

# 智慧中创造性核心的神经基础

沈汪兵<sup>①②</sup>, 袁媛<sup>②</sup>, 罗劲<sup>③④</sup>, 刘昌<sup>②\*</sup>

① 河海大学公共管理学院应用心理学研究所, 南京 211100;

② 南京师范大学心理学院认知神经科学实验室, 南京 210097;

③ 首都师范大学心理学系北京市学习与认知重点实验室, 北京 100083;

④ 中国科学院心理健康重点实验室, 北京 100101

\* 联系人, E-mail: liuchang@njnu.edu.cn

2015-01-16 收稿, 2015-03-17 接受, 2015-08-10 网络版发表

国家自然科学基金(31271079)、中央高校基本科研业务费项目(2014B15314)、江苏省第四期“333 高层次人才培养工程”和北京市教委科技计划重点项目(KZ201410028034)资助

**摘要** 智慧系跨学科的研究热点, 是人类追求美好生活、提升生命质量、增进文化与文明不可或缺的要素。创造性作为智慧的核心, 对其研究进行阐述能很好地反映智慧的本质和揭示智慧活动的规律。已有创造性研究显示, 假设检验主要激活了左侧前额叶、前扣带回、小脑和丘脑等区域; 顿悟思维激活了双侧额叶、前扣带回、颞叶、顶下小叶和小脑等脑区; 创新设计多与颞叶、前扣带回、前额叶和丘脑有关; 定势和批判思维则主要与右侧前额叶、前扣带回和丘脑有关。基于创造性智力与智慧的内在关联, 上述结果表明, 智慧与双侧额叶、前扣带回、颞叶、顶下小叶以及丘脑等区域有密切关系。未来研究需联合多种高精度信号记录技术和实验范式, 并在仔细分析智慧内涵的基础上对整合了价值观的智慧的认知过程和脑机制进行深入探讨。

## 关键词

智慧  
创造性智力  
创造性  
神经基础  
认知神经科学

智慧(wisdom)是人的本质体现, 是人区别于动物的根本标志, 是人类文明进步的保证。迄今为止, 智慧之谜尚未完全得到揭示。“智慧是什么”可谓是一个历久弥新的话题。总体而言, 学者目前主要从哲学、生理学和心理学3个层面来回答该问题。在思辨哲学与生理学力求客观但仍充满疑问和模糊的解释之间, 心理学上承下达, 既继承了哲学认识论中诸多的有益观点, 又随时注意和汲取脑科学或神经科学的最新成果, 同时演变出一套独特的研究范式, 对智慧的本质、可能结构与发展机制进行了前所未有的探讨<sup>[1]</sup>, 尤其是近年快速发展的认知神经科学, 不仅有效解决了“人兽不分”和“心生混淆”问题, 而且极大丰富了心理学对智慧内涵的理解和研究<sup>[2,3]</sup>。认知神经科学是神经科学与认知心理学交叉融合后的产物, 旨在借助神经科学技术, 包括高时间精度的电生理

和高空间精度的功能影像技术来探讨心理活动的生理基础, 从脑结构与功能基础和认知机制两方面揭示心理活动的规律。这一新兴取向的兴起和快速发展极大促进了人们对智慧本质, 尤其是智慧神经基础的认识和理解。

心理学家早期多将智慧等同于智力(intelligence), 认为智力与智慧是同一物, 没有显著差异。但后来越来越多的证据显示, 智慧可能包含较智力更加广泛的含义, 如能够抓住问题的本质、明智而懂得事理等。最近大量理论和实证研究明确揭示, 智慧与智力并不等同, 智力亦非智慧的全部。智慧除包含智力外, 至少还包含创造性这个核心成分。不同于智力, 创造性是指个体利用已有知识经验产生新颖、独特且适用观点或产品的能力。在此基础上, 智慧被界定为个体以价值观为中介, 运用智力、创造性和知识,

**引用格式:** 沈汪兵, 袁媛, 罗劲, 等. 智慧中创造性核心的神经基础. 科学通报, 2015, 60: 2726–2738

Shen W B, Yuan Y, Luo J, et al. Neural basis underlying creative essentials of wisdom (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 2726–2738, doi: 10.1360/N972014-01155

在短期和长期之内通过平衡个人内部、人际间和个人外部的利益,从而更好地适应环境、塑造环境和选择环境,以获取公共利益的过程<sup>[4]</sup>。从该定义不难看出,智慧乃是智力和创造性与其他人格要素多元整合的产物<sup>[4-6]</sup>,这亦是智慧的多元-平衡-整合理论核心所在。

除Sternberg以外,其他学者也提出了各自的智慧见解,从而形成了如今丰富多彩的智慧观<sup>[2]</sup>。典型的有Sternberg笔下的多元整合型智慧(integrative wisdom)<sup>1)</sup>、Piaget眼下的适应性智慧(adaptive wisdom)以及Erikson言及的伴随年老化的经验性智慧(experienced wisdom)。无论何种智慧观以及智慧的内涵如何变化,也不管其所含要素的多寡,它们无一例外地包含以创造性思维为关键要素的创造性核心。创造性核心是保障智慧中各色“成功”的重要基础。无论是作为Sternberg智慧观基石的成功智力,作为Piaget智慧观核心的成功适应,还是作为Erikson智慧观要义的成功年老化,都离不开创造性核心。很难想象,脱离了创造性核心的智慧是如何实现认知与情绪的整合、智力和其他人格因素的多元平衡、以及公共利益的最优化的<sup>[2,3]</sup>。换言之,本研究并不否认作为高级而超复杂心理概念——智慧内涵的丰富性和广延性,不管各派中智慧内涵侧重的是同理心、亲社会性、知识应用或人性理解,还是内心感受的捕捉或决策和情感的平衡<sup>[2]</sup>,以创造性思维或创造性智力为关键要素的创造性核心都是智慧的必需品——它或是智慧结构的必要成分,又或是过程上智慧成分的创造性操作。这种关系显见于智慧研究的集大成者Sternberg的系列研究与理论之中。例如,Sternberg<sup>[7]</sup>反复借用了创造性思维或创造性智力的观点来阐述智慧概念及其多元-平衡-整合理论,认为智慧是由智力和创造性等整合而成的综合体,且其核心是创造性思维或创造性智力<sup>2)</sup>。

既然创造性思维是智慧的重要和必不可少的要

素,那么对它进行研究便可在较大程度上揭示智慧本质及其活动规律。人们现已借助当今的认知神经科学技术从不同角度对创造性思维——智慧的核心成分进行了丰富探讨,为认识智慧的脑神经基础积累了大量宝贵资料。现有智慧中创造性核心的脑机制研究主要围绕假设检验、顿悟思维、创新设计和定势-批判4个方面来展开,这刚好和创造性智力结构的实证研究一致<sup>[8]</sup>。创造性智力概念的产生不仅有助于解释创造性与智力的阈限关联现象<sup>[9-12]</sup>,而且其科学性已得到了实证研究的验证。例如,有学者以包含全国“挑战杯”科技竞赛的获奖者在内的250名来自计算机、物理和音乐等专业的学生为被试考察了创造性智力的结构。研究发现,创造性智力主要由假设检验(hypothesis testing)、顿悟(insight)思维、创新设计(novel design)、以及定势-批判(set-criticizing)4种认知能力组成。结构方程建模显示,创造性智力的4要素结构稳定,且模型的各参数满足心理测量学要求<sup>[8]</sup>,即4要素共同表征创造性智力。

下文将首次结合智慧核心表征4要素的脑机制来解析智慧中创造性核心的神经基础,为人们认识智慧的神经基础提供视角。

## 1 假设检验的认知神经科学研究

假设检验(hypothesis testing)是个体在创造性的认知活动中,通过分析问题可能存在的各种情况,做出各类假设,然后实施具体方案以检验假设合理性和正确性的能力<sup>[8]</sup>。作为智慧创造性核心之创造性智力的4要素之一,假设检验是解决任何复杂问题的重要思维工具,是人们发现规则、形成概念、建立假说、获得知识的基础<sup>[13]</sup>。假设检验是动态变化过程,它需要根据环境变化和已知条件对假设和检验结果不断修正。这意味着,假设检验具备元认知的某些性质,能够根据客观环境和主观状态的变化对思维过程进行动态监控与调整。认知神经科学研究普遍显

1) 基于知识的创造性应用,柏林智慧研究范式学者提出了一种有别于Sternberg的多元-整合-平衡理论的多元整合型智慧观。该理论认为智慧将知识系统转化为认知——对信息的接收、处理与应用和由直觉力与洞察力构成的反思,将朝向公共利益转化为包含同情、怜悯和关爱他人等的道德情感,并将智慧视为这3者相整合的人格特质(文献[2,3])。在这类整合型智慧中,无疑具有创造性核心,因为其中包含洞察力相关的反思。洞察力在包括中国台湾和日本在内的学者眼中就是大陆的顿悟,均等同于creative insight。

2) 此非Sternberg的直接表述,而是通过对其成功智力理论和智慧多元-平衡-整合理论比较基础上归纳出的观点。Sternberg在论述智慧概念及其理论时反复借用了成功智力及其子成分——创造性智力,甚至在一定程度上将成功智力等同于智慧或智慧核心成分。创造性智力被界定为个体超越已知给定的内容和信息产出新颖独特思想,巧妙解决问题从而获得成功的能力。就该定义而言,创造性智力可能与常规的创造性定义无异。

示,前扣带回主要负责动态监控和对目标定向行为的调整<sup>[14-16]</sup>.因此,假设检验过程中可能会激活前扣带回.为验证假设检验的性质,学者们借助高空间分辨率的神经影像,如正电子断层扫描术(positron emission tomography, PET)和功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI),以及高时间分辨率的电生理技术,如事件相关电位(event-related potentials, ERPs),从生理基础层面来对假设检验的神经机制进行了探讨.

Elliott和Dolan<sup>[17]</sup>率先采用PET技术对参与假设检验的脑区进行了研究.他们设计了假设检验和对照任务.2类任务都是向被试呈现系列图片对——2张由6×6黑白间隔方块组成的棋盘矩阵组成,并让被试根据各任务的指导语作相应反应.由于实验任务设计了“选择”和“不选择”2种属性,故共有4个子任务:需选择的假设检验任务与控制任务,无需选择的假设检验任务和控制任务.所有被试均需完成这些任务,并在操作任务的同时接受神经影像扫描.结果发现,假设检验任务相比控制任务,被试小脑蚓体(cerebellar vermis)、小脑两半球、左侧前扣带回背部、中央前回、右侧丘脑和左侧额下回的局部脑血流量rCBF(regional cerebral blood flow)显著增多.其中,左侧扣带回的血流增强尤为显著.相比控制任务,假设检验任务的左侧顶下小叶、右侧颞内侧回以及后扣带回等脑区血流量减少,但仅左侧顶下小叶的血流变化有显著差异,呈“去激活”(deactivation)状态<sup>[17]</sup>.根据现有发现,单个脑区一般无法或很少能独自负责如此复杂的高级心理活动的整个过程,或多或少都需要多脑区构成的脑网络或神经环路的参与.因此,上述结果表明,由前扣带回参与或构成的脑网络与假设检验紧密相关.

Kwon等人<sup>[18]</sup>从个体差异角度以实验组-控制组的组间实验设计对假设检验的脑机制进行了追踪研究.实验前分别对选取2组被试的假设检验能力进行测量,同时以fMRI扫描了脑内血氧信号变化,发现他们的假设检验能力无差异.然后给予实验组被试2个月的假设检验能力训练——60 min 周<sup>-1</sup> 次<sup>-1</sup>的因果假设训练课程.8周后,再测结果显示,实验组被试的假设检验能力有显著提升且2组差异显著.研究者在2组被试操作假设检验任务的同时,再次进行fMRI扫描.研究采用组块实验设计,即先向被试呈现一个作为基线的白色注视点“+”,在12 s后注视点消失,

紧接着呈现一张具有因果关系的生物图片(如为何猴子全身都长白毛?),30 s后消失,要求被试立即产生假设.结果发现,假设检验任务较基线显著激活了左侧额上回、额中回、额下回、前扣带回与两侧楔状回.被试相继2次扫描结果的组内和组间比较显示,控制组2次扫描的激活脑区无差异,但训练组有显著差异.训练后,假设检验任务显著激活了双侧额上回与左侧额下回,且左中央前回、中央旁回、顶下小叶、丘脑、尾状核和脑岛的血氧信号强度显著减弱.较之训练前,假设检验训练组被试的左侧额上回和额下回的血氧信号依赖效应(blood oxygen level-dependent, BOLD)变化增强,左侧脑岛和顶下小叶的BOLD效应变化显著减弱,且四脑区的效应变化均显著大于控制组.该结果验证了前扣带回参与假设检验的结论<sup>[17]</sup>,并表明双侧额上回和左侧额下回在假设检验中的重要作用.

最近,学界开始诉诸高时间精度的电生理技术,主要是脑电图和事件相关电位技术来探讨假设检验的时间进程.Li等人<sup>[19,20]</sup>采用修正的归类任务研究了假设检验的神经机制.脑电结果显示,个体脑后部区域产生了一个早期电位,中后期的中央区产生了一个P300.同时,额叶中央区产生了一个与拒绝假设有关的增强电位.该结果表明,假设检验是一个阶段性加工过程,早期主要由后侧脑区负责假设关键信息的识别和抽取,中晚期则由中央区负责完成假设表征与刺激的匹配,支持假设检验是动态变化过程的结论.Papo等人<sup>[21]</sup>用ERP技术开展的假设检验研究也支持该结论.其研究不仅分析假设形成和检验2个阶段的脑电变化,而且对这2个阶段的脑活动进行了源定位分析.研究显示,早期脑电过程更多出现在海马旁回和扣带回及其后部脑区,晚期脑电则主要源于前额叶、扣带回和颞叶等前部区域.有关人们接受不同假设检验结果脑机制差异的fMRI研究<sup>[22]</sup>显示,无关假设与增强假设保持过程所激活的脑区无异,但假设拒绝过程较之前2者显著激活了左侧额内侧回、顶下小叶、右侧小脑和双侧壳核(putamen).以概率推理任务评估核心假设可接受性的研究进一步显示,核心假设的接受较之假设拒绝过程激活了参与额-顶-枕功能连接的背侧前扣带网络,而非背侧前扣带回或其内部脑区的激活<sup>[23]</sup>,表明作为整体的背侧前扣带网络负责核心假设的接受.

综上所述,假设检验作为一种问题解决策略和

加工过程,它在创造性智力和智慧活动中扮演着重要角色.采用认知神经科学各类高精度技术开展的脑电生理和功能成像研究结果一致显示,假设检验主要激活了额叶,尤其是左侧额叶、前扣带回、小脑和丘脑等区域.顶叶和颞叶某些脑区的激活在不同研究略有差异,反映了它们在假设检验的各具体阶段(如假设生成、假设评估或假设拒绝与接受等)的作用不同,也可能与研究范式和额外因素的控制有关.未来研究需控制无关因素进行综合探讨,以查明其机制.

## 2 顿悟思维的认知神经科学研究

顿悟作为思维的常见形式和智慧的关键成分,是个体以一种相当突然且不可预知方式,突破思维僵局和重构问题表征,获得问题答案并伴随一定程度“Aha”体验的过程<sup>[24-26]</sup>.顿悟的一个重要现象学特点为其突然性<sup>[27-29]</sup>,即使解题者本人也无法准确预知顿悟产生的时刻.只有打破原有不当观点和联结并获得一种相当突然的恍然大悟感时<sup>[28,30,31]</sup>,他们才知道自己产生了顿悟.换言之,顿悟作为一种“突变”的过程,解题者以外的其他任何人,甚至包括解题者本人都很难从单一的行为层面来标记顿悟现象.顿悟的客观行为指标如此匮乏,以致人们很难从超越口语报告的其他层面来探讨顿悟.但近年来由我国学者罗劲及其团队<sup>[30-32]</sup>开启的基于脑的顿悟研究取向不仅体现了“重回心智主体”的“第二代科学”的时代精神<sup>[33]</sup>,而且使顿悟摆脱了心智模拟歧途,重归“脑基础”的正道<sup>[33]</sup>,并成就了多元耦合视角下的“心-身-脑”整合顿悟观<sup>[34]</sup>.

基于脑筋急转弯故事答案催化顿悟的脑成像研究显示,较之静息状态,人脑顿悟过程中有广泛脑区激活,主要涉及双侧额上回、额中回和额下回,前扣带回,双侧颞上回和颞下回及楔前叶和海马等<sup>[30,31]</sup>.有关成语谜语答案选择的研究显示,顿悟条件较之非顿悟条件在早期阶段显著激活了双侧的颞中回、额下回和角回,以及左侧的前扣带回、颞下回和右侧海马旁回;晚期阶段顿悟活动则伴有双侧颞中回和海马、左侧扣带回前与眶额区以及右侧杏仁核的显著激活<sup>[35]</sup>.脑功能联结分析结果进一步揭示,在顿悟问题解决条件下,右侧海马仅与右侧颞叶有功能连通,非顿悟条件下右侧海马和双侧颞叶均有功能连通.意味着非顿悟过程较之顿悟过程调用了更多有碍新

颖语义联结形成的突显信息<sup>[36]</sup>.联想类顿悟的脑机制研究则显示,远距离联想诱发的顿悟主要与左侧颞上沟、前扣带回、海马旁回、右侧额上回、右侧顶下小叶以右侧颞上回前区密切相关<sup>[37-39]</sup>.

张庆林与邱江团队<sup>[40-42]</sup>开发了原型激活范式并以此系统探讨了顿悟的脑基础.原型激活范式因具备了“谜语法”与“词语法”双重优点而被视为一种整合性更强的顿悟研究范式<sup>[43]</sup>,意味着采用该范式开展顿悟的神经机制研究在某些方面可能具备更强的说服力.原型激活顿悟的研究<sup>[41]</sup>显示,顿悟任务较非顿悟任务更多激活了中央前回、左侧额下回、额中回、枕下小叶以及小脑;而非顿悟任务比顿悟任务更多激活了颞上回、额中回、前扣带回、右侧的中央后回和后扣带回.研究者认为,中央后回的激活可能与情景记忆的提取有关<sup>[44]</sup>.因为原型激活任务并未直接为被试提供问题答案,而是要求被试从记忆和之前学习经验中提取和抽象出规则或原型并以此来协助解题.额上回和额中回的显著激活则可能分别与新颖联结的建立及工作记忆的主动存储有关;枕叶的激活可能更多与汉字任务的视觉加工有关,反映了较高负荷的视觉加工;小脑的激活可能与刺激出现时,个体行为的扩展和精细化运作有关,当然亦可能与小脑的纠错机制有关<sup>[32]</sup>.

由上述研究发现可知,双侧前额叶、前扣带回、颞叶(主要是颞上回与颞中回)、顶下小叶和小脑等脑区区域在顿悟思维活动中起着关键作用.各个脑区在顿悟思维中的具体作用,目前各研究观点不太一致,这可能与顿悟思维的复杂性及其研究的难度——需主体通过观察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特点有关<sup>[45]</sup>.未来研究需进一步联合高时间分辨率和空间分辨率的认知神经科学技术来进行研究.

## 3 创新设计的认知神经科学研究

创新设计(novel design)是指在不超出限定条件或实际情况下产生新观念或设计新产品的能力<sup>[8]</sup>,是设计主体利用已有知识和经验创造性构思、规划或编排从而创造或设计出新颖独特且具有实用性成果的实践活动.它是创造性智力的关键要素,反映着个体的科学或艺术创造性<sup>[46]</sup>.创造性作为一种高级思维活动,是人类能力和智慧的最高表现.于是它一直以

来都深受人们重视,早在古希腊时期人们认为创造性是缪斯女神的恩赐.但限于当时的研究水平和认识视野,人们对其认知基础的了解十分有限<sup>[47]</sup>.随着心理学研究范式的成熟和认知神经科学研究技术的现代化,人们借助创新隐喻表达、音乐或唱词即兴创作、艺术或视觉设计以及创造性类比等涉及不同言语性的认知任务来探讨创新设计的神经基础.

创新隐喻表达的神经机制研究显示,较之方案和图像的创新设计,隐喻词汇关系的创新性表达则要个体突破已有的思维模式,在意识和无意识的作用下,超越词语间的既知联系(非隐喻式的、直白的联系)和传统的隐喻关联,寻找线索重构2个词汇所组成词组的内在隐喻联系. Mashal等人<sup>[48]</sup>通过初步筛选和预实验获得一批难度匹配良好的词对(如bright student等).以组块设计呈现给被试,每个词对呈现2100 ms,词对间间隔400 ms的空屏,要被试分别按键盘上相应键来做出“隐喻相关”(metaphor related)、“直白相关”(literal related)以及“无联系”(unrelated)的判断.研究者为了避免组块设计给被试反应所带来的学习效应,在设计组块刺激时还在每个组块中均设计了一个其他性质的干扰刺激,如在“隐喻相关”组块穿插了一个“直白相关”词对等.为从“隐喻关联”组块中分离出传统隐喻和创新隐喻表达的神经机制,他们让被试在完成任务后说明各组块的性质——属4种条件的哪一种.研究者在被试操作任务同时以fMRI记录其脑活动状态.结果显示,新颖隐喻表达相比传统隐喻更多激活了左侧颞上沟后部、右侧额下回和左侧额中回.较“直白关联”,创新隐喻表达则更多激活双侧额下回、右颞上回和中部前扣带回.细致分析进一步表明,额上回与额中回虽是隐喻创新性表达较传统表达激活最强的脑区,但它们并非隐喻创新表达所激活的独特脑区.隐喻传统表达较“直白关联”也激活了这2个区域,说明它们参与隐喻创新性表达和传统表达的程度不同,更多参与了创新性表达,因此激活更明显.隐喻创造性表达显著激活了左侧颞上回.换言之,左颞上回可能与表面看似无关事物2者关系的建立有关.已有研究提示<sup>[32,37]</sup>,颞上回与原本无关事物联系的建立有关.

即兴创作(improvisation)是一种重要的自发性创新设计方式.它常因领域差异被分为音乐即兴创作<sup>[49-51]</sup>和唱词(如诗歌或歌词)即兴创作<sup>[52]</sup>.音乐即兴创作乃即刻形成和表达音乐观点或想法.有关该

活动的研究显示前辅助运动区、背外侧前运动区<sup>[51]</sup>、额下回<sup>[49]</sup>、前扣带回<sup>[49,50]</sup>和颞区诸多区域的显著激活<sup>[53]</sup>,并主张它们分别与节奏学习和节奏知觉的时序加工<sup>[50,51]</sup>以及乐感感知与体验<sup>[54]</sup>有关.另有研究显示,爵士乐即兴创作主要激活了背外侧前额区和以额极为焦点的外侧眶额区.该发现意味着爵士乐即兴创作是进行中任务过程缺乏自我监控和有意识“违例控制”的刺激独立行为.其中,感觉运动区的激活和边缘皮层区的去激活则分别与旋律创作中动作执行和组织以及音调情绪调节有关<sup>[51,54]</sup>.音乐家和音乐新手从事音乐即兴创作——生成新颖音乐-运动序列脑活动差异的比较表明,音乐家创作音乐旋律显著去激活了右侧颞顶联合区,但音乐新手旋律创作并未激活该区<sup>[55]</sup>.右侧颞顶联合区是负责自下而上刺激驱动加工的腹侧注意网络的一部分,它的激活表明音乐家旋律创作时抑制了目标驱动过程中无关刺激引发的注意转移.随后学者以伪随机反应生成任务、音乐旋律即兴创作任务和作基线的轻声阅读任务探讨了钢琴演奏家即兴表演的脑机制,观察到旋律创作和伪随机反应生成任务均显著激活了背外侧和背内侧前额叶、额下回、前扣带回和前辅助运动区.即兴表演并无独特于伪随机反应创作任务的脑激活区,相反,伪随机反应创作任务较即兴表演激活了更多的左侧额上回、额下回、额中回、楔前叶和小脑以及脑岛等广泛脑区,反映了个人音乐经验的易化和伪随机反应生成任务蕴含了更高负荷的注意、工作记忆与执行控制<sup>[56]</sup>.唱词即兴表演是有别于音乐即兴创作、由音乐和言语交互形成的创新设计形式.有关自由格式的Rap创作的脑成像研究显示,自发唱词即兴表演与内侧和背外侧前额叶的分离性脑活动有关——即兴创作较之对照组显著激活了左侧前运动区、前扣带回、额下回和颞上回和颞中回后部脑区以及内侧前额叶;相反,对照条件较之即兴创作更多激活了右侧背外侧额下回上部和下部、缘上回以及双侧的顶内沟和顶上小叶、以及左侧后扣带回和楔前叶等广泛脑区<sup>[52]</sup>.由上可知,无论即兴创作的具体类型如何,它们共同激活了一些脑区,诸如前运动皮层、额下回、前扣带回和颞上回等.基于脑成像文献的系统梳理与总结发展出了即兴创作的两阶段模型——即兴创作的新颖观点产生和效用评估阶段<sup>[57]</sup>,且额中回、后扣带回和外侧颞叶构成的默认网络激活被认为与新颖观点产生有关,额下回、背外侧前额

区、前扣带回和运动皮层等执行网络的激活与效用评估有关,眶额区和杏仁核则负责曲调乐感和音乐情绪调节。

现实生活中的创新设计不仅涉及图画创作的创造性构思,而且具备相当的实用价值。以往研究虽就图画创造性的脑机制进行了颇多研究<sup>[46,57~59]</sup>,但对有较高现实价值和生态性创新设计的神经基础的探讨仍很有限。Gilbert等人<sup>[60]</sup>考察了个体操作创新设计任务(如艺术方案设计)的神经基础。他们设计了2类任务:无需创造性的常规问题解决任务和需创造性的创新设计任务,并对被试完成2类任务的脑活动进行fMRI扫描。研究结果显示,被试在完成任务的操作阶段主要表现为右侧优势,显著激活了右侧枕叶皮层、右外侧颞叶皮层、右侧顶内沟、右外侧前额叶皮层和双侧腹内前额皮层。同时伴有含运动和前运动皮层区、顶下小叶、内侧枕叶、小脑(cerebellum)和丘脑在内的多个脑区的激活。进一步对学习阶段和操作阶段的比较,发现学习阶段更多激活了右侧背外侧前额叶皮层,且该激活优势在设计任务中尤为明显,操作阶段更多激活了右侧丘脑,且在设计任务上格外显著。后续分析揭示,设计任务较常规问题解决任务显著激活了右侧背外侧前额皮层,常规任务则显著激活了腹内侧前额皮层和顶内沟,且激活状况具有任务特异性——右侧背外侧前额区的激活只显于设计任务,腹内侧前额叶皮层和顶内沟的激活则只显于常规问题解决任务<sup>[60,61]</sup>。这些结果表明,艺术创新设计更多地涉及右侧背外侧前额叶皮层的功能。Kowatari等人<sup>[62]</sup>在排除个体差异基础上进行了验证。他们考察了20名系统训练后设计专家和20名新手进行钢笔款式的创新设计任务时的脑活动差异,发现专家的创新设计指标与双侧前额区的激活程度显著相关,而新手的创新设计指标与双侧前额区的激活度无关,但与双侧前额区的血氧依赖水平信号变化显著负相关。为分离出专家与新手被试的个体差异和创新设计的脑功能区,研究者用建模技术对相关脑区(如左侧梭状回和左侧海马等)进行关联性挖掘,发现左侧顶叶主要与设计训练的个体差异有关,右侧前额叶则与创新设计关系密切<sup>[46]</sup>,支持创新设计主要由右侧额叶负责的观点<sup>[60]</sup>。Ellamil团队<sup>[63]</sup>在fMRI兼容的书写情境下考察了被试实时根据所呈现书本内容描述创造性设计带文字说明的图书封面的脑机制,观察到设计方案

的生成较评估显著激活了额下回、小脑、前运动区、顶上小叶和顶上小叶以及包括海马和海马旁回在内的内侧颞叶,然而,方案评估较生成则显著激活了颞上回、颞极、以及包括前扣带回和背外侧前额叶的执行网络和由内侧前额叶、颞顶联合区和后扣带回构成的默认网络。重要的是,设计全过程中默认网络和执行网络均存在功能连接,且各脑区信号变化与方案的成功生成率显著正相关,提示上述脑区在创新设计两阶段扮演着不同作用。基于类比生成原理,我国学者对“多源类比人脸生成”的创新设计活动的脑机制进行了探讨,并发现创新设计主要激活了右侧颞上回、额上回、双侧海马、左前扣带回、右小脑与尾状核以及左内侧前额叶等脑区<sup>[64]</sup>。Green团队<sup>[65]</sup>先后细致评估了类比距离对创造性类比推理中的作用,并观察到额下回、颞上回和左侧额上回,尤其是额极在抽象关系整合中的重要意义,且左侧额极的激活程度与语义距离显著正相关<sup>[66]</sup>。

由上可知,创新设计作为创造性思维和创造性的重要内容 and 形式,它并不存在独立或独自的特异性脑区,而是需要多个存储不同形式知识的脑区或脑网络的共同参与相互协作,并和大脑的右侧颞上回、前扣带回、前额叶和丘脑或其相关脑网络有关。少数研究报告的枕叶的显著激活可能主要与视觉任务有关。以健康被试为研究对象的科学创造性和艺术创造性脑机制的研究<sup>[44,46,57,58]</sup>或者以脑损伤者(如额叶病变或颞叶癫痫者)为研究对象的神经心理学研究<sup>[46,57,67]</sup>均复制到了背外侧前额叶、前扣带回、颞叶和后顶叶在创新设计的重要作用。这些表明,创新设计作为反映个体创造性思维的重要活动,可能主要由颞上回、前扣带回、前额叶、丘脑和后顶叶等构成的功能网络实现。

#### 4 定势-批判的认知神经科学研究

定势-批判是思维和智慧的关键要素之一,系定势解除和批判思维的综合体。定势解除是就思维定势而言的。思维定势又称“习惯性思维”,是人们运用已有解题经验和习惯以常规方式思考和分析问题的思维过程。定势解除则是解除思维定势,灵活迁移已有解题经验和知识,根据问题情境举一反三和变通地考虑和分析问题的过程。罗跃嘉团队<sup>[68]</sup>率先采用ERP技术考察了定势解除的神经机制。他们先在屏幕中央呈现一个谜面(20个汉字以内)8 s,间隔2 s,要

求被试在这10 s内思考谜底,然后呈现谜底2 s,并间隔2 s,要被试在这4 s内按键反应:被试自己想出的答案与所呈现的谜底一致时按左键——未发生定势转移或定势切换;被试所想出答案与所给谜底不一致,且被试感觉呈现的谜底更合理,或没有想出答案,看到屏幕上呈现的谜底后能理解并同意时,按右键——产生了定势转移或者说发生了定势切换。最后分别被试是否发生定势转移的脑电成分以及2者的差异波分析,发现定势转移过程与250~500 ms时程内最大潜伏期约为380 ms的差异负波(N380)关系密切,差异负波的源定位结果显示其主要源于前扣带回,以负责顿悟问题解决过程中思维定势突破为主要功能。该结果意味着顿悟过程中的定势解除可能与前扣带回有关。前扣带回负责认知冲突及其错误监测<sup>[13~16]</sup>已成共识,就此而言,定势解除无疑是一个动态元监控和认知冲突的过程。当个体元认知监控到自己的原有经验和问题表征无法解决问题时,它们在就会抛弃原有的问题表征和经验,重构问题表征和寻找新的解决途径,引发了前扣带回的激活。Goel和Vartanian<sup>[69]</sup>采用fMRI技术对健康被试完成包含定势解除的发散思维任务的过程进行研究。采用吉尔福特的火柴棒问题作为实验材料,要求被试通过移动火柴棒来解决问题。被试若成功解决了问题则表明产生了定势解除或转移。与此同时,研究者还设置了一个基线任务——要求被试对所提供答案作正误判断,并通过比较实验任务与基线任务以及未成功解决任务来获知定势解除的神经机制。脑成像结果显示,成功解决较基线任务主要激活了右腹外侧前额叶和左背外侧前额叶;成功解决问题较未成功解决问题的显著激活了右腹外侧前额叶、左侧额中回和左侧额极。根据减法设计逻辑,可知成功解决任务较基线任务和未成功解决任务所共同激活的脑区即为定势解除的神经基础,表明右腹外侧前额叶是负责定势解除的关键脑区<sup>[32]</sup>。针对各研究结论间的差异,本研究组认为可能与各研究的实验任务有关。同时与所用研究技术有关:ERP的空间分辨率比较有限,不足以清楚揭示心理活动的脑活动区域。加之,ERP溯源分析只是一个逆问题,无法精确揭示神经基础。定势解除如此复杂,因此不可能只是涉及右腹外侧前额叶一个脑区,可能还需要诸如前扣带回等在内的其他脑区的参与和神经交流。

批判思维(critical thinking)是相对于创造性思维

的心理过程,是焦点集中且具有自制和逻辑性的受限思维<sup>[5]</sup>。作为智慧的重要元素,批判思维最独特之处在于其思维的批判性。鲜有的临床神经科学研究显示,批判性思维主要与左脑腹侧丘脑底部密切相关。Drago等人<sup>[70]</sup>借助药物(主要是多巴胺和抗抑郁药物,如氟西汀等)诱导的深脑刺激技术考察了帕金森氏症患者脑损伤脑区对艺术作品进行思维批判过程的神经机制。研究比较了一位有20年帕金森氏症病史的69岁女艺术家(左脑腹侧丘脑底部损伤)在有无深脑刺激2种状况下批判思维的差异,发现患者接受深脑刺激时对其他艺术家作品的创造性评分明显偏低,说明思维批判性更强。同时,创造性思维测量结果显示,在无深脑刺激时,患者简化版托伦斯创造性测验的得分显著高于均值;有深脑刺激时则显著低于均值<sup>[46]</sup>。这意味着,左脑腹侧丘脑底部可能是个体批判思维的神经基础。Longe团队<sup>[71]</sup>从自我批判(self-criticism)着手探讨了批判思维的神经基础。他们要求被试阅读屏幕上呈现的情景故事并根据所给的提示线索完成对故事的批判性评定。若感觉故事批判性十分明显则评定为7,若感觉批判性极不明显则评定为1,评定等级可在1~7变化。对被试评定的过程进行fMRI扫描,发现高批判性评定过程较低批判性过程更多激活了背外侧前额叶和背前部扣带回。与此类似,先前以fMRI技术对概化社会恐惧症(generalized social phobia)患者<sup>[72]</sup>和抑郁康复者<sup>[73]</sup>与正常个体的对照研究发现社会恐惧症患者和抑郁康复个体较正常人<sup>[72,73]</sup>,其背外侧前额叶对批判过程更敏感。这些表明无论是患者还是正常个体,其批判过程均会明显激活背外侧前额叶。

有关定势转移和批判思维的上述脑成像和脑损伤研究表明,定势解除更多涉及了右侧前额叶和前扣带回等脑区,批判思维则主要激活了丘脑、背外侧前额叶和背前部扣带回。2者均与背外侧前额叶和前扣带回关系密切。一般地,背外侧前额叶主要负责认知控制、错误检测和消解(error detection and resolution)以及行为抑制;前扣带回则主要负责错误监测(error monitoring)和认知冲突的检测与消解。上述研究表明,定势解除和批判性思维需要活动主体动态监测系统和认知冲突系统的参与,且主要在丘脑的“中继平台”实现。

总体上,创造性智力的神经基础主要涉及额叶、前扣带回、颞叶、顶下小叶、小脑以及丘脑等区域。基



本上创造性智力的4个要素都共同激活了丘脑、前扣带回和前额叶等区域,意味着这些区域可能在创造性智力中扮演着非常重要的角色。

## 5 有关智慧脑功能基础的启示

创造性智力,或创造性思维能力,是智慧中的关键核心要素,在一定程度上有效表征着智慧。现有创造性智力的系列认知神经科学研究为人们认识人类智慧的神经基础和认知过程提供了重要启示。智慧活动作为一项高级的神经活动,被视为认知、情感、进化和社会众多领域要素构成的适应性特质,无疑不是单个脑区作用的结果或某个皮层的功能,相反是多个分布在不同皮层多个脑区共同协作的结果。有关创造性思维4个核心要素的认知神经科学研究显示,作为智慧的核心关键的创造性任务确实激活了诸多重要脑区。值得注意的是,创造性思维子任务虽均激活了这些脑区,但智慧甚至创造性思维的神经基础不一定就是它们的简单相加。因为无论是创造性思维还是智慧,其神经基础不是其所蕴含元素脑基础的简单相加,而是子成分和要素的相互协作及其神经基础的有机组合与网络联通。

现有研究提示,智慧的神经基础可能主要涉及双侧前额叶、前扣带回、顶下小叶、丘脑和杏仁核。智慧一个显著特征便是即时奖赏和长期结果多重选择间的平衡,多事件的沉思和思考是实用性智慧的重要功能,故负责认知控制和规划的前额叶和进程监控与冲突处理的前扣带回的激活显而易见。前额叶作为心理活动的执行系统和协调中心,它在几乎所有的高级心理活动都会不同程度地激活<sup>[74-76]</sup>。智慧活动作为涉及创造性、智力和其他人格因素多元整合的高级心智活动,自然也需要前额叶皮层的参与。认知和情绪的功能整合是智慧所必需的,且越来越多的智慧研究者都提及需将情感控制和认知过程整合起来,并认为这对智慧来说是非常关键的<sup>[77]</sup>。前额叶,尤其是内侧前额叶则与认知和情感的整合密切相关。就其具体作用而言,系统研究显示,前额叶在神经解剖结构上主要负责接受感觉输入纤维、运动输出纤维、边缘联结(limbic connections)和内在联结(intrinsic connections);而在功能上则主要负责认知控制、主动存储、功能整合、容量限制和监控以及表征刷新<sup>[15,74]</sup>。前扣带回作为元认知的动态监控系统 and 冲突监测系统,几乎在所有涉及多元平衡和整合

的心理活动中均会显著激活<sup>[76]</sup>,而智慧作为一个多元-平衡-整合的过程,势必会激活前扣带回,况且与前扣带回相关的自我反思是智慧尤其是顿悟的必要前提<sup>[77]</sup>。此外,前扣带回作为边缘系统的一部分<sup>[78]</sup>,它是高级心理活动驱力系统不可或缺的一部分,这导致无论采用何种任务和范式来探讨智慧的神经基础,前扣带回基本都会激活。就即时奖赏和长期结果的平衡而言,个体选择立即奖赏会激活边缘系统及旁边缘皮层,但选择延迟奖赏则会激活背外侧前额叶和某些顶区。丘脑之所以在创造性智力任务中被广泛激活,可能与它的神经解剖学地位有关。在解剖结构上,丘脑被Y形的内髓板分割成前核、内侧核和外侧核3大核团,且各核团彼此间有紧密的神经联系。丘脑前核可发出纤维投射到扣带回,前脑内侧核可发出纤维投射到前额叶皮层,而丘脑外侧核则可发出纤维投射到顶叶皮层和小脑<sup>[79-81]</sup>。丘脑被誉为“感觉中转站”,除嗅觉外的近乎所有感觉都先到丘脑,随后再继续上传至大脑皮层;坎农巴德情绪理论中更是将丘脑视为情绪产生之核心。由上可知,丘脑发出纤维所投射到的这些区域基本在创造性智力的不同任务甚至多种任务中都被共同激活,这似乎表明丘脑在创造性思维和智慧所涉及神经基础中扮演某种联络和“中继站”功能。何况,丘脑功能的已有研究显示,其还参与意识和觉醒活动<sup>[80,81]</sup>。智慧作为意识的重要内容,自然涉及意识加工,故丘脑会参与智慧过程。顶叶的激活,本团队认为可能与其在智慧活动中的整合功能有关<sup>[82-84]</sup>。就解剖结构而言,顶下小叶和前额叶皮层有密切的双向纤维联系<sup>[32,85]</sup>,故很可能参与了前额的行为规划和执行控制过程<sup>[32,86]</sup>。

综上,根据创造性智力的已有神经机制发现,智慧的神经基础主要涉及前额叶——负责认知和情绪的功能整合与认知控制(阻断冲动性的认知控制以及由此形成的亲社会行为)、扣带回——双重或多重利益的平衡与价值相对性容忍以及自我反思、杏仁核——情绪体验和情绪的自我控制与调节、负责行为规划和协助执行控制的顶下小叶、以及作为“中继平台”且与意识保持相关的丘脑等脑区为关键节点的脑网络,未来研究可对此作更直接的检验。

## 6 总结与展望

综上所述,已有研究围绕创造性思维的4因素对智慧的神经基础进行了系列探讨。尽管各研究因实



验范式、材料或检测技术的差异而导致结论有一定出入,但创造性思维4因素的脑机制研究一致提示前额叶、前扣带回、丘脑和顶下小叶对创造性智力非常关键。这意味着,以多元-平衡-整合为核心的智慧,其神经基础可能涉及上述脑区或由上述脑区构成的脑网络。本文从创造性智力的视角首次系统地阐述了人类智慧可能涉及的脑神经基础,不过,这些数据主要是基于创造性思维任务的初步结果,又如传统元素主义所受批评一样——智慧可能不一定适合分解为诸多子成分的“格式塔”。于是,智慧神经基础更确切和具体的结论尚需未来研究的进一步探讨。智慧现有心理与认知神经科学研究虽然促进和推动了人们对智慧生物学基础与本质的认识,但也存在诸多不足和遗留下了颇多尚未解决的问题。针对此,未来研究有必要在借助神经连通分析方法探测关键脑区间协同作用基础上进一步从以下4个方面深入:

(i) 整合多种技术和范式来探讨智慧的认知神经机制。到目前为止,研究者尚不清楚智慧的真实内涵,对其概念也并不存在一个统一的界定<sup>[87]</sup>,因此未来研究首先需要解决这些问题。并结合行为和认知神经科学的技术来对智慧的认知加工及其神经基础进行探讨。这又可进一步从2方面展开:(1)借助当前的创造性思维研究范式,通过检测创造性思维子任务的神经机制来间接获知智慧大体的脑机制;(2)大力发展智慧的研究范式和测量任务,并通过这些任务和范式来直接检测智慧的神经基础。除此之外,智慧神经基础的研究中一个值得深入的发现就是颞叶是否是智慧神经基础所必需的。前述的顿悟思维脑机制研究虽提示颞区的激活,但该区并非上述4类任务所共同激活,故未纳入智慧神经基础的分析中。不过,该区仍可能在智慧或某些智慧成分中扮演重要作用。创造性人格神经基础的最新研究<sup>[88]</sup>也观察到了右侧颞中回等颞区的重要作用。因此,未来研究应当从多元化的综合视角来解析智慧之谜。

(ii) 加强智慧内涵及其组成要素的探讨。目前的智慧研究仍显得十分粗糙,人们对智慧的内涵并不十分清楚。有的研究倾向于从道德视角出发,将个体成功解决道德冲突的过程视为智慧;有的研究者

则从生命发展和老龄化的角度出发<sup>[4,87,89,90]</sup>,将个体成功地解决埃里克森八阶段对应的问题视为智慧;有的研究者则从智力角度出发,将高智商视为高智慧<sup>[2,3,87,91]</sup>。研究视角的差异导致智慧研究的主题零散,研究脉络不够清晰,难以获得巨大进展。于是未来研究需从更整合的视角来探讨智慧的具体内涵和其所包含的要素。

(iii) 丰富被试的选择,开展不同年龄和不同类型(如疾病患者和正常被试,或正常个体与高智商个体)群体的智慧研究。目前少数借助创造性思维或创造性智力任务来探讨智慧神经基础的研究显示,不同类型群体其智慧表征方式和神经基础略有差异。例如,有关抑郁康复个体与正常个体参与批判思维的脑区的对照研究显示,抑郁康复个体的背外侧前额叶对批判性更敏感<sup>[73]</sup>。这意味着个体的经历和疾病史可能会影响人们对智慧的理解及其认知表征。同时,大量研究揭示智慧与年龄有密切关系<sup>[3,87,89,92]</sup>,传记和人物提名研究<sup>[4,87,90,92]</sup>显示,人们倾向于将老者视为智慧群体,这表明智慧或其外在表征可能与年龄存在一定关系。

(iv) 道德是否是智慧的应有之义,是目前学界争论较多和亟需今后大力探索的话题<sup>[77]</sup>。最新研究显示,道德与创造性之间有密切的关系,相对而言,个体道德水平越高,创造性水平越高<sup>[93]</sup>,在一定程度上为中国文化中历史悠久的德才兼备的人才观提供了支持,当然也可能是中国文化中德才兼备人才观催生了两者间的正向关联——高创造性者自觉遵守道德规范或者创造性之中自然嵌入了道德准则。其实,就我国文化而言,我国学者开展智慧及其神经基础的研究有着得天独厚的优势。因为根据 Sternberg 的智慧平衡理论<sup>[92]</sup>,智慧的核心是“多元-平衡-整合”;这个核心与我国传统文化中所推崇的“中庸”思维紧密关联<sup>[93]</sup>。长期以来,作为我国先哲与圣贤安生立命和为人处世的准则,中庸思维在现代社会和冲突解决过程中发挥着十分重要的作用<sup>[94]</sup>,对此进行研究对文化复兴和解决现实问题均具有重要意义。因此,未来研究应当从本土文化中汲取滋养,开展具有文化根基性的智慧探索与实践。

**致谢** 感谢西南大学邱江教授和本文审稿专家提出的宝贵意见。

## 参考文献

- 1 Wu G H. New progress in intelligence research: Cognitive theory of intelligence. In: Guo B Y, ed. *Current Directions in Toady's Psychology*. Jinan: Shandong Education Press, 2003 [吴国宏. 智力理论的新进展: 认知智力理论. 见: 郭本禹. 当代心理学的新进展. 济南: 山东教育出版社, 2003]
- 2 Chen H B, Wang F Y. Wisdom: Structure, category, measurement and relationships to related variables. *Adv Psychol Sci*, 2013, 21: 108–117 [陈浩彬, 汪凤炎. 智慧: 结构、类型、测量及与相关变量的关系. 心理科学进展, 2013, 21: 108–117]
- 3 Hou Y, Liu C. A review of implicit theory research on wisdom. *Psychol Res*, 2010, 3: 13–18 [侯祎, 刘昌. 智慧的内隐理论研究的回顾与展望. 心理研究, 2010, 3: 13–18]
- 4 Sternberg R J. Implicit theories of intelligence, creativity, and wisdom. *J Pers Soc Psychol*, 1985, 49: 607–627
- 5 Sternberg R J. What is the common thread of creativity? Its dialectical relation to intelligence and wisdom. *Am Psychol*, 2001, 56: 360–362
- 6 Craft A. Fostering creativity with wisdom. *Cambridge J Educ*, 2006, 36: 337–350
- 7 Sternberg R J. How wise is it to teach for wisdom? A reply to five critiques. *Educ Psychol*, 2001, 36: 269–272
- 8 Xu Z, Zhang Q L, Sternberg R J. A confirmatory analysis of creative intelligence. *J Psychol Sci*, 2005, 27: 1103–1106 [徐展, 张庆林, Sternberg R J. 创造性智力的验证性因素分析. 心理科学, 2005, 27: 1103–1106]
- 9 Jung R E, Gasparovic C, Chavez R S, et al. Biochemical support for the “threshold” theory of creativity: A magnetic resonance spectroscopy study. *J neurosci*, 2009, 29: 5319–5325
- 10 Furnham A, Bachtar V. Personality and intelligence as predictors of creativity. *Personal Individ Diff*, 2008, 45: 613–617
- 11 Silvia P J. Another look at creativity and intelligence: Exploring higher-order models and probable confounds. *Personal Individ Diff*, 2008, 44: 1012–1021
- 12 Dang C P, Braeken J, Ferrer E, et al. Unitary or non-unitary nature of working memory? Evidence from its relation to general fluid and crystallized intelligence. *Intelligence*, 2012, 40: 499–508
- 13 Sanjana E N, Tenenbaum J B. Bayesian models of inductive generalization. In: Becker S, Thrun S, Obermayer K, eds. *Advances in the Neural Information Processing Systems*. Cambridge: MIT Press, 2002. 51–58
- 14 Aston-Jones G, Cohen J D. An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Ann Rev Neurosci*, 2005, 28: 403–450
- 15 Wood J N, Grafman J. Human prefrontal cortex: Processing and representational perspectives. *Nature Rev Neurosci*, 2003, 4: 139–147
- 16 Botvinick M M. Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cogn Affect Behav Ne*, 2007, 7: 356–366
- 17 Elliott R, Dolan R J. Activation of different anterior cingulate foci in association with hypothesis testing and response selection. *Neuroimage*, 1998, 8: 17–29
- 18 Kwon Y J, Lee J K, Shin D H, et al. Changes in brain activation induced by the training of hypothesis generation skills: An fmri study. *Brain Cog*, 2009, 69: 391–397
- 19 Li F, Cao B, Gao X, et al. Temporal course and the electrophysiological correlates of hypothesis testing as revealed in a modified category induction task. *Brain Res*, 2009, 1301: 61–67
- 20 Li F, Cao B, Lei Y, et al. Electrophysiological correlates of hypothesis testing. *Neuroreport*, 2009, 20: 197–201
- 21 Papo D, Douiri A, Bouchet F, et al. Time-frequency intracranial source localization of feedback-related eeg activity in hypothesis testing. *Cerebral Cortex*, 2007, 17: 1314–1322
- 22 Li F, Cao B, Luo Y, et al. Functional imaging of brain responses to different outcomes of hypothesis testing: Revealed in a category induction task. *Neuroimage*, 2013, 66: 368–375
- 23 Whitman J C, Metzack P D, Lavigne K M, et al. Functional connectivity in a frontoparietal network involving the dorsal anterior cingulate cortex underlies decisions to accept a hypothesis. *Neuropsychologia*, 2013, 51: 1132–1141
- 24 Shen W B, Liu C, Zhang X J, et al. The time course and hemispheric effect of “Insight” in three-character Chinese riddles task: An ERP study. *Acta Psychol Sin*, 2011, 43: 229–212 [沈汪兵, 刘昌, 张小将, 等. 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, 2011, 43: 229–212]
- 25 Sandkühler S, Bhattacharya J. Deconstructing insight: Eeg correlates of insightful problem solving. *PLoS One*, 2008, 3: e1459
- 26 Sheth B R, Sandkuhler S, Bhattacharya J. Posterior beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight. *J Cog Neurosci*, 2009, 21: 1269–1279
- 27 Bowden E M, Jung-Beeman M. Methods for investigating the neural components of insight. *Methods*, 2007, 42: 87–99

- 28 Kounios J, Fleck J I, Green D L, et al. The origins of insight in resting-state brain activity. *Neuropsychologia*, 2008, 46: 281–291
- 29 Luo J, Knoblich G. Studying insight problem solving with neuroscientific methods. *Methods*, 2007, 42: 77–86
- 30 Luo J, Niki K. Function of hippocampus in “insight” of problem solving. *Hippocampus*, 2003, 13: 316–323
- 31 Luo J. Neural correlates of insight. *Acta Psychol Sin*, 2004, 36: 219–234 [罗劲. 顿悟的大脑机制. *心理学报*, 2004, 36: 219–234]
- 32 Shen W B, Luo J, Liu C, et al. New advances in the neural correlates of insight: A decade in review of the insightful brain. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1497–1511
- 33 Li Q W. Cognitive evolution and second-generation cognitive science. *Acta Psychol Sin*, 2009, 40: 1306–1327 [李其维. “认知革命”与“第二代认知科学”刍议. *心理学报*, 2009, 40: 1306–1327]
- 34 Shen W B. Associative insight: A study on mind-body-brain mechanism. Doctoral Dissertation. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014 [沈汪兵. 联想类顿悟: 心-身-脑机制的联合研究. 博士学位论文. 南京: 南京师范大学, 2014]
- 35 Zhao Q, Zhou Z, Xu H, et al. Dynamic neural network of insight: A functional magnetic resonance imaging study on solving chinese “chengyu” riddles. *PLoS One*, 2013, 8: e59351
- 36 Zhao Q, Zhou Z, Xu H, et al. Neural pathway in the right hemisphere underlies verbal insight problem solving. *Neuroscience*, 2014, 256: 334–341
- 37 Jung-Beeman M, Bowden E M, Haberman J, et al. Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biol*, 2004, 2: E97
- 38 Kounios J, Frymiare J L, Bowden E M, et al. The prepared mind neural activity prior to problem presentation predicts subsequent solution by sudden insight. *Psychol Sci*, 2006, 17: 882–890
- 39 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
- 40 Luo J L, Li W F, Qiu J, et al. Neural basis of scientific innovation induced by heuristic prototype. *PLoS One*, 2013, 8: e49231
- 41 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
- 42 Qiu J, Zhang Q L. “Aha!” effects in a guessing chinese logograph task: An event-related potential study. *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 384–391
- 43 Luo J, Zhang X L. From the impasse to the breakthrough: The brain basis for insightful problem solving. *Adv Psychol Sci*, 2006, 14: 484–489 [罗劲, 张秀玲. 从困境到超越: 顿悟的脑机制研究. *心理科学进展*, 2006, 14: 484–489]
- 44 Qiu J, Zhang Q L. Neural correlates of prototype activation in insight during creative thinking. *Adv Psychol Sci*, 2011, 19: 312–317 [邱江, 张庆林. 创新思维中原型激活诱发顿悟的认知神经机制. *心理科学进展*, 2011, 19: 312–317]
- 45 Qiu J, Luo Y J, Wu Z Z, et al. A further study of the ERP effects of “Insight” in a riddle guessing task. *Acta Psychol Sin*, 2006, 38: 507–514 [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]
- 46 Shen W B, Liu C, Wang Y J. Neurophysiological basis of artistic creativity. *Adv Psychol Sci*, 2010, 18: 1520–1528 [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]
- 47 Shen W B, Liu C, Chen J J. Neural basis of creativity: Evidence from structural and functional imaging. *Adv Psychol Sci*, 2010, 18: 1420–1429 [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]
- 48 Mashal N, Faust M, Hendler T, et al. An fmri investigation of the neural correlates underlying the processing of novel metaphoric expressions. *Brain Lang*, 2007, 100: 115–126
- 49 Berkowitz A L, Ansari D. Generation of novel motor sequences: The neural correlates of musical improvisation. *Neuroimage*, 2008, 41: 535–543
- 50 de Manzano Ö, Ullén F. Activation and connectivity patterns of the presupplementary and dorsal premotor areas during free improvisation of melodies and rhythms. *Neuroimage*, 2012, 63: 272–280
- 51 Pinho A L, de Manzano Ö, Fransson P, et al. Connecting to create: Expertise in musical improvisation is associated with increased functional connectivity between premotor and prefrontal areas. *J Neurosci*, 2014, 34: 6156–6163
- 52 Liu S, Chow H M, Xu Y, et al. Neural correlates of lyrical improvisation: An fMRI study of freestyle rap. *Sci Rep*, 2012, 2: 1–8
- 53 Zhou L, Jiang C, Yang Y. Music and language: Comparative studies of syntactic cognition. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2674–2685
- 54 Limb C J, Braun A R. Neural substrates of spontaneous musical performance: An fMRI study of jazz improvisation. *PLoS One*, 2008, 3: e1679
- 55 Berkowitz A L, Ansari D. Expertise-related deactivation of the right temporoparietal junction during musical improvisation. *Neuroimage*, 2010, 49: 712–719
- 56 de Manzano Ö, Ullén F. Goal-independent mechanisms for free response generation: Creative and pseudo-random performance share neural substrates. *Neuroimage*, 2012, 59: 772–780

- 57 Wang Y L, Gu C H, Wu C F, et al. Brain mechanisms of creativity: Based on domain-general and domain-specific perspectives. *Psychol Res*, 2014, 7: 15–23 [王亚丽, 谷传华, 吴财付, 等. 创造性的脑神经机制: 基于领域一般性和领域特殊性的视角. *心理研究*, 2014, 7: 15–23]
- 58 Liu C L, Wang M, Zhang Q L. Neural mechanism of creative thinking. *Adv Psychol Sci*, 2009, 17: 106–111 [刘春雷, 王敏, 张庆林. 创造性思维的脑机制. *心理科学进展*, 2009, 17: 106–111]
- 59 Dietrich A, Kanso R. A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychol Bull*, 2010, 136: 822–848
- 60 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
- 61 Alexiou K, Zamenopoulos T, Johnson J H, et al. Exploring the neurological basis of design cognition using brain imaging: Some preliminary results. *Design Studies*, 2009, 30: 623–647
- 62 Kowatari Y, Lee S H, Yamamura H, et al. Neural networks involved in artistic creativity. *Hum Brain Mapp*, 2009, 30: 1678–1690
- 63 Ellamil M, Dobson C, Beeman M, et al. Evaluative and generative modes of thought during the creative process. *Neuroimage*, 2012, 59: 1783–1794
- 64 Fan L Y, Fan X F, Luo W C, et al. An explorative fMRI study of human creative thinking using a specially designed iCAD System. *Acta Psychol Sin*, 2014, 46: 427–436 [范亮艳, 范晓芳, 罗位超, 等. 艺术设计中创造性思维的fMRI研究: 一项基于智能CAD的探索. *心理学报*, 2014, 46: 427–436]
- 65 Green A E, Kraemer D J M, Fugelsang J A, et al. Connecting long distance: Semantic distance in analogical reasoning modulates frontopolar cortex activity. *Cerebral Cortex*, 2010, 20: 70–76
- 66 Green A E, Kraemer D J, Fugelsang J A, et al. Neural correlates of creativity in analogical reasoning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2012, 38: 264–272
- 67 Abraham A, Beudt S, Ott D V M, et al. Creative cognition and the brain: Dissociations between frontal, parietal-temporal and basal ganglia groups. *Brain Res*, 2012, 1482: 55–70
- 68 Mai X Q, Luo J, Wu J H, et al. “Aha!” Effects in a guessing riddle task: An event-related potential study. *Hum Brain Mapp*, 2004, 22: 261–270
- 69 Goel V, Vartanian O. Dissociating the roles of right ventral lateral and dorsal lateral prefrontal cortex in generation and maintenance of hypotheses in set-shift problems. *Cerebral Cortex*, 2005, 15: 1170–1177
- 70 Drago V, Foster P, Okun M, et al. Artistic creativity and dbs: A case report. *J Neurol Sci*, 2009, 276: 138–142
- 71 Longe O, Maratos F A, Gilbert P, et al. Having a word with yourself: Neural correlates of self-criticism and self-reassurance. *Neuroimage*, 2010, 49: 1849–1856
- 72 Blair K, Shaywitz J, Smith B, et al. Response to emotional expressions in generalized social phobia and generalized anxiety disorder: Evidence for separate disorders. *Am J Psychiatry*, 2008, 165: 1193–1202
- 73 Hooley J M, Gruber S A, Scott L A, et al. Activation in dorsolateral prefrontal cortex in response to maternal criticism and praise in recovered depressed and healthy control participants. *Biol Psychiatry*, 2005, 57: 809–812
- 74 Miller E K, Cohen J D. An integrative theory of prefrontal cortex function. *Ann Rev Neurosci*, 2001, 24: 167–202
- 75 Tanji J, Hoshi E. Role of the lateral prefrontal cortex in executive behavioral control. *Physiol Rev*, 2008, 88: 37–57
- 76 Naghavi H R, Nyberg L. Common fronto-parietal activity in attention, memory, and consciousness: Shared demands on integration? *Conscious Cogn*, 2005, 14: 390–425
- 77 Meeks T W, Jeste D V. Neurobiology of wisdom: A literature overview. *Arch Gen Psychiatry*, 2009, 66: 355–365
- 78 Strotzer M. One century of brain mapping using brodmann areas. *Clin Neuroradiol*, 2009, 19: 179–186
- 79 Guillery R W, Sherman S M. Branched thalamic afferents: What are the messages that they relay to the cortex? *Brain Res Rev*, 2011, 66: 205–219
- 80 Sherman S M, Guillery R W. The role of the thalamus in the flow of information to the cortex. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2002, 357: 1695–1708
- 81 Sherman S M. Thalamocortical interactions. *Curr Opin Neurobiol*, 2012, 22: 575–579
- 82 Culham J C, Valyear K F. Human parietal cortex in action. *Curr Opin Neurobiol*, 2006, 16: 205–212
- 83 Culham J C, Kanwisher N G. Neuroimaging of cognitive functions in human parietal cortex. *Curr Opin Neurobiol*, 2001, 11: 157–163
- 84 Andersen R A. Multimodal integration for the representation of space in the posterior parietal cortex. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 1997, 352: 1421–1428
- 85 Simmonds D J, Pekar J J, Mostofsky S H. Meta-analysis of go/no-go tasks demonstrating that fmri activation associated with response inhibition is task-dependent. *Neuropsychologia*, 2008, 46: 224–232

- 86 Olson I R, Berryhill M. Some surprising findings on the involvement of the parietal lobe in human memory. *Neurobiol Learn Mem*, 2009, 91: 155–165
- 87 Yang S Y. A process view of wisdom. *J Adult Dev*, 2008, 15: 62–75
- 88 Li W F, Li X T, Huang L J, et al. Brain structure links trait creativity to openness to experience. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2015, 10: 191–198
- 89 Laidlaw K. Are attitudes to ageing and wisdom enhancement legitimate targets for CBT for late life depression and anxiety? *Nordic Psychol*, 2010, 62: 27–42
- 90 Sternberg R J. Intelligence, wisdom, and creativity: Three is better than one. *Edu Psychol*, 1986, 21: 175–190
- 91 McKenna B, Rooney D, Boal K B. Wisdom principles as a meta-theoretical basis for evaluating leadership. *Leadersh Q*, 2009, 20: 177–190
- 92 Sternberg R J. A balance theory of wisdom. *Rev Gen Psychol*, 1998, 2: 347–365
- 93 Liu C, Shen W B, Luo J. A positive association between creativity and morality: Evidence from cognitive neuroscience. *J Nanjing Norm Univ (Soc Sci)*, 2014, 194: 104–115 [刘昌, 沈汪兵, 罗劲. 创造性与道德的正向关联:来自认知神经科学的研究证据. 南京师大学报(社科版), 2014, 194: 104–115]
- 94 Yang Z F, Lin S D. A construct validity study of Zhong Yong conceptualization. *Sociol Stud*, 2012, 27: 167–186 [杨中芳, 林升栋. 中庸实践思维体系构念图的建构效度研究. 社会学研究, 2012, 27: 167–186]

## Neural basis underlying creative essentials of wisdom

SHEN WangBing<sup>1,2</sup>, YUAN Yuan<sup>2</sup>, LUO Jing<sup>3,4</sup> & LIU Chang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Psychology and School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China;*

<sup>2</sup>*School of Psychology and Lab of Cognitive Neuroscience, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;*

<sup>3</sup>*Beijing Key Laboratory of Learning and Cognition, Capital Normal University, Beijing 100083, China;*

<sup>4</sup>*Key Laboratory of Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

Wisdom is an extremely important multidimensional issue, which not only reflects the pursuit of a better life and improvement in quality of life, but also enhances cultural development and human civilization. Creative intelligence or creative thinking, which is the main creative element of wisdom, is thought to consist of hypothesis testing, insight, novel design, and set-criticizing. Theoretical and empirical studies on the notion of wisdom have shown that creative intelligence research could largely reveal the nature and cognitive mechanism of wisdom. Existing studies on this issue have shown that hypothesis testing is mainly activated in the bilateral frontal regions, anterior cingulate cortex, cerebellum, and thalamus. Insight thinking is primarily associated with prefrontal regions, anterior cingulate gyrus, temporal regions, inferior parietal lobule, and the cerebellum. Novel design is mainly associated with activation in the temporal regions, anterior cingulate cortex, prefrontal cortex, and thalamus, whereas set-shift and critical thinking mostly involves the right prefrontal regions, anterior cingulate cortex, and thalamus. These results consistently suggest that human wisdom is closely correlated at the neural level with prefrontal regions, anterior cingulate cortex, temporal lobe, inferior parietal lobule, and the thalamus. Given the well-established concept of wisdom, future studies should combine appropriate paradigms and multidisciplinary methods with excellent resolution to directly investigate the neural basis and cognitive process underlying wisdom.

**wisdom, creative intelligence, creativity, neural basis, cognitive neuroscience**

doi: 10.1360/N972014-01155