

创造性思维的脑机制*

刘春雷 王 敏 张庆林

(西南大学心理学院, 重庆 400715)

摘 要 创造性思维是创造性的核心。近年来, 脑电和脑成像技术的发展为研究创造性思维的神经基础提供了有力的技术支持, 对创造性思维的脑机制研究取得了较大进展。创造性思维的脑机制研究主要包括顿悟的脑机制、发散性思维的脑机制、远距离联想的脑机制、言语创造性和图画创造性的对比的脑机制研究。研究结果显示创造性思维需要多个脑区的参与, 因不同的认知任务其关键脑区而有所不同。对创造性思维的脑机制研究进行了总结, 对这些研究可能存在创造性思维究竟应该定义为“领域一般的”还是“领域特殊的”的解释进行了讨论, 并指出了研究中可能存在的基线任务设置问题和未来研究中需要在研究手段、研究设计、研究领域等方面加以改进的建议。

关键词 创造性; 创造性思维; 脑机制; 脑电; 功能磁共振; 脑功能成像

分类号 B842; B845

1 引言

创造性(creativity)也可以称之为创造力, 现代创造性研究的倡导者吉尔福特(Guilford, 1950)指出, 在创造活动过程中, 创造性思维是个体创造性的具体表现, 其核心是发散性思维(divergent thinking), 即“从给定的信息中产生信息, 从同一来源中产生各种各样、许许多多的输出。”现在多数心理学家认为创造性有两个关键要素, 即“新颖性”和“适用性”, 将创造性定义为个体产生新颖奇特而具有实用价值的观点或产品的能力(Sternberg, 1999)。创造性思维的概念可从广义和狭义两方面探讨。从广义上看, 创造性思维是思维活动的高级过程, 是在已有经验的基础上, 通过多角度思维产生出新颖独特、有社会价值的产品的思维过程。从狭义上说, 凡是对某一具体的思维主体而言, 具有新颖、独特意义的任何思维, 都可称之为创造性思维。这种观点强调的是, 新颖性、独特性是相对于某一具体的思维主体而言, 而不一定是相对于全社会而言的。心理学家通常关注的是广义层面的创造性思维, 但在大量实验研究中, 由于实验条件的限制, 往往是从狭义层面来研究个体创造性思维的(汪安圣, 1992)。

近年来, 随着认知神经科学的兴起和发展, 脑

电(electroencephalogram, EEG)和脑功能成像(brain function imaging)的研究技术为直接观察脑在处理复杂信息时的活动状况提供了强有力的研究手段, 从而为探索创造性思维的脑机制提供了较为直接的方法(Bowden, Jung-Beeman, & Zif, 2007; Fink et al., 2007; Luo & Knoblich, 2007; Srinivasan, 2007)。过去10年里, 不少心理学家采用具有高空间分辨率的脑成像技术和具有高时间分辨率的脑电技术对创造性思维进行了不同侧面的研究, 取得了较为丰硕的成果。文章将综述采用这两种技术对创造性思维的脑机制进行的研究, 并对未来研究方向进行展望。

2 创造性思维的脑机制研究

由于创造性思维过程和表现的复杂性, 目前还没有对创造性思维类型的一致公认的划分。研究者们用不同的实验任务和实验范型、从不同的角度对创造性思维的脑机制进行了一些有益的探索, 已有的研究集中于顿悟、发散性思维、远距离联想、言语创造性和图画创造性的对比等。下面将分别描述这些领域的相关研究。

2.1 顿悟的脑机制研究

创造性思维发生的一个重要特征就是它的突发性(Dietrich, 2004)。当某一问题百思不得其解时, 由于某种机遇突然使新思想、新心像浮现了出来, 使问题一下子便迎刃而解, 这个过程即是顿悟。在这个过程中, 定势转移(set-shift)或问题重构(restructuring)是必不可少的(罗劲, 2004)。重构

收稿日期: 2008-04-12

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 70671084)。

通讯作者: 张庆林, E-mail: zhangql@swu.edu.cn

是问题的表征方式从一种方式转变到另一种完全不同的方式的过程。如果新的表征是合适的，它将立即导致问题的解决，答案将突然出现，并且与之前的尝试没有什么联系，不是先前努力的自然延伸。

Luo J 等(2004)采用功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术，研究了顿悟问题解决过程中思维定势打破的脑机制。实验材料使用“啊哈谜语”，“啊哈谜语”中有一类无法用常规方式理解，因而需要思维定势的打破，例如，“因为是一位专业人士替这位老人照的相，所以看不出来是谁”(X光片)；而另一类用常规的方式就能想到答案，如“因为白色的粉末放进咖啡里，所以咖啡变甜了”(白糖)。需要思维定势打破的“啊哈谜语”中通常含有一个关键概念，这个概念具有一个优势含义和一个弱势含义，如“照相”通常指照片，很难想到会是X光片。人们必须舍其优势含义而取弱势含义才能顿悟，因此这个过程不可避免地包含一种认知冲突和定势转移。脑成像结果显示：包含思维定势打破的顿悟项目与不包含思维定势打破的一般项目相比，有明显的前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)与左腹外侧前额叶(left ventral lateral prefrontal cortex, IVPFC)的激活。研究者认为，前扣带回参与认知冲突，左腹侧前额叶参与定势转移与打破。

Goel 和 Vartanian (2005)采用 fMRI 技术考察了 13 个正常被试在包含定势转移的发散性思维任务中前额叶的参与状况。实验材料采用吉尔福特的火柴棒问题，如果被试成功解决了问题，就表示发生了定势转移。基线任务为被试判断提供的答案是否正确。通过比较火柴棒任务与基线任务显示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)。进一步比较成功解决了火柴棒问题的脑激活区与未成功解决问题的脑激活区，结果显示右腹外侧前额叶(rVLPFC)、左侧额中回(left middle frontal gyrus)和左侧额极(left frontal pole)有显著激活。由此研究者判定右腹外侧前额叶是定势转移或表征转换神经机制的关键脑区。

Jung-Beeman 等(2004)结合 fMRI 和 EEG 技术考察了人们顿悟性地解决远距离联想任务时的神经活动。研究发现，被试在解决有些项目时，会产生“啊哈!”反应。研究者根据被试的评判，将成功解答的项目分成两类，一类项目被试在解决的时候

伴随有“啊哈!”反应，而另外一类则不伴随有“啊哈!”反应。考虑到被试做出按键反应的时刻其实是在顿悟发生以后，因此，研究者将顿悟发生的时间点锁定在按键反应前的几秒。结果显示，相对于非顿悟解决方式，顿悟激活的脑区主要位于右半球前颞上回(right hemisphere anterior superior temporal gyrus, aSTG)。EEG 分析显示在顿悟前 0.3 秒处有一个突然发生的高频 γ 波起源于右侧颞上回，因此 Jung-Beeman 等人认为，右侧前颞区负责在原本不相关的信息之间建立联系。

张庆林及其团队(张庆林, 邱江等, 2005)提出了顿悟的原型启发理论，认为现实生活中的创造性思维，主要是通过原型启发而实现的；在实验条件下，正确提取(激活)相关的原型并从中获取关键性启发信息，是获得创造性问题解决的关键。他们的实验还发现，“原型的激活”是自动加工，而“原型中所包含的关键性启发信息的利用”则是控制加工(曹贵康, 杨东, 张庆林, 2006; 陈丽, 张庆林, 严霞等, 2008)。Qiu J 等(2008)最近采用 fMRI 技术考察了被试在顿悟性的解决汉字字谜问题时的大脑活动，探讨了原型启发的脑机制。研究发现，相对于非顿悟条件的脑激活，顿悟条件下脑激活显著增加的区域有楔前叶(precuneus)、左侧额下/中回(left inferior/middle frontal gyrus)、枕叶下回(inferior occipital gyrus)和小脑(cerebellum)。他们认为楔前叶与情景记忆的成功提取(原型激活)有关，左侧额下/中回与形成新异联系和打破心理定势(原型中所包含的关键性启发信息的利用)有关，枕叶下回和小脑与对字谜的再审视和注意的重置(评价产出是否合适于新颖性的要求)有关。

从上述实验研究结果可见，腹外侧前额叶、左侧额下/额中回、额极、前扣带回、楔前叶、右侧颞上回以及枕叶下回和小脑都对顿悟具有重要作用，但是这些脑区在顿悟中的作用还不十分清晰，有待进一步研究。

2.2 发散性思维的脑机制研究

吉尔福特把思维分为聚合性思维(convergent thinking)和发散性思维(divergent thinking)两种。发散性思维是指沿着各种不同的方向去思考，重组眼前的信息和记忆系统的信息，从而产生出大量独特的新思想。它克服了常规思维中单向思维的缺陷，是一种不依常规、寻求变异，从多方面探索答案的思维形式，是创造思维的重要组成部分。吉尔福特

还设计了发散性产生测验 (divergent production test) 来测量创造性思维。在测验中, 用发散性思维的流畅性、变通性和独创性的好坏来衡量创造性的高低。

Jausiovec (2000) 采用脑电技术考察了发散性思维和聚合性思维的 α 波 (8~13Hz) 脑电活动。实验采用两类问题: 一类是开放问题和开放解决方案, 相当于辨证问题, 包括阅读问题和写作问题; 一类是闭合问题和开放答案, 相当于发散性思维问题, 包括三个言语性问题和三个图形问题。结果显示, 高创造性被试相比其他被试有更高的 α 波功率。通过对 α_1 (7.9~10.0 Hz) 波段的相干分析发现, 无论是在辨证问题还是在发散性产生问题上高创造性个体都要比创造性一般个体表现出了大脑两半球之间和之内的更多的协作。尤其是在辨证问题上需要额叶和顶叶、颞叶、枕叶的密切联系。对 α_2 (10.1~12.9 Hz) 波段的相干分析发现, 在辨证问题上高创造性个体表现出了更多的脑区协作, 但在发散性产生问题上则表现出了更少的脑区协作, 这可能是由于发散性思维问题要求的创造性不是很高造成的。总之, 创造性个体能够使大脑各个区域产生远距离的联系, 尤其在额叶内有更多的协作。

Razoumnikova (2000) 采用脑电技术考察了 36 名男性被试发散性思维和聚合性思维的不同脑电模式。实验任务是要求被试思考如下这个问题: 动物园里有成百上千条蛇, 怎样才能计算出每条蛇的长度。结果显示, 聚合性思维在大脑前部和右部引发了较大的 θ_1 (4~6Hz) 波段相干值, 而发散性思维在大脑前部皮层则显示出了 θ (4~8Hz) 波段波幅降低以及 β_2 (20~30Hz) 波幅和相干的大幅增加, 这表明发散性思维需要两半球紧密的交互作用。根据被试在发散性思维上的成绩分为两类, 一为好的表现者, 一为不好的表现者。通过对比这两类被试在发散性思维上 β_2 脑电数据发现: 好的表现者相比不好的表现者 β_2 的功率有显著增加, 同时在大脑右半球有显著的相干, 两半球之间也有显著的相干, 左半球枕叶区和右半球额叶区有较高相干; 好的表现者在右半球有更多的同侧神经联系。

Fink 等 (2006) 采用事件相关去同步化 (event-related desynchronization, ERD) 方法考察了被试在发散性产生任务上脑电 α 波 (7~13Hz) 的同步性变化。实验包括两项任务: 其一是呈现给被试两个不同寻常的场景, 即 (1) “黑暗里的一盏灯” 和 (2) “有 A、B、C 三个人, A 躺着, B 坐着, C 站着” 要求被试进行解释; 其二是呈现给被试两个永远不

会发生的假想的情境, 即 (1) “想象一种会爬的植物正在往天上爬, 你站在它的末端你会等待什么?”

(2) “如果有一天世界上所有的门都不上锁或者所有的门都畅通无阻, 这时会发生什么或有什么改变?”。这两项任务都要求被试想出尽可能多的并且尽量新奇的原因或结果。为了研究非常新奇观念产生过程中伴随的脑活动, 将每个被试的回答分为高新颖性的和低新颖性的。分析结果显示, 高新颖性的回答相对低新颖性的在大脑皮层后部特别是中央顶叶伴随着更强的 α 波事件相关去同步化。这一结果不仅与 Jung-Beeman 等观察到被试体验到“啊哈”时 α 波增大相一致, 而且也与先前的研究发现 (顶叶区对发散性思维具有关键作用) 相吻合。

上述的脑电研究表明发散性思维和聚合性思维具有不同的脑活动模式, 发散性思维需要大脑两半球的紧密协作, 但是并不能精确定位出哪些脑区是发散性思维产生的关键脑区, 这需要定位更为准确的脑成像技术来加以探索。Carlsson 等 (2000) 采用注射示踪剂的技术考察了 24 名男性被试在自发言语、语词流畅性和物体不寻常用途任务上的脑血流变化。语词流畅性任务是让被试说出尽可能多的以某一字母开头的单词; 不寻常用途任务是让被试尽可能多的说出砖块的用途 (一种经典的发散性思维测验)。实验结果显示高创造性被试在不寻常用途任务上大脑双侧前额叶有显著激活尤其在右半球有更多的激活而低创造性被试仅在左半球有较多激活。

Carlsson 等 (2002) 对被试的分类是根据自编的创造性功能测试来区分的, 这样难以避免被试抽样代表性的偏差。Chávez-Eakle 等 (2007) 采用单光子发射计算机断层显像 (single photon emission computerized tomography, SPECT) 技术考察了高创造性被试 (被社会公认的对其所在领域做出巨大创造性贡献的科学家或艺术家) 和低创造性被试在物体不寻常用途任务上的脑血流变化。结果显示高创造性被试比低创造性被试的脑血流显著增加的区域有: 右中央前回 (right precentral gyru), 右嘴峰 (right culmen), 双侧额叶中回 (left and right middle frontal gyrus), 右额叶肠回 (right frontal rectal gyrus), 左额叶眶回 (left frontal orbital gyrus), 左颞下回 (left inferior gyrus) 和右小脑 (right cerebellum)。这些区域中左额叶眶回涉及定势转变, 背外侧前额皮层和小脑涉及工作记忆。小脑不仅可以使认知功能更迅速、更有效率和适应性, 涉及语言调整、注意和视

空过程以及心像,而且还参与情绪反应。总之,结果再次证实了双侧半球对创造性的贡献,这些脑结构涉及到了认知、情绪、工作记忆和新异反应等。研究者还具体分析了发散性思维结果评价中三个维度,其中流畅性和灵活性主要与左额叶下回相联系,流畅性还与双侧下顶叶(多通道同化区域)和右中央后回(初级感觉区)相关,新异性主要与颞上回(与复杂听觉和言语功能以及顿悟产生有关)和小脑扁桃体相联系。

综合上述脑电和脑成像研究可以得出,发散性思维需要多个存储有不同形式知识脑区的共同作用,创造性观念的产生是脑系统高度分布式加工的结果。

2.3 远距离联想的脑机制研究

梅德尼克将个体的创造性、独创性视为远距离联想(remote associate)能力,创造过程是组合相互关联的元素,使之成为一个满足特定要求的新的联结,创造性就是那种在意义距离遥远、表面上看似不存在联系的事物之间建立新联结的能力。梅德尼克还在联结主义理论上编制了远距离联想测验(remote associates test, RAT)。完成远距离联想任务不仅需要产生新的观念而且还需要有很广的词汇量,既需要记忆的搜索过程也有类似顿悟的过程。

Razumnikova (2007)采用脑电技术考察了远距离联想的脑皮层活动。实验条件为俄国版的远距离联想任务,控制条件为简单联想任务和睁眼休息。对三种条件下脑电数据进行功率谱分析和相干分析显示:与简单联想任务和睁眼休息相比,远距离联想任务的 β_2 (20~30Hz)波段的功率值和相干值在大脑各区域有显著增加; θ_1 (4~6Hz)功率值在大脑额叶皮层有显著增加; α 波(8~13Hz)在大脑后部去同步化显著增加并且 α_1 波(8~10Hz)在前额叶区相干性降低。同时,远距离联想任务中的新颖性分数跟 β_2 在两半球的额顶联合区和左侧的顶颞联合区的 α_1 的相干性成正相关。Razumnikova认为, θ_1 和 α_1 都涉及了自上而下的信息加工,其中 θ_1 主要与精细的持续的注意有关, α_1 主要与工作记忆的保持相联系。 β_2 频段的在大脑两半球的同步化活动则可能说明 β_2 在广泛激活的单词意义和从初步的语义编码中的远距离联想中起到识别的调节作用。

Bechtereva等(2004)采用正电子发射计算机断层显像(positron emission tomography, PET)技术考察了远距离联想的脑血流变化。实验任务有两套作业:一为包括一个测验任务和三个控制任务,旨

在探查被试的渐进式遥远联想;另一包括一个测验任务和两个控制任务,旨在探查被试的顿悟式遥远联想。渐进式远距离联想任务要求被试根据16个属于不同语义范畴的单词创作一个情景故事;顿悟式远距离联想要求被试说出12个名词之间的合理的联系。通过测验任务和控制任务的对比分析发现:

(1)渐进式遥远联想主要激活左侧颞中回(left middle temporal gyrus)。(2)顿悟式遥远联想主要激活左侧缘上回(left supra-marginal gyrus)。以往研究证明左侧颞中回涉及言语工作记忆,任务切换,想象和幻想;左侧缘上回涉及到任务切换,想象和计划等。因此,研究者认为大脑左侧颞中回和缘上回提供了创造性思维过程必需的认知灵活性和想象或幻想。Bechtereva等的研究通过严密的实验设计得出左侧颞中回和左侧缘上回是远距离联想的关键脑区。但是Bechtereva等的实验材料使用的单词太多,被试的工作记忆容量太大,创造性成分会有所降低。

Howard-Jones等(2005)采用fMRI技术考察了8个被试在创造性故事生成中的脑血流变化。实验每次呈现给被试3个单词(有语义联系的或无语义联系的),要求被试用所给的3个单词编造一个故事(有创造性的或无创造性的)。实验分为四种条件:无联系—有创造性、有联系—有创造性、无联系—无创造性、有联系—无创造性。实验行为数据有5名独立评判者进行评分。实验结果表明,无联系—有创造性条件下被试的成绩最好,有联系—无创造性条件下被试的成绩最差。对磁共振成像数据进行分析,结果发现:相比无创造性条件下,有创造性参与的脑区主要在前额叶,包括双侧额叶中央和左侧扣带前回。研究者认为右额叶激活反映了情景细节的提取和监控,左侧扣带回的激活反映了高级认知控制。

从上述研究可见,远距离联想任务的解决,需要大脑额叶和顶枕颞叶相互协作和互补,其中大脑左侧颞中回和缘上回以及右侧额叶和左侧扣带回对远距离联想具有关键作用。但是,也可以看到由于实验任务和测量方法的不同,远距离联想的脑定位就不同,还不能够真正无可辩驳地揭示远距离联想的脑机制。

2.4 言语创造性和图画创造性的对比研究

创造性思维表现在各个不同方面,美国心理学家托兰斯认为创造性思维可以表现为言语方面的创造性、图形方面的创造性和听觉形象方面的创造性。托兰斯认为一个人在创造性观念产生过程中的流畅

性、灵活性、独创性和精致性四项指标可以衡量其创造能力，并编制了著名的托兰斯创造性思维测验（torrance tests of creative thinking, TTCT）量表。言语任务与图画任务是两种截然不同的认知任务，已有研究证实，大脑有专门的言语处理区和视空处理区。那么言语创造性和图画创造性涉及的脑机制又会有哪些不同，哪些相同之处呢？

Chávez-Eakle 等人（2004）采用单光子发射计算机断层显像（single photon emission computerized tomography, SPECT）考察了12个创造性个体在托兰斯创造性思维测验（TTCT）中图画和言语创造性任务所引发的脑血流变化。实验结果显示在图画和言语创造性任务中被试的右中央前回（right precentral gyrus）显著激活。图画创造性任务中还出现了右前小脑（right anterior cerebellum）的显著激活；言语创造性任务中还激活了右中央后回（right postcentral gyrus）、左额中回（left middle frontal gyrus）、右额叶肠回（right rectal gyrus）、右下顶叶（right inferior parietal lobule）和右海马旁回（right parahippocampal gyrus）。右中央前回（right precentral gyrus）涉及感觉信息同化、动作冲动调节、动作技能学习和动作心像以及性唤醒等。TTCT中的图画和言语任务与两半球多个区域相联系，这些区域涉及多通道信息加工，复杂认知功能（如心像、记忆、新异加工等）和情绪过程等。因此，研究者认为创造性观念的产生是脑系统高度分布式加工的结果。Chávez-Eakle 等的研究显示言语创造性和图画创造性既有相同的脑区激活，又有很多不同脑区的激活。由于作者没有采用控制任务作为对比基线，所以得出的结果很粗糙，很多脑区不能够很好的解释。

Bhattacharya 等人（2005）采用多导脑电技术考察了画家和非画家创造性想象的不同脑电特征。实验要求被试在内心里根据自己的选择画出一幅画。通过与休息状态对比分析显示：（1）画家比非画家表现出了显著的 δ 波（ $<4\text{Hz}$ ）波段短时和长时的同步化增强；（2）非画家在额叶区表现出了 β 波（ $13\sim 30\text{Hz}$ ）和 γ 波（ $30\sim 70\text{Hz}$ ）的短时的同步化增强。通过对比两组被试在创造性想象任务上的脑电得出：画家相比非画家在右半球显示了显著的 δ 波（ $<4\text{Hz}$ ）波段的同步化和 α 波（ $8\sim 13\text{Hz}$ ）波段的去同步化。画家在低频段上的高度同步化可能是因为涉及到更多高级的视觉艺术记忆和自上而下的加工过程。结果表明，画家在创造想象任务中枕叶之间的功能协作模式与非画家的截然不同。

从上述研究中可以发现，创造性观念的产生涉及多个大脑区域，言语创造性主要激活的有双侧额叶中央尤其是右侧额叶，左侧颞中回和缘上回；图画创造性除激活上述区域外还激活右前小脑。尚没有见到关于音乐创造性的脑机制研究。

3 总结与展望

由于创造性活动本身的复杂性，从以上的综述可以看到，不同的实验任务、采用不同的技术手段，创造性思维的脑机制的研究结果就会出现很大的差异。这使得我们很难得到一个创造性思维的脑机制的清晰的结论。怎样整合不同的研究结果成了一个很迫切、又很困难的任务。可以认为，对于创造性思维还没有一个很客观的定义和评价标准，是导致结果分歧的主要根源。例如，创造性思维究竟应该定义为“领域特殊的”还是“领域一般的”，这不仅涉及到实验中基线任务如何很好的设置，也涉及到不同脑区的协作程度的分析。可以设想，如果将创造性思维定义为“领域一般的”，并且在研究中很好地设置可以排除“领域特殊性”影响的基线任务，那么，使用不同的实验刺激和不同的实验范型的各项研究之间就更有可能得到比较趋于一致的结论。这或许是今后的努力方向之一。

与创造性思维定义密切相关的问题是创造性思维的认知过程没有很好地明确，这也会导致创造性思维脑机制的各种研究结果之间存在很多的不一致性和争议。这也是今后值得思考和解决的重要问题之一。此外，从研究设计来看，目前的创造性思维的脑机制的研究，基本上集中于正常人的研究，还没有和脑损伤病人的研究结合起来进行更加严密的验证。从研究手段来看，目前的研究大多只采用一种技术，未来的研究可能更多的同时采用脑电和脑成像技术来进行创造性思维的研究。从研究领域来看，虽然关于创造性思维脑机制的研究涉及面很广，不仅有顿悟、发散性思维、远距离联想和创造性观念产生的过程研究，其中也包括创造性个体差异的研究，但是还存在一些空白点，例如，创造性想象和新概念的产生（概念的结合与扩展）以及酝酿的脑机制研究则相对较少，创造性思维发展的研究目前还是空白。

可以预见，未来的10年将会是创造性思维脑机制研究飞快发展的10年！

参考文献

- 曹贵康, 杨东, 张庆林. (2006). 顿悟问题解决的原型事件激活: 自动还是控制. *心理科学*, 29(5), 1123-1127.

- 陈丽, 张庆林, 严霞, 张颖, 廖祥慧, 陈谊. (2008). 汉语字谜原型激活中的情绪促进效应. *心理学报*, 40(2), 127-135.
- 罗劲. (2004). 顿悟的大脑机制. *心理学报*, 36, 219-234
- 张庆林, 邱江. (2005). 顿悟与源事件中启发信息的激活. *心理科学*, 28(1), 6-9.
- Bechtereva, N. P., Danko, S. G., & Medvedev, S. V. (2007). Current methodology and methods in psychophysiological studies of creative thinking. *Methods*, 42(1), 100-108.
- Bechtereva, N. P., Korotkov, A. D., Pakhomov, S. V., Roudas, M. S., & Starchenko, M. G. (2004). PET study of brain maintenance of verbal creative activity. *International Journal of Psychophysiology*, 53(1), 11-20.
- Bhattacharya, J., & Petsche, H. (2005). Drawing on mind's canvas: Differences in cortical integration patterns between artists and non-artists. *Human Brain Mapping*, 26(1), 1-14.
- 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., & Zf (2007). Methods for investigating the neural components of insight. *Methods*, 42(1), 87-99.
- Carlsson, I., Wendt, P. E., & Risberg, J. (2000). On the neurobiology of creativity. Differences in frontal activity between high and low creative subjects. *Neuropsychologia*, 38(6), 873-885.
- Chavez, R. A., Graff-Guerrero, A., Garcia-Reyna, J. C., Vaugier, V., & Cruz-Fuentes, C. (2004). Neurobiology of creativity: preliminary results from a brain activation study. *Salud Mental*, 27(3), 38-46.
- Chavez-Eakle, R. A. (2007). From incubation to insight: Working memory and the role of the cerebellum. *Creativity Research Journal*, 19(1), 31-34.
- Chavez-Eakle, R. A., Graff-Guerrero, A., Garcia-Reyna, J. C., Vaugier, V., & Cruz-Fuentes, C. (2007). Cerebral blood flow associated with creative performance: A comparative study. *Neuroimage*, 38(3), 519-528.
- Dietrich, A. (2004). The cognitive neuroscience of creativity. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(6), 1011-1016
- Fink, A., Benedek, M., Grabner, R. H., Staudt, B., & Neubauer, A. C. (2007). Creativity meets neuroscience: Experimental tasks for the neuroscientific study of creative thinking. *Methods*, 42(1), 68-76.
- Fink, A., Grabner, R. H., Benedek, M., & Neubauer, A. C. (2006). Divergent thinking training is related to frontal electroencephalogram alpha synchronization. *European Journal of Neuroscience*, 23(8), 2241-2246.
- Fink, A., & Neubauer, A. C. (2006). EEG alpha oscillations during the performance of verbal creativity tasks: Differential effects of sex and verbal intelligence. *International Journal of Psychophysiology*, 62(1), 46-53.
- 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.
- Howard-Jones, P. A., Blakemore, S. J., Samuel, E. A., Summers, I. R., & Claxton, G. (2005). Semantic divergence and creative story generation: An fMRI investigation. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 240-250.
- Jung-Beeman, M., Bowden, E. M., Haberman, J., Frymiare, J. L., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., et al. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *Plos Biology*, 2(4), 500-510.
- Luo, J., & Knoblich, G. (2007). Studying insight problem solving with neuroscientific methods. *Methods*, 42(1), 77-86.
- Luo, J., Niki, K., & Phillips, S. (2004). Neural correlates of the 'Aha!' reaction. *Neuroreport*, 15(13), 2013-2017.
- Qiu, J., Li, H., Liu, J., Luo, Y.J., & Zhang, Q.L. Neural correlates of the "Aha" effects: Evidence from an fMRI Study of Chinese riddles solving. In press
- Razoumnikova, O. M. (2000). Functional organization of different brain areas during convergent and divergent thinking: an EEG investigation. *Brain Res Cogn Brain Res*, 10(1-2), 11-18.
- Razoumnikova, O. M. (2007). Creativity related cortex activity in the remote associates task. *Brain Research Bulletin*, 73(1-3), 96-102.
- Srinivasan, N. (2007). Cognitive neuroscience of creativity: EEG based approaches. *Methods*, 42(1), 109-116.
- Sternberg, R. J., Amabile, T.M., Lubart, T.I., et al. (Eds). (1999). *Handbook of Creativity*. New York: Cambridge University Press.

Neural Mechanism of Creative Thinking

LIU Chun-Lei, WANG Min, ZHANG Qing-Lin

(School of psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Creative thinking is the fundamental part of creativity. At present, neural mechanism of creative thinking is becoming more and more interesting to cognitive neuroscientists with Electroencephalogram (EEG), functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) and other neuroimaging techniques. The present article reviewed recent studies of the biological correlates of creative thinking (e.g., insight, divergent thinking, remote associate, contrast of verbal and figure creative activity). Those results showed that creative thinking is associated with several key regions of the brain in different cognitive tasks. Finally, problems existed in past studies and prospects in the future were discussed briefly.

Key words: creativity; creative thinking; neural mechanism; EEG; function MRI