顿悟事件较之未顿悟事件额外激活了额中回和额极等左侧前额区<sup>[7]</sup>。其二在于有研究<sup>[15]</sup>发现除右腹外侧前额叶外，左前额叶区域也会参与思维定势转移和问题表征重构。

Luo 等人<sup>[16]</sup>借助汉字组块破解任务进一步探讨了前额叶在顿悟中的作用。他们向被试呈现2个汉字，并要求被试对汉字进行组块破解使之形成2个新字，但组块破解过程不能有笔划残余。解题过程被分成了3个阶段：第一阶段是自我求解阶段，被试要在看到问题后，在没有任何外界提示帮助下凭借自己的智慧主动尝试解决问题；第二阶段是提示呈现阶段，2个汉字的破解部分已经以红色标示；第三阶段则是答案呈现阶段，屏幕上呈现组块破解后产生的2个新字。除此之外，实验中呈现的问题还包括结构松散难题(提示呈现前就已解决的难题)和结构紧密难题(提示呈现后才能解决的难题)。相对地，前者破解的成

分主要是汉字的偏旁部首(radical),后者破解的则是笔画(stroke). 锁定提示呈现阶段的脑成像结果显示,紧密结构问题较之松散结构问题显著激活了左右脑的多数额区(额上回、额中回和额下回). 同时,紧密结构难题优势激活的前额区多数在结构松散难题解决过程中也激活了,说明前额区不仅参与结构紧密难题解决,而且参与松散结构难题解决,只是参与两类难题的程度不同. 研究还显示,紧密结构难题除激活上述区域外,还独特地激活了右额中回、左额下回和临近右额下回的2个较小的区域. 考虑到功能成像技术的时间精度相对粗糙,导致很难分离出时间上紧邻的2个阶段的激活区域. 因此,唐晓晨等人<sup>[17]</sup>进一步借助高时间精度的ERPs对汉字组块破解促发的顿悟过程进行了探讨. 研究发现,在问题呈现阶段,未解决难题较之成功解决难题在右额区诱发了更大的P150,而已解决难题较之未解决难题在左额区诱发了更大的P150;在提示呈现阶段,未解决难题在右额区诱发了更大的P2,已解决难题在左额区诱发了更大的P2. 那些看了提示后仍无法解决的难题相比看了提示后可以解决的难题并未在右额区诱发更大的P2,意味着右额区未参与问题难度的加工. 综合而言,松散结构问题和紧密结构问题共同激活的,但后者优势激活的双侧前额叶区域可能主要反映结构紧密度或问题表征加工;紧密结构独特激活的右侧额中回和额下回以及左侧额下回则主要参与思维僵局的打破或定势转移——看到提示后被试摆脱了(松散结构问题所诱发以及启发式所致的)首选汉字偏旁部首为解题切入点和突破点的思维定势以及由此引起的思维僵局,在提示的帮助下重构问题表征并顺利解决了紧密结构问题.

有研究发现,在中等难度谜题解决过程中,顿悟事件较之非顿悟事件激活了右侧额下回和额中回以及左侧额下回<sup>[18]</sup>. 然而,右侧前额叶只在顿悟事件中激活而未在无顿悟事件中激活,表明它主要参与顿悟. 为进一步明确该区域的作用,研究按时间顺序将解题过程分成了早中晚3个阶段,并对早晚阶段的优势激活区进行了分析. 自谜题开始呈现到呈现后的2.5 s为早期阶段,谜题呈现后3~3.5 s则为晚期阶段. 早晚阶段优势激活区的比较显示,右腹侧前额叶只在晚期阶段激活(早期阶段顿悟事件较之非顿悟事件激活了负责语义加工的左侧额下回). 由于右腹侧前额叶的激活紧邻答案获取过程,于是它可能主要

反映成功顿悟或获得方案的元认知觉察<sup>[18]</sup>. Anderson等人<sup>[19]</sup>先后借助复合远距离联想任务(compound remote association task, CRA)和词干补笔任务(word fragment task)对顿悟不同阶段的脑机制进行了探讨. 研究首先扫描了被试主动解决CRA任务的脑活动状况. 结果显示,解决的任务较之未解决的任务在做顿悟反应之前的6 s内及其之后的4~10 s内均激活了左外侧前额叶下部,但在各阶段该区域的激活程度有差异. 在作出顿悟反应之前,该区域与其他区域的激活程度无显著差异;但在作出顿悟反应之后,该区域激活程度显著弱于其他脑区. 然而,就对照任务而言,左外侧前额叶下部的激活始终要强于其他脑区. 就心理过程来说,问题解决前后阶段的差异主要在于解决前侧重求解而解决后侧重答案获取过程;未解决任务前后阶段在心理过程并无差异,始终为解题过程. 因此,左外侧前额叶下部的激活可能与解题有关的心智努力有关. 为了排除CRA任务中问题难度所致解题时间长短对脑激活程度的干扰(时间累积会导致脑区激活程度增强),研究者采用简单的词干补笔任务进一步探讨了顿悟不同阶段的脑机制. 这类难题的解决虽然也需花费一定时间,各题所需时间不同,但解决这类难题所需的平均时间和波动都远要小于CRA任务,能较好排除时间累积干扰. 研究显示,成功解决任务在获得答案前的1~3 s内优势激活了左外侧前额叶下部,但在获得答案后的7~9 s内,该区域的激活程度虽有所减弱,但它并不比其他区域的激活水平低;未获得答案难题自始至终都优势激活了左外侧前额叶下部. 这说明,左外侧前额叶下部主要负责问题的主动求解过程,尤其是答案的搜索和提取加工.

除了对自发顿悟和答案提示后体验阶段的顿悟的脑机制进行研究,有学者还对原型启发情况下顿悟过程的脑机制进行了探讨. Qiu等人<sup>[20]</sup>采用多对多原型启发范式考察了被试在习得原型启发下顿悟过程的脑机制. 研究发现,顿悟事件较之无顿悟事件更多激活了左侧额中回和额下回;反之,无顿悟事件较之顿悟事件只激活了内侧额叶. 这表明左侧额中回和左侧额下回主要负责思维定势打破和新颖联系形成<sup>[20]</sup>. 一对一原型启发条件下已解决问题与未解决问题的比较显示,前者较后者未产生任何源自前额叶的差异成分<sup>[21]</sup>. 由于一对一原型启发变式不仅较少涉及思维定势打破,而且借助原型解决问题更直

接,导致被试有意或无意借助原型字谜所诱发的思维定势解决随后靶问题的效应很明显。但在多对多条件下,被试虽也借助原型字谜信息来解决靶问题,由于同一组块中包含多个靶问题,各原型问题与靶问题并非严格匹配,于是定势效应较小,相反在一定程度上增强了定势转移——解决某一难题需排除同组块中其他原型信息的干扰。因此,左侧额中回和额下回的激活主要与定势转移和工作记忆有关。一对一原型启发条件下顿悟脑机制的研究显示,问题的成功解决较答案的成功再认会在 300~350 ms 出现一个源于左额下回的差异负成分,其可能主要与语义特征提取有关<sup>[22]</sup>。先前有关工作记忆脑机制的研究也表明左额下回与语义提取过程有关<sup>[23]</sup>。Anderson 等人<sup>[19]</sup>的有关远距离联想的脑机制研究显示左外侧前额叶下部主要参与工作记忆。Goel 和 Vartanian<sup>[7]</sup>也发现背外侧前额叶主要负责工作记忆和冲突消解加工。这些表明,左侧额下回主要负责工作记忆,左侧额中回则主要与定势转移有关。Jung-Beeman 等人<sup>[11]</sup>从侧面为上述结论提供了证据。他们发现,解决的问题较之未解决的问题虽更多激活了左右侧额下回和左内侧额叶,但双侧额下回的激活并不显著。与字谜任务相比,CRA 任务更多涉及新颖联想而较少涉及定势转移,于是未观察到左额中回的激活。另有研究显示,在无原型启发时,客观界定的顿悟问题较之常规问题会在问题呈现后 1200~1500 ms 出现一个更正的脑电成分,且其差异成分源定位于左侧额上回。同时,它主要负责思维僵局的打破与冲突消解<sup>[24]</sup>。Luo 等人<sup>[15]</sup>向被试呈现一系列常规问题和脑筋急转弯问题,要求被试在呈现答案前主动解题,然后呈现答案并要求他们将自己思考所得结果与所给答案进行比较。锁定答案呈现阶段的脑成像结果显示,顿悟事件较之无顿悟事件更多激活了左外侧前额叶和少数其他区域。难理解事件较之无顿悟事件激活了左右脑的外侧前额叶。由于无顿悟事件和难理解事件主要差异在于问题难度方面,故上述结果表明双侧前额叶某些区域参与难度加工。考虑到难理解事件较之顿悟事件也激活了左外侧前额叶,顿悟最关键的过程是思维僵局的打破,难理解事件主要体现为思维僵局无法打破。于是,右侧前额叶脑区可能主要负责思维僵局的打破。随机效应分析显示,任务解决过程较之静息状态持续激活了左外侧前额叶,且该区的激活与任务熟悉性无关。因此,左外侧前额叶除负责

难度加工外,还参与了思维定势转移。综上,左脑前额叶参与顿悟问题解决,主要负责工作记忆、问题难度以及协助右侧前额完成定势转移。相对地,若所激活区域越接近左部外侧前额叶的外侧上部,其协助右脑前额叶实现思维定势打破的可能就越大;若所激活区域越临近左脑前额叶的外侧下部,那么它参与工作记忆的可能性就越大。

此外,有研究采用数字递减任务(NRT)探讨了延迟顿悟的脑机制<sup>[25,26]</sup>。研究者向被试呈现一系列数字,要求被试依据“相同规则”和“相异规则”和所给数字串生成相应数字,所生成数字最终也组成一个数字串且能成为所给数字串的答案。所生成数字串的 6 位尾数间有一种镜像关系,被试只需生成字符串的前 3 个数,依据镜像规则便能迅速知晓后 3 个数。当他们发现规则时,发现规则后解题的反应时会急剧下降,意味着此时产生了顿悟。脑成像研究显示,尝试解决但尚未解决问题的求解过程更多激活了左右脑的腹内侧前额叶和运动区。但顿悟并获得答案后则主要是激活了右脑的背内侧前额叶和背外侧前额叶。研究认为顿悟延迟间隔内前额叶的激活可能与规则发现以及离线(off-line)记忆有关。顿悟后前额叶的激活可能与其广泛的神经网络联结有关,主要与意识加工,尤其是意识觉知、记忆提取以及心理意象(mental imagery)等有关<sup>[25]</sup>。顿悟是一种不可预知且突然产生的心理过程,功能核磁成像的时间精度相对有限,使得人们很难借助它精准锁定顿悟发生瞬间的脑活动状况。因此,研究者借助高时间精度的脑电图技术对数学问题顿悟过程的脑机制进行了研究,结果证实了上述结论,发现右侧前额叶参与了顿悟<sup>[26]</sup>。NRT 的思维定势虽不明显,但它仍存在并主要表现为依据“相同”和“相异”规则解决问题的思维窠臼。换言之,在发现规则后,被试需要摆脱或舍弃依据“相同”和“相异”规则的常规解决思路,充分利用发现的规则和启发式来解题。因此,右侧前额叶参与了常规解题思路的抉择和相应反应定势的成功打破。

前额叶作为重要的执行和协调中心,其在各种高级认知任务中有着重要作用。顿悟作为一项高级思维活动,自然也需前额叶的参与。确实,无论是有关顿悟的电生理研究<sup>[21~28]</sup>还是脑成像研究<sup>[18~20,25,29]</sup>均观察到了前额叶的激活。虽然各研究的激活区域会因实验任务、研究范式、参照基线以及图像分析技术等因素的不同而有所差异,但都显著激活了左右

脑的背外侧和腹外侧前额叶,尤其是右腹外侧前额叶.在功能上,左右脑的外侧前额叶均有可能参与顿悟问题的定势转移,只是右外侧前额叶在思维定势打破过程中的作用更显著,左外侧前额叶是否参与定势转移则与任务性质、研究范式和激活具体区域有关.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就大.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就大.此外,左外侧前额叶区域除参与定势转移和工作记忆加工以外,还可能参与任务难度加工以及任务无关活动的抑制.针对前额叶究竟是去激活(deactivated)还是激活(activated)主要取决于其作用.一般地,前额叶主要与常规认知过程和功能的调制有关,若其主要负责工作记忆和认知抑制则倾向激活.但是,顿悟在一定程度上需要人们常规认知功能的“失活”,这典型表现为某些前额叶损伤或者被“虚拟切除”的被试在解决顿悟难题时会产生更好的成绩.在这种情况下,人们解决顿悟难题时,前额叶若不是以常规认知调制身份参与的,它相对其他顿悟相关脑区更倾向去激活或负激活.

## 2 扣带回

扣带回(cingulate cortex)在解剖上属于边缘系统的重要部分,其主要位于大脑内侧扣带沟和胼胝体之间,且不完全地包裹着胼胝体.解剖研究显示,扣带回的前端和尾端在形态上有明显差异,据此它被分成了扣带回前部和扣带回后部两部分.大量研究显示,扣带回在反应监控、错误觉察、认知冲突、工作记忆以及其他各类伴随情绪唤醒的高级认知和心理活动中均起着重要作用<sup>[30-36]</sup>.顿悟的脑机制研究普遍显示,顿悟难题的解决和顿悟体验的产生过程均观察到了扣带回的显著激活.虽然多数研究检测到的是扣带回前部的激活,但少数研究也观察到了扣带回后部的激活<sup>[11,22]</sup>,下文将进一步就各实验来对扣带回在顿悟中的作用进行阐述.

Luo 和 Niki<sup>[10]</sup>借助脑筋急转弯问题首次精确记录了人类顿悟的大脑机制.他们向被试呈现一系列脑筋急转弯问题和常规问题,要求被试在所给时间内主动思考并尽量找到合适答案.经过一段时间思考后,研究者向被试呈现问题答案,并对被试看到答案时的脑活动状况进行了脑成像扫描.结果显示,顿悟事件较之无顿悟事件显著激活了右侧扣带回前部.

同时,无顿悟事件较之顿悟事件则显著激活了左右脑的扣带回后部和左侧扣带回前部.难理解事件(问题呈现阶段没有产生正确答案但能理解所给答案,然而理解所需时间较长且在主观上克服了诸多困难的事件)较之无顿悟事件只激活了左侧扣带回前部.难理解事件较之顿悟事件并未激活任何与扣带回有关的脑区.研究还发现,顿悟任务较之静息状态持续激活了扣带回前部与左侧前额叶.激活区的随机效应分析显示,扣带回前部的激活水平有随实验组块(block)增加而急剧减弱趋势.于是,扣带回前部可能与呈现答案前后新旧思路之间的认知冲突有关.为明确其具体作用,笔者对各条件下优势激活的扣带回区进行了细致比较.分析显示,左侧扣带回前部在难理解事件与顿悟事件的比较中并未优势激活,但在无顿悟事件与顿悟事件的比较以及难理解事件与无顿悟事件的比较中均处于优势激活.因此,该区域可能并非顿悟事件特有的,而应是扮演一种普遍策略机制.就左侧扣带回前部的激活而言,难理解事件显著强于无顿悟事件,无顿悟事件又显著强于顿悟事件.若两者激活的是同一区域,激活度的强弱则应具有传递性,意味着难理解事件的激活程度要显著强于顿悟事件.但难理解事件与顿悟事件激活程度实际上并无差异,说明不具有传递性,也就表明顿悟事件和难理解事件激活左侧扣带回前部的具体脑区有一定差异.针对此,左侧扣带回前部可能主要负责元认知监控或“早期预警”<sup>[2]</sup>.以往研究显示,元认知很难监控顿悟的进程.换言之,无顿悟事件中左侧扣带回前部的激活主要与元认知参与问题解决的进程监控有关,而难理解事件中左侧扣带回前部的激活与元认知觉察到僵局出现的早期预警有关.难理解事件与顿悟事件在左侧扣带回前部的激活水平上无差异,这可能与两者叠加的试次数有关.考虑到难理解事件与顿悟事件的扣带回的激活程度无差异,故扣带回的激活可能与顿悟事件中思维僵局的打破和获得答案后的顿悟体验无必然联系.但顿悟事件优势激活了右侧扣带回前部,无顿悟事件显著激活了左右脑的扣带回后部.其中,前者可能与认知冲突有关,因为顿悟主要被界定为那些被试在问题主动解决阶段所想答案与随后所给答案不匹配(所想结果没有所给答案好但能理解所给答案或者比所给答案好)的事件,无顿悟则是被试所想答案与所给答案一致的事件.因此,右侧扣带回前部的激活可能与顿悟过程中新旧思路的冲突检测和消解有

关。针对左右脑扣带后回的作用, 尽管其具体作用尚不明确, 但创造性思维脑机制研究显示, 新手被试在操作计数任务时会独特激活右侧扣带后回<sup>[37]</sup>。经济决策和道德决策的神经机制研究显示, 左右脑扣带后回(尤其是右侧扣带后回)与经济决策中期望效用的预期奖赏概率<sup>[38]</sup>以及道德决策中期望效用值和实际效用值以及事件概率加工(多是右侧扣带后回)有关<sup>[39]</sup>。另有研究发现, 扣带后回在前额叶皮层监控反应冲突后会协助相关运动脑区来解决冲突<sup>[40,41]</sup>。因此, 右侧扣带后回可能主要负责决策的风险和信心评估——标示被试在作出无顿悟反应的判断时有较强的信心, 而左侧扣带后回则负责协助风险评估以及协助问题解决, 尤其是协助完成反应的最终决定。Jung-Beeman 等人<sup>[11]</sup>与邱江和张庆林<sup>[22]</sup>分别借助 CRA 任务和原型启发范式开展的研究却显示, 顿悟问题较之非顿悟问题优势激活了左脑扣带后回。这两项研究都不存在所谓的新旧思路的认知冲突。因此, 参与认知冲突检测与消解的扣带前回不会显著激活。但 Jung-Beeman 等人<sup>[11]</sup>发现, 顿悟和非顿悟问题解决过程均激活了左侧扣带后回, 只是顿悟问题较非顿悟问题更早激活该区。考虑到顿悟事件的解决相对快于非顿悟事件, 且都以按键反应来标示问题解决, 故研究者认为左侧扣带后回激活是由按键反应所致而与解题过程本身无关。邱江和张庆林<sup>[22]</sup>认为其研究尽管检测到的只是扣带后回的激活, 由于该结果是源定位的结果, 因此他们认为它的激活可能也与思维僵局的早期预警有关。

Aziz-Zadeh 等人<sup>[18]</sup>向被试呈现一系列中等难度单词的变式, 要求被试对单词字母(类似汉语中的非字)进行调整以使单词能形成单词(如“oxima”调整后形成常规单词“axiom”)。顿悟事件与记忆搜索事件的比较显示, 顿悟事件和非顿悟事件均激活了扣带前回, 且顿悟事件较之非顿悟事件仍优势激活了该区域(尤其是左右半球联结处的扣带回)。为明确该区域在顿悟中的作用, 研究将解题过程分成了早中晚3个阶段, 并对早晚阶段的激活区进行了分析, 发现顿悟事件较之非顿悟事件仅在晚期(字谜呈现后的3~3.5 s的间隔)优势激活了扣带前回, 这意味着扣带前回的成功顿悟不可或缺的一个重要区域。考虑到顿悟很难被元认知监控到, 于是扣带前回的激活可能并不是参与顿悟过程的进程监控, 而是参与或协助前额叶等脑区来完成目标调整、监控和执行控制。为清楚

阐明扣带前回的阶段特征及其在顿悟刹那的认知功能, Anderson 等人<sup>[19]</sup>采用两种相似的词汇联想任务(分别是 CRA 任务和词干补笔任务)来对人们顿悟的过程进行了扫描。结果显示, 成功解决任务较之未解决任务在顿悟前的6 s内与顿悟后的4~10 s均激活了左侧扣带前回。在成功解决事件中, 顿悟发生前左侧扣带前回与前额叶的激活程度相同, 但顿悟发生后扣带前回的激活显著强于前额叶。然而, 未解决事件整个过程中扣带前回的激活自始至终都要弱于前额叶。采用词干补笔任务作了进一步考察, 研究发现在成功解决事件中, 顿悟发生前(-3~-1 s)左扣带前回的激活程度显著弱于前额叶, 但该区域在顿悟发生后(7~9 s)的激活程度与前额叶却无差异。在未解决事件中, 左扣带前回的激活自始至终弱于前额叶。词干补笔任务常见于记忆研究, 考虑到它具有完形的特点, 故也可用于考察顿悟。综合多方面证据, 研究者认为前额叶激活主要与问题答案的记忆提取有关。故上述脑成像结果表明, 在顿悟发生前, 扣带前回与负责主动求解和从记忆中搜寻与提取答案的前额区的激活程度相同。但在顿悟发生后, 前额叶负责的记忆提取加工基本结束。因此, 前额区的激活显著降低, 但左侧扣带前回的激活程度并未随之下降。在未解决事件中, 记忆搜寻与提取过程自始至终在进行, 于是参与该过程的前额区持续激活, 且显著强于左侧扣带前回。未顿悟事件脑区激活状况的分析显示, 成功顿悟事件中观察到的脑区激活可能有时间累积效应的干扰, 但词干补笔任务排除了这种干扰。有关词干补笔任务的研究显示, 由于前额区需参与顿悟难题答案的提取, 于是在成功顿悟事件中左侧扣带前回的激活在顿悟前显著低于前额区, 但在未解决事件中左侧扣带前回的激活自始至终都显著低于前额区。然而, 顿悟难题解决后, 记忆提取结束, 故其激活程度也就减弱。因此, 该区与左侧扣带前回的激活程度无差异。上述结果表明, 左侧扣带前回在整个顿悟难题的解题过程中激活相当稳定, 但先前研究显示, 元认知很难监控顿悟的发生。同时, 不管难题是否解决, 左侧扣带前回均有激活, 意味着该区域可能在解题过程中具有策略普遍功能。因此, 左侧扣带前回主要负责问题解决的目标导向与监管。

Luo 等人<sup>[29]</sup>发现, 扣带前回的激活程度会因谜语结构的知悉情况而变化。当人们知道谜语的构成规则时, 其扣带前回的激活就更低。研究设置了两类

条件,实验条件中的字谜涉及不同规则,对照条件下的字谜则涉及相同规则.脑成像数据显示,实验任务较之静息状态更多激活了右侧扣带前回,对照条件较之静息状态则更多激活了左侧扣带前回.同时,实验条件下左侧扣带前回激活程度明显强于对照条件(主要表现为激活体素数目的巨大差异).研究认为,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.具体说来,他们认为左侧扣带前回反映一般性的自上而下的信息加工,右侧扣带前回则反映的是早期预警加工.该解释得到了诸多研究的支持.Qiu等人<sup>[20]</sup>有关“多对多”原型启发条件下顿悟脑机制的研究显示,靶字谜的解决(顿悟事件)较之原型字谜的解决(常规事件)没有出现扣带回的显著激活,但原型字谜的解决较之靶字谜的解决优势激活了左侧扣带前回和右侧扣带后回.据此可知,左侧扣带前回和右侧扣带后回共同参与原型问题的解决.若认为原型问题解决过程是被试借助知识经验主动发现规则的过程,那么靶问题则是被试依靠原型问题习得的规则并在其启发下解决问题的过程.因此,上述激活模式表明,当被试知道(或者感觉自己知道)解题策略或解题规则时,其扣带回的激活就低.另有研究发现同一事件顿悟前后也会出现类似状况.Darsaud等人<sup>[25]</sup>采用NRT任务进行研究,发现顿悟后较顿悟前更多激活了左侧扣带前回和左右脑的扣带后回.这些结果意味着,无论是难题以顿悟方式成功解决前后的比较还是顿悟难题与常规难题不同类别间的比较,均会检测到左侧扣带前回和右侧扣带前回的激活.

扣带回在顿悟中非常重要.除得到上述脑成像研究支持外,许多有关顿悟的脑电成分溯源数据也支持该观点.邱江和张庆林<sup>[22]</sup>借助原型启发范式对顿悟脑机制进行研究,发现成功猜得答案的字谜较之准确再认答案的字谜在刺激呈现后300~350 ms诱发了一个源位于左扣带后回的负成分.他们认为,尽管是左扣带后回的激活,但该区域可能反映的是扣带前回类似的加工,主要负责对思维定势以及认知冲突的监控与抑制.Mai等人<sup>[42,43]</sup>借助猜谜任务对谜底催化产生的“顿悟”的ERP效应进行了探讨,发现顿悟反应较之无顿悟反应诱发了一个源位于扣带前回的类N400差异成分.Qiu等人<sup>[44,45]</sup>也观察到相似结果.不同的是,“不理解”字谜较之“无顿悟”字谜也诱发了一个相同的脑电差异成分.因此,该成分可能并

不表征思维定势的打破,而是表征提供答案瞬间新旧思路引起的认知冲突.相对而言,后一解释似乎更合理.遗憾的是,Qiu等人<sup>[44,45]</sup>也无法给出确定结论.因为他们只检测到了顿悟的差异成分源自扣带前回,没有检测到不理解的差异成分也源自扣带前回.Qiu等人<sup>[21]</sup>和Wang等人<sup>[24]</sup>对被试主动思考成功解决问题情况下的顿悟过程进行了研究.他们发现成功解决的字谜较之未成功解决的字谜在刺激呈现后1500~2000和2000~2500 ms分别诱发了源于左扣带前回和扣带后回的差异负成分<sup>[21]</sup>.客观设定的顿悟难题相比常规难题的解决过程在刺激呈现后300~800 ms明显诱发了源自右扣带前回的差异负波<sup>[24]</sup>.基于上述观察,他们认为左扣带前回主要负责思维定势的打破以及新颖联想的形成<sup>[21]</sup>,而右扣带前回则是认知控制的指标,主要参与认知冲突的检测与监控<sup>[24]</sup>.

综上,现有研究借助不同的顿悟任务对顿悟过程进行了相当多的研究.虽然各学者对顿悟的界定完全相同,各研究所用技术有所差异,分析策略也有不同,但这些研究普遍显示,扣带回在顿悟问题解决过程中起重要作用.当前研究结果虽然与清楚准确地阐明扣带回各区域具体作用的目标仍有一定差距,但是现有资料能够较准确地阐明左右脑的扣带回,尤其是扣带前回在顿悟难题解决过程中的认知功能.其中,左扣带前回主要参与顿悟难题解决过程中任务目标的导向与监管以及思维僵局的早期预警.右扣带前回则主要参与新旧思路引起的认知冲突的检测与消解.左右脑的扣带后回的作用在不同顿悟任务中有一定差异.多数研究显示,右侧扣带后回可能与被试对问题理解过程进行的操作的评估有关,左侧扣带后回可能协助右侧扣带后回的评估,以及协助认知系统完成多重反应的选择和最终决定.少数研究指出,扣带后回在顿悟过程中的认知功能可能与相应扣带前回的认知加工相似,起着类似作用,但该观点仍有待进一步验证.

### 3 海马、颞上回和梭状回

海马与颞上回是顿悟中经常观察到的典型激活区.目前诸多研究都观察到包括海马(hippocampus)和海马旁回(parahippocampus)在内的内侧颞叶以及颞上回等颞区在顿悟难题的解决过程产生了显著激活.考虑到海马和颞上回的重要地位——国际上最早

的有关顿悟脑机制的两篇研究报告分别探讨的是海马和颞上回在顿悟中的作用<sup>[10,11]</sup>。因此,本文着重就海马和颞上回来阐述颞叶在顿悟问题解决过程中的价值。

海马是大脑边缘系统的重要组成部分。在解剖上,其主要分布在大脑的颞叶内侧。在功能上,它主要负责人类的记忆和空间定位。此外,海马还具有其他功能。总之,作为一个具有重要功能但结构相对简单且与其他大脑区域的联系比较明确的神经结构,海马的结构在许多不同物种中均可以被很好地界定。这也正是该结构被学者广泛研究(突出表现为有一本专门以 *Hippocampus* 为名的杂志)的原因之一。目前,有关海马的研究总体上是从动物实验和人类实验两个取向展开。动物实验主要是研究海马损伤对动物找路行为的影响或考察海马中的神经元在动物找路行为中的活动状况。人类实验则主要探讨海马与情节记忆或陈述记忆的关系<sup>[2]</sup>。Redish<sup>[46]</sup>认为,上述跨种属对象的研究结果实际说明海马在动物和人类活动中的功能本质上是一致的,均在于不断地校正自我导向行为中所产生的错误,回忆情景以及填补情景上的空缺<sup>[2,10]</sup>。这最典型地体现动物的重新定向行为。研究表明,在有明显清晰可辨的路径标记时,即使是海马损伤的动物,也有可能从迷失的道路上找回。但当缺乏明显的外在标志时,海马损伤的动物就难以找回原路。在后一情况下,动物只有将自己的动作与某些外在信息有效整合起来,才能成功实现自我导向<sup>[2]</sup>。如前所述,顿悟最主要特征之一就是思维的重新定向或表征转换。因此,从上述活动所涉及的神经机制和功能意义方面而言,海马就可能参与了顿悟。该推论现已被许多有关顿悟的脑成像研究和 ERPs 研究所证实。

Luo 和 Niki<sup>[10]</sup>开展了首项有关顿悟大脑机制的研究。他们利用核磁共振设备精确记录了7名大学生被试在顿悟性地解决谜语时的整个大脑的活动状况。结果显示,较之静息状态,人脑在产生顿悟的一瞬间会显著激活以右侧海马为主的广泛区域。先前有关人类海马损伤的神经心理学研究(如 HM 患者)以及正常人的脑成像研究显示,海马会被新异刺激所激活。但顿悟脑机制研究中所涉及的刺激词或汉字均是日常生活中熟知和极常见的“蚊子”这类词汇<sup>[2]</sup>。这意味着,海马的激活并非刺激自身的新颖性所致。因此,海马激活只能是谜面与谜底间的新颖联系引起的。

该推论得到随后脑成像研究与电生理研究的支持。Jung-Beeman 等人<sup>[11]</sup>采用以联结说为理论依据的 CRA 任务考察了人类被试在形成远距离联想的顿悟瞬间的大脑机制。研究发现,被试在顿悟的刹那激活了双侧海马旁回附近的区域,只是激活不显著。更有力的证据来自 Darsaud 等人<sup>[25]</sup>的研究。他们采用脑成像技术扫描了被试在反复尝试和练习中以顿悟方式发现规则前后的脑活动状况。研究显示,未解决问题的被试较之成功解决问题的被试显著激活了左侧海马,但解决者海马与海马旁回的联结度显著强于未解决者。这些表明,左侧海马在规则发现的过程中有显著激活。然而,该研究同时显示发现规则和实现顿悟后该区域的激活逐渐减弱,只是此时海马与周围区域的联结度显著增强。这意味着,海马表征顿悟过程中的新颖联系形成的功能可能并不是它独自的激活所能实现和完成的,而是通过增强与周围神经结构的相互交流和联结来实现的。这充分揭示了为何有的研究激活的是海马<sup>[10]</sup>,另一些研究激活的却是海马旁回<sup>[22,24]</sup>,甚至是邻近海马与海马旁回的其他颞区(如颞上回<sup>[11,15]</sup>和颞顶联合区<sup>[21,25,29]</sup>)的缘故。

颞上回(superior temporal gyrus, STG)是参与顿悟的另一重要颞区<sup>[11,27,45,47,48]</sup>,其主要位于颞叶外侧上方。Jung-Beeman 等人<sup>[11]</sup>最先对颞上回在顿悟中的作用进行了探讨。他们对人们在解决 CRA 任务过程中顿悟一瞬间的脑活动状况进行了观察,发现被试主观评定的顿悟问题较之非顿悟问题的解决过程更多激活了右侧颞上回前部,且事件相关频谱分析显示该区的激活主要锁定在顿悟前的 0.3 s 左右。先前有关言语理解的研究显示,颞上回在远距离语义整合中有重要作用。据此,研究者认为颞上回激活可能表征顿悟问题解决中新颖远距离语义联想的形成。Luo 等人<sup>[10,15,16,29]</sup>在字谜任务和汉字组块破解任务开展的顿悟研究中也检测到了右侧颞上回或其附近区域的激活。他们观察到不同解题规则的顿悟问题的解决过程较之静息状态显著激活了右侧颞上回(BA 38),但同种解题规则的常规任务的解决过程较之静息状态并未出现颞上回或其附近脑区的激活<sup>[29]</sup>。随后在有关汉字组块破解任务的顿悟脑机制研究中发现,松散结构问题较紧密结构问题的解决过程显著激活了右颞上回(BA 22)。不过,该区域在两类任务中均负激活(negatively activated)。右侧颞上回在松散结构和紧密结构两类问题的解决过程中均为负

激活,只是在解决松散结构问题时,其右侧颞上回的激活更负.就汉字组块破解任务而言,紧密结构问题解决被视为顿悟问题解决过程,而松散结构问题解决则被视为常规问题解决过程<sup>[16]</sup>.由此推知,常规问题解决引起右侧颞上回的激活更负,顿悟问题解决导致该区的负激活相对较弱.该结果从侧面验证了 Jung-Beeman 等人<sup>[11]</sup>的结论,即紧密结构问题的解决需要更为新颖和远距离的联想加工.因此,与远距离联想过程或新颖联想形成有关脑区的(正)激活更明显.针对颞上回为何负激活,可能有多方面原因.主要原因可能与解题过程是否得到外界提示的帮助有关.提示在一定程度上使得人们无需主动去构建远距离联想,而只需体会和领悟远距离联想.该解释得到了 Qiu 等人<sup>[20]</sup>的支持.他们发现,被试解决“多对多”字谜原型启发任务中原型字谜时,较之靶字谜的解决更多激活了双侧颞上回,但靶字谜较之原型字谜的解决并未显著激活该区域.然而,就原型启发任务而言,原型字谜主要依靠被试主动解决,而靶字谜则需要被试借助先前在原型字谜解决过程中获得的启发式来解决.较之前者,后者的主动性程度明显降低,且由于原型字谜与靶字谜性质相似——两者要么都是凭借远距离联想解决问题,要么都是借助常规思维解决问题.因此,右侧颞上回激活主要与人们主动构建和形成新颖和远距离联想有关.

颞叶在顿悟中的作用除了通过海马以及颞上回来展示外,还与梭状回(fusiform gyrus)<sup>[19,20,49]</sup>,颞极(temporal pole)<sup>[18]</sup>以及由颞上沟(superior temporal sulcus, STS)与下顶叶(inferior parietal lobe, IPL)组成的颞顶联结区(temporoparietal junction, TPJ)<sup>[25,47,50]</sup>有关.从解剖结构上看,海马回是侧副裂与海马裂之间的区域,海马旁回则是围绕海马裂前端的钩状部分,梭状回临近海马和海马旁回,介于颞下沟和侧副裂间的区域.这些表明,梭状回与海马和海马旁回具有解剖上的邻近性,彼此之间有着较丰富的信息沟通和神经联系.目前许多研究发现不同类型的顿悟任务均激活了梭状回<sup>[19,20,49]</sup>. Qiu 等人<sup>[20,49]</sup>先后借助脑成像和事件相关电位技术对原型启发字谜任务和单个汉字重排任务中顿悟过程的脑机制进行了探讨.研究发现,原型启发任务中的启发问题较之原型问题的解决更多激活了左侧梭状回,而原型问题的解决并未出现该区域的显著激活.单个汉字组块重排任务中也显著激活了该区域.但是,先前 Aziz-Zadeh

等人<sup>[18]</sup>有关英文单词组块重排任务的研究却未观察到梭状回的激活.就此,研究认为左侧梭状回可能主要参与思维定势的打破和汉字组块的重构<sup>[49]</sup>.然而,研究者在分析大量相关研究的基础上指出梭状回可能是作为海马和颞上回的候选区参与远距离联想形成的.该观点至少得到了以下3方面数据的支持.首先,梭状回是重要的视觉词形区<sup>[51]</sup>.考虑到 Zhang 等人<sup>[49]</sup>以及 Qiu 等人<sup>[20]</sup>均会一定程度上涉及视觉词形的处理,该区域的激活可能主要参与了词形的视觉加工.然而,先前 Aziz-Zadeh 等人<sup>[18]</sup>采用同一范式所开展的脑成像研究以及其他类似电生理研究<sup>[49,52]</sup>都没有检测到该区的激活.虽然汉字形声字更注重表征形旁和声旁汉字拼凑的观点可在一定程度上解释梭状回激活的结果,但是, Luo 等人<sup>[16]</sup>以汉字组块破解任务开展的脑成像研究也未检测到该区域的激活,这对梭状回负责汉字拼凑的解释提出了质疑;其次,梭状回虽是负责面孔识别的重要区域<sup>[53,54]</sup>,但它还参与心理理论以及意图识别<sup>[55-58]</sup>.在此基础上,笔者认为梭状回可能与颞上回在心理理论中的作用类似<sup>[55,59]</sup>,主要负责依据社会线索来对行为主体的意图进行甄别和理解.不同的是,颞上回主要从听觉和语音刺激中挖掘相应线索来实现甄别和理解,而梭状回则主要从面孔和其他视觉刺激(如图片)中挖掘线索来予以判断.无疑,线索筛选和意图理解过程涉及大量信息的整合和彼此的联结.何况还有研究显示,难题顿悟的瞬间可能主要是以视觉形式进行加工<sup>[2]</sup>.因此,梭状回可能参与了新颖和远距离联想的形成;最后,如前所述,海马等区域负责新颖以及远距离联想的形成可能并不是单独起作用的,而是通过与周围其他结构的相互联系和神经交流实现的,而梭状回作为临近海马附近的一个重要区域,其自然有可能参与这种加工过程.因此,颞叶区域以及其他颞叶区域(尤其是颞顶联合区)可能共同构成了新颖联系和远距离联想形成的神经网络.

综上,现有研究不同程度地观察到海马、颞上回和梭状回在顿悟发生一瞬间的优势激活.先前有关创造性思维的研究显示,颞叶是人们产生创造力和创造性表达的重要神经基础.例如,有关创造力的三因素解剖模型(three-factors anatomical model)就认为颞叶主要负责新颖性的形成及其品质的增强<sup>[14,60,61]</sup>.于是研究就这些颞区在顿悟中的作用进行了颇为细致的梳理.相当多的研究显示,海马、颞上回和梭状

回均在一定程度上表征和参与了新颖联系和远距离联想的形成。因此,研究认为,海马、颞上回和梭状回在总体上构建了一个负责顿悟过程中新颖联系和远距离联想形成的神经网络。海马、颞上回和梭状回作为网络中的3个重要节点,它们各自负责一类基本形式的新颖联系和远距离联想的接通和建构。其中,海马主要负责基于以往记忆经验和知识为要素的新颖联想的形成;颞上回主要负责以听觉形式或语义有关的远距离联想与联系的形成;梭状回则主要负责基于视觉意象的新颖想象和远距离联想的形成。它们构建了“三维一体”的新颖性和远距离联想加工的神经网络,3个重要脑区分别负责一种基本形式的新颖联想或语义联系的形成,但各自又可以通过彼此间丰富的神经联结与交流相互参与其他形式的新颖联系和远距离联想的形成与建构。更重要的是,它们还通过彼此之间的复杂的神经交流和突触联系创建更加复杂和丰富的新颖想象与远距离联想。

#### 4 楔前叶与楔叶

楔前叶(precunes)和楔叶(cuneus)是参与顿悟的重要脑区。Luo等人<sup>[29]</sup>考察了参与不同谜语问题破解过程的大脑机制。研究发现,当谜题解决涉及不同规则时,人们解决谜题更多激活了左侧楔前叶和扣带回;当谜题解决涉及相同规则时,被试虽然事先对所涉及的规则内容一无所知,但这类谜题却只激活了左侧楔前叶,不过两种条件下楔前叶的激活水平无明显差异。有关被试解决脑筋急转弯难题和常规百科知识难题的脑成像研究<sup>[2]</sup>显示,被试观看脑筋急转弯难题的答案相比观看百科知识难题的答案显著激活了左侧楔前叶。观看百科知识难题答案过程较之观看脑筋急转弯难题答案过程显著激活了双侧楔前叶。借助脑成像技术对被试解决原型启发字谜过程进行观测<sup>[20]</sup>,发现被试主动解决启发字谜较之解决原型字谜的过程显著激活了左楔前叶。然而,Luo和Niki<sup>[10]</sup>的另一研究似乎并不支持该结果。他们发现,当向被试呈现问题答案时,需要进行思维转换的脑筋急转弯问题答案的加工过程显著激活了右侧楔前叶,而非左侧楔前叶。Luo等人<sup>[16]</sup>借助组块破解任务进一步考察了楔叶和楔前叶在顿悟问题解决过程中的作用。他们发现在组块破解过程中,呈现提示的紧密结构难题的组块破解过程较之无提示的松散结构难题的破解过程均显著负激活了右楔叶。紧密结构

难题较之松散结构难题的组块破解过程还独特地负激活了左楔叶和右楔叶。针对此,罗劲<sup>[2]</sup>提出了一个颇具建构性的解释框架。他认为楔前叶在顿悟问题解决中的作用与其在常规问题解决中的作用十分类似,主要负责与双侧后部颞中回和枕中回等区域形成一个“视觉空间信息的加工网络”。该观点得到了相当多证据的支持,主要来自以下3方面:第一,先前研究普遍发现楔前叶(含部分楔叶区)主要参与工作记忆或情景记忆的提取,与空间意象的提取和加工过程尤为密切<sup>[62-65]</sup>;第二,人类历史上许多伟大发明或发现的提出往往是非言语性的。例如,爱因斯坦的“那些思想不是以语言的形式来临的,我极少用语言来思考,一旦思想来临,我事后也许回想到要用语言来表达它”;第三,传统认知心理学行为实验中口语报告或知道感判断研究的相关证据<sup>[2]</sup>。研究显示,知道感尽管可以预测常规推理问题的解决,但不能预测顿悟问题的解决。实验室条件下的观测也显示,在顿悟来临之前,人们多会有短暂的沉默<sup>[2]</sup>。这些提示顿悟的一瞬间可能是以视觉方式而非听觉形式发生的。

Darsaud等人<sup>[25]</sup>借助NRT任务探讨了规则发现过程的脑机制。研究发现,当根据规则出现的时刻点将解题过程分成前后两个阶段时,规则出现后的解题过程(被试不一定成功发现了规则和准确应用了规则)较之解答过程更多激活了双侧楔叶。同时,他们还发现被试顿悟后——成功发现隐含规则并准确运用规则过程,较之顿悟前解答过程显著激活了右侧楔前叶。该结果与Oishi等人<sup>[66]</sup>的研究结果比较相似。Oishi等人<sup>[66]</sup>借助系列反应时任务(serial reaction time tasks, SRTTs)探讨了反应时骤降现象的大脑机制。实验要求被试完成两种任务,控制任务是要求被试在看到随机呈现的视觉刺激时尽可能快地按键;实验任务则是要求被试完成一个由6项目构成的重复刺激系列的按键反应。结果发现,系列任务中被试反应时较之控制任务有显著的下降。激活脑区的相减分析显示,被试反应时骤降与双侧楔前叶的激活有着显著关系。重要的是,按任务绩效将被试分成高低任务绩效组并进行相应的区组分析。结果显示,高绩效组显著激活了双侧楔前叶,而低绩效组并未观察到楔前叶的激活。研究结果同时揭示,有且仅有楔前叶的激活程度与反应时的变化有显著相关,这表明双侧楔前叶的激活在被试依据情景缓冲器记忆来对自己的手指运动的皮下控制过程中具有重要作用<sup>[66,67]</sup>。

上述 Darsaud 等人<sup>[25]</sup>研究就是以内隐规则出现刹那被试完成随后数字填充反应时的急剧下降来判定规则发现的. 上述研究表明, 尽管楔前叶有可能参与了数字递减任务顿悟前后“镜像规则”(mirror rule)的视觉意象的发现和运用, 即参与数字递减任务顿悟过程中的视觉空间信息的加工和加工网络的构建, 但它也有可能是表征行为反应时的骤然下降以及相关手指运动过程的皮下控制.

上述关于楔前叶或者楔叶的两种解释与该结构的解剖部位有着明显的关联性. 楔前叶作为临近顶叶以及小脑的重要区域, 其神经效用与这种解剖关联和神经交流有着密切关系. 当其激活部分主要与顶叶沟通时, 由于顶叶该部分区域主要参与视觉空间信息加工和工作记忆提取(如左侧顶下小叶), 那么楔前叶的这部分区域很可能会参与视觉空间加工网络构建. 当然, 楔叶和楔前叶也不是独自起作用的, 而是与许多研究所检测到的其他视觉相关的区域, 如枕下回和枕中回等<sup>[2,20,47,68]</sup>共同起作用; 当激活的楔前叶部分主要与小脑进行神经交流时, 由于小脑主要负责运动功能及其平衡, 于是紧邻小脑的这部分楔前区很可能会协助小脑进行运动控制, 辅助完成运动功能的皮下控制. 因此, 上述研究结果表明, 尽管目前研究检测到楔前叶参与顿悟问题解决, 但其在顿悟问题解决过程中的具体作用有待进一步探讨. 已有研究提示, 今后应尝试将楔前叶适当分区, 以便准确地探讨其不同位置(如临近小脑或同顶叶神经交流的区域)在顿悟问题解决中的作用.

## 5 脑岛与小脑

脑岛(insula)是大脑皮层的一部分, 主要是指大脑的岛叶. 尽管它与额叶、颞叶和顶叶有着密切的神经联系, 但由于它主要位于大脑内侧, 从外侧面很难被观察到, 以及其与大脑皮层有着相对明显的界限, 因此, 脑岛又被称为岛脑. 先前研究表明脑岛是厌恶加工的特异性区域<sup>[69,70]</sup>. 但情绪的脑成像研究的元分析(meta-analysis)显示, 脑岛不仅与厌恶有关, 而且与害怕这类威胁关联的情绪加工也有关<sup>[71,72]</sup>. Wager 和 Feeldman<sup>[73]</sup>对脑岛结构细分后深入探讨了其具体作用. 他们发现, 脑岛不仅与情感体验有关, 而且与注意转移和工作记忆也有关. 针对脑岛在顿悟中的作用可能与顿悟体验以及认知与情绪的交互过程有关.

Luo 等人<sup>[15]</sup>在猜谜任务的研究中发现, 顿悟任

务较之非顿悟任务显著激活了左侧脑岛且非顿悟任务较之顿悟任务未激活该区域, 这似乎表明左侧脑岛是顿悟难题解决过程特异的. Darsaud 等人<sup>[25]</sup>借助 NRT 任务对规则发现瞬间的脑机制进行研究, 发现规则发现者较之未发现者显著激活了左侧脑岛前部. 对规则起作用前后的解题进程进行实时分析, 发现规则起作用后较之起作用前更多激活了双侧脑岛后部. Wager 和 Feeldman<sup>[73]</sup>揭示, 脑岛前部主要负责注意转移和工作记忆, 临近中央前回的脑岛前上部主要负责情绪体验, 后部脑区则主要参与体感信号加工. 这表明脑岛可能参与顿悟问题解决后的啊哈体验过程. 然而, Aziz-Zadeh 等人<sup>[18]</sup>借助传统认知心理学有关顿悟问题解决的“预热感”(feeling of warmth)研究质疑了上述推论. 早期研究显示, 被试在解决常规问题时, 问题解决进程的“预热感”会发生变化, 且这种变化与答案获取有显著正相关. 然而, 被试却不能在顿悟问题解决过程中很好地监测到这种“预热感”的变化, 只有获得答案瞬间才会将整个解题进程累积的情绪体验以瞬间高强度的形式释放. 尽管这些证据尚不能完全否定上述解释, 但至少说明该解释不是无懈可击的. 考虑到脑成像技术的时间分辨率相对粗糙, 但为进一步阐明脑岛的作用, 他们将问题解决过程分了两个阶段来分析. 早期阶段从呈现刺激到其后的 2.5 s, 晚期阶段则是刺激呈现后的 3~5.5 s. 研究显示, 顿悟与常规的问题解决过程在脑机制上出现了一定程度的双分离——顿悟问题解决主要激活了右侧脑岛, 常规问题解决显著激活了左侧脑岛. 任务与静息态的比较显示, 顿悟任务较静息状态显著激活了两侧脑岛, 但与常规任务比较时左侧脑岛的激活不显著. 这说明, 顿悟问题解决过程能够通过双侧脑岛的激活表征, 常规问题解决过程可通过左脑岛的激活表征. 由于脑岛的激活主要集中在早期阶段, 于是研究者认为, 左侧脑岛负责系列加工, 右侧脑岛负责格式塔加工. 尽管各研究就脑岛认知功能的认识尚未达成一致, 但它们一致表明右侧脑岛是顿悟问题解决十分必要的脑区. 这在一定程度上支持顿悟表征创造性的观点, 同时表明创造性思维的右半球优势理论适用于顿悟问题解决<sup>[52]</sup>. Luo 等人<sup>[16]</sup>在汉字组块破解任务诱发的顿悟中也检测到松散结构较紧密结构显著激活了右侧脑岛, 但它在两类问题解决过程中却均为负激活. 因此, 上述结果意味着右侧脑岛在松散结构问题解决中更明显. 针

对脑岛在松散结构问题中的负激活, 研究认为可能与问题解决过程中思维的主动性有关. 因为松散结构问题主要是凭借被试自己的主动思维来获得解决的, 而紧密结构问题则主要是依靠在后期呈现的提示帮助下获得解决的. 综上, 考虑到脑岛与其他大脑皮层有着丰富的联系, 且与海马和颞上回等区域十分临近, 我们认为脑岛在顿悟问题解决中的作用可能与主动的发散思考和认知灵活性有关. 当问题是凭借被试自己主动思考获得解决时, 右脑岛的(负)激活显著增强. 当问题需凭借发散思维获得解决时, 右脑岛的激活显著增强. 脑岛可能参与顿悟体验加工<sup>[74]</sup>, 但这需进一步探讨.

小脑(cerebellum)是参与顿悟的重要脑区. 它位于大脑后方, 覆盖在脑桥及延髓之上, 横跨在中脑和延髓之间. 它与大脑、脑干和脊髓有丰富的传入和传出联系, 参与躯体平衡和肌肉张力的调节, 以及随意运动的协调. 许多研究发现小脑也会在不同顿悟难题解决中激活. Goel 和 Vartanian<sup>[7]</sup>借助传统的火柴棒难题考察了数学问题顿悟刹那的脑活动状况. 他们发现, 顿悟问题显著激活了小脑, 且小脑激活与火柴棒难题解决方案数目有着显著的关联. 由于解决方案的产生往往以按键反应为行为标记, 故小脑激活可能与其对手指运动的皮下控制有关. Tian 等人<sup>[75]</sup>和 Qiu 等人<sup>[20]</sup>分别借助功能磁共振成像技术考察了原型启发字谜问题解决过程中心理准备与顿悟过程的脑机制. 研究发现, 启发问题的解决过程较之原型问题的解决过程显著激活了小脑, 这意味着小脑的激活并非顿悟过程特异的, 因为它在问题解决的不同过程均有激活. 于是研究者认为小脑可能与启发问题解决过程中原型字谜的记忆存储和提取有关<sup>[20,75]</sup>. 然而, 研究显示该范式过程中原型字谜的学习阶段被试并不需要进行按键反应, 只是观看呈现的字谜及其答案或者观看并解答字谜, 相反在测试阶段被试需要试图自己想出答案并通过按键反应来表示外显报告. 考虑到功能磁共振成像技术的时间分辨率不够高. 因此, 研究认为小脑与顿悟问题解决后的反应过程有关, 主要参与手指运动的皮下控制.

## 6 总结与展望

有关顿悟的行为研究揭示, 高级的问题解决行为是基于一种对于问题情境的全新的思考和把握, 是一个“突变”过程, 而非“渐变”过程. 认知神经科学

研究表明, 顿悟是人类大脑的功能. 顿悟如此复杂, 不仅在信息加工过程中无法被元认知预测到, 而且以全或无的方式在没有任何言语思考的沉默中突然产生. 这意味着, 顿悟并非人脑单一脑区所能控制的, 它不仅是在许多专司各种认知功能脑区的协同下运行的, 而且需要各脑区紧密的相互交流和沟通. 这些彼此紧密联系的脑区共同形成了脑功能网络. 功能网络的重要区域对应结构网络的重要区域<sup>[61,76]</sup>. 顿悟的脑功能网络最直接的结构基础就是顿悟脑. 顿悟脑虽不是解剖上独立的结构实体, 但其是人脑内参与顿悟活动的各脑区相互交流后形成的神经网络. 在结构上, 顿悟脑包括外侧前额叶、扣带回、海马、颞上回、梭状回、楔前叶、楔叶、脑岛和小脑以及顶叶部分区域. 在功能上, 外侧前额叶主要负责顿悟难题所包含的思维定势的打破和转移以及任务难度的控制. 扣带回则主要负责顿悟过程中思维僵局的早期预警以及新旧思路的认知冲突, 扣带回则主要负责顿悟过程中任务目标与解题进程的监管和候选答案的抉择; 海马、颞上回和梭状回构成了一个“三维一体”(分别基于记忆、语义和视觉意象)的新颖联系和远距离联想加工的神经网络, 主要负责顿悟所必须的新颖联系和远距离联想的接通和形成; 楔前叶和楔叶及其邻近的顶枕叶脑区共同组成了专司顿悟问题表征重组所依赖的“非言语的”视觉空间神经网络; 脑岛主要表征顿悟难题解决所需的认知灵活性以及难题解决后释放的情绪体验加工; 小脑形成了顿悟难题解决所需的动作和运动有关的皮下控制系统, 控制着各种动作反应与手指运动. 总之, 顿悟脑是一个复杂的结构与功能系统, 是由众多功能相关但结构各异的神经功能区形成的人脑功能网络或连接组.

顿悟脑的研究是 21 世纪初兴起的一个新方向, 虽然只有近 10 年(2003~2012)的历史, 仍处于研究的起步阶段, 但该领域却诞生了许多颇具创新性的成果. 当然, 在这些创新性成果的基础上, 仍有一些需要拓展和改进的地方. 首先, 不同实验和研究任务之间所观察到的顿悟任务相关的激活区域存在一定差异. 这可能一方面与实验任务有关, 另一方面与各研究所设置的具体的参照任务有关. 因此, 未来研究要进一步完善实验范式和实验任务, 对不同顿悟任务的脑神经基础进行比较和整合, 并力图发展和设计出更符合减法实验设计特点的参照任务. 其次, 研究

需要加强对形成顿悟脑的各个神经功能区认知功能的探讨,进一步借助人脑连接组(human connectome)的图论思想和结构方程建模(structural equation modeling, SEM)、动态因果模型(dynamic causal modeling, DCM)和因果关系分析(granger causality)等有向连接技术来探讨各功能区之间的神经网络联结方式及其强度,以便在此基础上建立有关顿悟脑的神经网络图谱和相应的“小世界”(small-world)网络<sup>[77]</sup>;第三,未来需要加强顿悟脑与认知脑和情绪脑关系的研究.因为就顿悟而言,其不仅包括认知顿悟(cognitive insight),而且包括情感顿悟(affective insight).这就意味着顿悟脑会不同程度地涉及认知脑和情绪脑的相关功能区,甚至与认知脑和情绪脑之间有着相当丰富的神经沟通和交流.为了更清楚地阐明顿悟的本质和神经基础,未来研究有必要对此作更深入的探讨.同时,还可在此基础上进一步探讨顿悟与情绪的交互过程,考察情感和情绪对顿悟问题解决的促进作用<sup>[78,79]</sup>.最后,人们研究顿悟大脑机制的更为一般的目的是探讨创造性思维的本质.进入知识经济时代以后,创造性思维变得非常重要.顿悟是创造性思维的一个重要的心理基础,对顿悟的研究可以澄清目前创造性思维理论中许多含糊不清的基本问题<sup>[2]</sup>.目前有关创造性思维最典型的两个模型分别是

华莱斯的四阶段模型和 Finke 的生成探索模型.四阶段模型认为,创造性思维有准备期、酝酿期、豁朗期和验证期四个阶段;生成探索模型则认为创造性思维有生成和探索两个阶段.这些理论模型所含各阶段的神经机制目前尚未通过创造性思维任务进行研究,然而借助顿悟脑机制的研究范式和实验任务使得这些问题得以阐明<sup>[80,81]</sup>.有关创造性思维的脑过程的设想还涉及左右半球功能区分,目前研究认为左侧大脑参与常规性思维,右侧大脑则参与创造性思维.然而目前有关各顿悟任务的研究结论并不完全支持上述观点,部分研究支持顿悟的右半球优势理论<sup>[52]</sup>,多数研究却支持顿悟的左半球优势理论<sup>[82]</sup>.虽然研究通过系统总结和评述发现,顿悟问题相对需要左右半球的同时参与,但是研究也观察到就左半球而言,右半球是顿悟问题所必需和独特激活的.因此,针对创造性思维的右半球优势理论或者其他理论(如神经效能理论和大脑两半球相互作用理论<sup>[14]</sup>)仍需要进一步借助更加成熟的顿悟研究范式和实验任务来进行检验.总之,顿悟脑研究不仅是解决创造性思维相关理论问题的重要途径,而且是促进人类科技发明和推动人类社会进步的重要力量,不断完善顿悟研究范式和不断创新研究设计将会在不久的将来就能揭开顿悟的神秘面纱.

## 参考文献

- 1 Kohler W. The Mentality of Apes. London: Routledge & Kegan Paul, 1925
- 2 罗劲. 顿悟的大脑机制. 心理学报, 2004, 36: 219-234
- 3 Miller E K, Cohen J D. An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annu Rev Neurosci*, 2001, 24: 167-202
- 4 Tanji J, Hoshi E. Role of the lateral prefrontal cortex in executive behavioral control. *Physiol Rev*, 2008, 88: 37-57
- 5 Shimamura A P. A neurocognitive approach to metacognitive monitoring and control. In: Dunlosky J, Bjork R A, eds. *Handbook of Memory and Metacognition*. New York: Psychology Press, 2008. 373-390
- 6 Naghavi H R, Nyberg L. Common fronto-parietal activity in attention, memory, and consciousness: Shared demands on integration? *Conscious Cogn*, 2005, 14: 390-425
- 7 Goel V, Vartanian O. Disassociating the roles of right ventral lateral and dorsal lateral prefrontal cortex in generation and maintenance of hypotheses in set-shift problems. *Cereb Cortex*, 2005, 15: 1170-1177
- 8 Miller L A, Tippett L J. Effects of focal brain lesions on visual problem-solving. *Neuropsychologia*, 1996, 34: 387-398
- 9 Schneider F, Gur R E, Alavi A, et al. Cerebral blood flow changes in limbic regions induced by unsolvable anagram tasks. *Am J Psychiat*, 1996, 153: 206-212
- 10 Luo J, Niki K. Function of hippocampus in 'insight' of problem solving. *Hippocampus*, 2003, 13: 316-323
- 11 Jung-Beeman M, Bowden E M, Haberman J, et al. Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biol*, 2004, 2: E97
- 12 Gilbert S J, Zamenopoulos T, Alexiou K, et al. Involvement of right dorsolateral prefrontal cortex in ill-structured design cognition: An fMRI study. *Brain Res*, 2010, 1312: 79-88
- 13 Goel V, Grafman J. The role of the right prefrontal cortex in ill-structured problem solving. *Cogn Neuropsychol*, 2000, 17: 415-436

- 14 沈汪兵, 刘昌, 王永娟. 艺术创造力的脑神经生理基础. *心理科学进展*, 2010, 18: 1520–1528
- 15 Luo J, Niki K, Philips S. Neural correlates of the ‘Aha! reaction’. *Neuroreport*, 2004, 12: 2013–2017
- 16 Luo J, Niki K, Knoblich G. Perceptual contributions to problem solving: Chunk decomposition of Chinese characters. *Brain Res Bull*, 2006, 70: 430–443
- 17 唐晓晨, 庞娇艳, 罗劲. 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*, 2009, 54: 3464–3474
- 18 Aziz-Zadeh L, Kaplan J T, Iacoboni M. “Aha!” The neural correlates of verbal insight solutions. *Hum Brain Mapp*, 2009, 30: 908–916
- 19 Anderson J R, Anderson J F, Ferris J L, et al. Lateral inferior prefrontal cortex and anterior cingulate cortex are engaged at different stages in the solution of insight problems. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 10799–10804
- 20 Qiu J, Li H, Jou J, et al. Neural correlates of the “Aha” experiences: Evidence from an fMRI study of insight problem solving. *Cortex*, 2010, 46: 397–403
- 21 Qiu J, Li H, Yang D, et al. The neural basis of insight problem solving: An event-related potential study. *Brain Cogn*, 2008, 68: 100–106
- 22 邱江, 张庆林. 字谜解决中的“啊哈”效应: 来自 ERP 研究的证据. *科学通报*, 2007, 52: 2625–2631
- 23 Wagner A D, Pare-Blagoev E J, Clark J, et al. Recovering meaning: Left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval. *Neuron*, 2001, 31: 329–338
- 24 Wang T, Zhang Q L, Li H, et al. The time course of Chinese riddles solving: Evidence from an ERP study. *Behav Brain Res*, 2009, 199: 278–282
- 25 Darsaud A, Wagner U, Baiteau E, et al. Neural precursors of delayed insight. *J Cogn Neurosci*, 2011, 23: 1900–1910
- 26 Lang S, Kanngieser N, Jaskowski P, et al. Precursors of insight in event-related brain potentials. *J Cogn Neurosci*, 2006, 18: 2152–2166
- 27 Sandkühler S, Bhattacharya J. Deconstructing insight: EEG correlates of insightful problem solving. *PLoS One*, 2008, 3: e1459
- 28 Sheth B R, Sandkühler S, Bhattacharya J. Posterior beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight. *J Cogn Neurosci*, 2008, 21: 1269–1279
- 29 Luo J, Niki K, Philips S. 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. *J Psychol Chin Soc*, 2004, 5: 195–213
- 30 Garavan H, Ross T J, Murphy K, et al. Dissociable executive functions in the dynamic control of behaviour: Inhibition, error detection and correction. *NeuroImage*, 2002, 17: 1820–1829
- 31 Kerns J G, Cohen J D, MacDonald A W III, et al. Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 2004, 303: 1023–1026
- 32 Phan K L, Taylor S F, Welsh R C, et al. Activation of the medial prefrontal cortex and extended amygdala by individual ratings of emotional arousal: A functional magnetic resonance imaging study. *Biol Psychiat*, 2003, 53: 211–215
- 33 Botvinick M M, Cohen J D, Carter C S. Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: An update. *Trends Cogn Sci*, 2004, 8: 539–546
- 34 Clark L, Cools R, Robbins T W. The neuropsychology of ventral prefrontal cortex: Decision making and reversal learning. *Brain Cogn*, 2004, 55: 41–53
- 35 Davis K D, Taylor K S, Hutchison W D, et al. Human anterior cingulate cortex neurons encode cognitive and emotional demands. *J Neurosci*, 2005, 25: 8402–8406
- 36 Wang C, Ulbert I, Schomer D L, et al. Responses of human anterior cingulate cortex microdomains to error detection, conflict monitoring, stimulus–response mapping, familiarity, and orienting. *J Neurosci*, 2005, 25: 604–613
- 37 Kowatari Y, Lee S, Yamamura H, et al. Neural networks involved in artistic creativity. *Hum Brain Mapp*, 2009, 30: 1678–1690
- 38 Knutson B, Taylor J, Kaufman M, et al. Distributed neural representation of expected value. *J Neurosci*, 2005, 25: 4806–4812
- 39 Shenhav A S, Greene J D. Moral judgments recruit domain-general valuation mechanisms to integrate representations of probability and magnitude. *Neuron*, 2010, 67: 667–677
- 40 Swick D, Turken A U. Dissociation between conflict detection and error monitoring in the human anterior cingulate cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 16354–16359
- 41 Egner T, Etkin A, Gale S, et al. Dissociable neural systems resolve conflict from emotional versus non-emotional distracters. *Cereb Cortex*, 2008, 18: 1475–1484
- 42 Mai X Q, Luo J, Wu J H, et al. “Aha!” effects in guessing riddle task: An ERP study. *Hum Brain Mapp*, 2004, 22: 261–270
- 43 买晓琴, 罗劲, 吴建辉, 等. 猜谜作业中顿悟的 ERP 效应. *心理学报*, 2005, 37: 19–25
- 44 邱江, 罗跃嘉, 吴真真, 等. 再探猜谜作业中“顿悟”的 ERP 效应. *心理学报*, 2006, 38: 507–514
- 45 Qiu J, Zhang Q L, Li H, et al. The ERP effects of cognitive conflict in a Chinese character-generation task. *Neuroreport*, 2007, 18: 881–886
- 46 Redish A D. The hippocampal debate: Are we asking the right questions? *Behav Brain Res*, 2001, 127: 81–98

- 47 Bechtereva N P, Korotkov A D, Pakhomov S V, et al. PET study of brain maintenance of verbal creative activity. *Int J Psychophysiol*, 2004, 53: 11–20
- 48 Kounios J, Frymiare J L, Bowden E M, et al. The prepared mind: Neural activity prior to problem presentation predicts solution by sudden insight. *Psychol Sci*, 2006, 17: 882–890
- 49 Zhang M, Tian F, Wu X, et al. Neural correlates of “Aha!” effects in solving Chinese verbal problems: An event related-potential study. *Brain Res Bull*, 2011, 84: 210–214
- 50 Starchenko M G, Bechtereva N P, Pakhomov S V, et al. Study of the brain organization of creative thinking. *Hum Physiol*, 2003, 29: 652–653
- 51 Cohen L, Dehaene S. Specialization within the ventral stream: The case for the visual word form area. *NeuroImage*, 2004, 22: 466–476
- 52 沈汪兵, 刘昌, 张小将, 等. 三字字谜顿悟的时间进程与半球效应: 一项 ERP 研究. *心理学报*, 2011, 43: 229–240
- 53 Dolan R J, Fink G R, Rolls E, et al. How the brain learns to see objects and faces in an impoverished context. *Nature*, 1997, 389: 596–599
- 54 McCarthy G, Puce A, Gore J C, et al. Face-specific processing in the human fusiform gyrus. *J Cogn Neurosci*, 1997, 9: 605–610
- 55 Schultz J, Imamizu H, Kawato M, et al. Activation of the human superior temporal gyrus during observation of goal attribution by intentional objects. *J Cogn Neurosci*, 2004, 16: 1695–1705
- 56 Barnea-Goraly N, Kwon H, Menon V, et al. White matter structure in autism: Preliminary evidence from diffusion tensor imaging. *Biol Psychiatry*, 2004, 55: 323–329
- 57 Saxe R, Kanwisher N. People thinking about thinking people: The role of the temporo-parietal junction in “theory of mind”. *NeuroImage*, 2003, 19: 1835–1842
- 58 Gobbini M I, Koralek A C, Bryan R E, et al. Two takes on the social brain: A comparison of theory of mind tasks. *J Cogn Neurosci*, 2007, 19: 1803–1814
- 59 Frith C D, Frith U. Interacting minds—A biological basis. *Science*, 1999, 286: 1692–1695
- 60 Flaherty A W. Frontotemporal and dopaminergic control of idea generation and creative drive. *J Comp Neurol*, 2005, 493: 147–153
- 61 沈汪兵, 刘昌, 陈晶晶. 创造力的脑结构与脑功能基础. *心理科学进展*, 2010, 18: 1420–1429
- 62 Krause C M, Åström T, Karrasch M, et al. Cortical activation related to auditory semantic matching of concrete vs. abstract words. *Clin Neurophysiol*, 1999, 110: 1371–1377
- 63 Korsnes M S, Wright A A, Gabrieli J D E. An fMRI analysis of object priming and workload in the precuneus complex. *Neuropsychologia*, 2008, 46: 1454–1462
- 64 Lundstrom B N, Peterson K M, Anderson J, et al. Isolating the retrieval of imagined pictures during episodic memory: Activation of the left precuneus and the left inferior frontal cortex. *NeuroImage*, 2003, 27: 1934–1943
- 65 Cavanna A E, Trimble M R. The precuneus: A review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain*, 2006, 129: 564–583
- 66 Oishi K, Toma K, Bagarinao E T, et al. Activation of the precuneus is related to reduced reaction time in serial reaction time tasks. *Neurosci Res*, 2005, 52: 37–45
- 67 Luo J, Niki K, Ding Z G, et al. Precuneus contributes to attentive control of finger movement. *Acta Pharmacol Sin*, 2004, 25: 637–643
- 68 吴齐元, 吴丽丽, 罗劲. What 和 Where: 视觉背腹侧通路在汉字组块破解过程中连接的变化. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40: 362–374
- 69 Jabbi M, Bastiaansen J, Keysers C. A common anterior insula representation of disgust observation, experience and imagination shows divergent functional connectivity pathways. *PLoS One*, 2008, 3: e2939
- 70 Murphy F C, Nimmo-Smith I, Lawrence A D. Functional neuroanatomy of emotions: A meta-analysis. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2003, 3: 207–233
- 71 Phan K L, Wager T, Taylor S F, et al. Functional neuroanatomy of emotion: A meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *NeuroImage*, 2002, 16: 331–348
- 72 Lane R D, Reiman E M, Ahern G L, et al. Neuroanatomical correlates of happiness, sadness, and disgust. *Am J Psychiat*, 1997, 154: 926–933
- 73 Wager T D, Feldman B L. From affect to control: Functional specialization of the insula in motivation and regulation. Published online at *PsycExtra* (<http://www.columbia.edu/cu/psychology/tor/>), 2004
- 74 McCrea S M. Intuition, insight and the right hemisphere: Emergence of higher sociocognitive functions. *Psychol Res Behav Manag*, 2010, 3: 1–39
- 75 Tian F, Tu S, Lv J Y, et al. Neural correlates of mental preparation for successful insight problem solving. *Behav Brain Res*, 2011, 216: 626–630
- 76 梁夏, 王金辉, 贺永. 人脑连接组研究: 脑结构网络和脑功能网络. *科学通报*, 2010, 55: 1565–1583
- 77 Schilling M A. A “small-world” network model of cognitive insight. *Creativity Res J*, 2005, 17: 131–154

- 78 Subramaniam K, Kounios J, Parrish T B, et al. A brain mechanism for facilitation of insight by positive affect. *J Cogn Neurosci*, 2009, 21: 415–432
- 79 Sakaki M, Niki K. Effects of the brief viewing of emotional stimuli on understanding of insight solutions. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2011, 11: 526–540
- 80 Wu L, Knoblich G, Luo J. The role chunk tightness and chunk familiarity in problem solving: Evidence from ERPs and fMRI. *Hum Brain Mapp*, 2012, doi:10.1002/hbm.21501
- 81 Ludmer R, Dudai Y, Rubin D. Uncovering camouflage: Amygdala activation predicts long-term memory of induced perceptual insight. *Neuron*, 2011, 69: 1002–1014
- 82 Dietrich A, Kanso R. A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psych Bull*, 2010, 136: 822–848

## One decade for insightful brain: New advances on neural correlates of insight

SHEN WangBing<sup>1</sup>, LUO Jing<sup>2,3</sup>, LIU Chang<sup>1</sup> & YUAN Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Cognitive Neuroscience and Department of Psychology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Cognition and Learning, Capital Normal University, Beijing 100083, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Mental Health, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

The first neuroimaging study measuring real-time brain activity during insight problem solving was conducted almost ten years ago. Subsequently, a large number of studies have used high-resolution event-related potentials (ERPs) and event-related functional magnetic resonance imaging (fMRI) to investigate the temporal dynamics and neural correlates of insight. Recent findings regarding the neural underpinnings of insight have led researchers to propose a neural framework referred to as the “insightful brain”. This putative framework represents the neural basis underlying the cognitive and affective processes involved in insight. The insightful brain is thought to involve many distributed brain regions, including the lateral prefrontal brain, cingulate cortex, hippocampus, superior temporal gyrus, fusiform gyrus, precuneus, cuneus, insula and cerebellum. Functional studies have reported that the lateral prefrontal cortex is responsible for mental set shifting and breaking in insight problem solving, the cingulate cortex is involved in cognitive conflict between new and old ideas as well as progress monitoring, and the hippocampus, superior temporal gyrus and fusiform gyrus form an integrated functional network specializing in the formation of novel and affective associations. In addition, affective transformation of problem representations has been found to depend on a non-verbal visual-spatial information-processing network comprised of the precuneus and cuneus. The insula has been found to reflect cognitive flexibility and emotional experience associated with insight, and the cortical control of finger movements was found to rely on the cerebellum.

**insight problem solving, insightful brain, creative thinking, neuroimaging, event-related potentials**

doi: 10.1360/972012-263