创造性的大脑网络连接特征与研究展望

何李[†], 李彧[†], 庄恺祥, 陈群林, 孙江洲, 杨文静, 位东涛, 邱江^{*}

西南大学心理学部, 认知与人格教育部重点实验室, 重庆 400715

[†] 同等贡献

^{*} 联系人, E-mail: qiujiang318@swu.edu.cn

2019-08-17 收稿, 2019-11-05 修回, 2019-11-05 接受, 2019-11-06 网络版发表

国家自然科学基金(31571137, 31771231)和“长江学者奖励计划”青年学者项目(Q2017173)资助

摘要 创造性是人类智慧的重要体现, 其复杂的认知加工依赖于多个脑区的相互作用而非受单一脑区的调控. 人脑连接组学的发展为深入揭示创造性的脑网络基础提供了可能, 创造性的脑机制研究也正逐渐从局部脑区拓展到脑网络连接层面. 功能网络研究表明, 默认网络、突显网络、额顶控制网络的协作模式在创造性思维各阶段发生着动态变化; 这些网络在静息状态下的功能协作也与创造性有密切联系, 高创造性个体的大脑自发性神经活动具有灵活易变的特点. 结构网络的证据进一步确认了默认网络与额顶控制网络分别负责不同类型的创造性认知能力, 如远距离概念的检索生成与组合评估. 基于创造性思维的双加工模型, 已有研究认为, 默认网络主要通过自发性联想在记忆系统中检索和提取新颖信息, 控制网络负责根据任务要求对当前观点进行评估和选择, 突显网络可能根据联想内容的新颖性负责默认网络和控制网络之间的灵活转换. 未来研究需要不断整合创造性领域的资源, 确定创造性的主要成分及对应的测评工具, 结合多模态脑影像揭示创造性的功能网络动态协作模式及结构网络的独特作用, 并利用多组学多模态的大数据优势实现对个体创造性水平的精准预测评估, 探索创造性培养的有效途径和大脑可塑性机制.

关键词 创造性, 发散思维, 脑网络, 功能连接, 多模态, 预测评估

从飞鸽传书到无线通信、从传统马车到磁悬浮列车, 每一次文明与科技的跨越都是一部人类的创造史. 创造性(creativity), 也称创造力, 是产生新颖独特且适宜实用的想法或产品的能力^[1~3]. 一般而言, 创造性主要包括创造性思维、创造性人格、创造性行为、创造性成就等方面, 其中创造性思维通常被视为创造性的核心^[4], 得到了众多研究者的广泛探索, 本文也主要聚焦于此.

理解脑进而优化脑, 认知神经科学的发展为创造性这样一个复杂的心理现象走出“黑匣子”提供了有力支持, 探明其大脑机制, 可为创新素质培养方案的制

定、创新人才的选拔评估等, 提供重要的科学依据. 近年来, 研究者实现了从多个尺度对脑网络进行绘制与建模^[5,6], 并拓展到运动学习^[7]、言语加工^[8]、执行控制^[9]、创造性^[10]等领域, 为理解诸多认知功能提供了新见解. 创造性思维作为人类智慧的高级表现^[11], 其神经基础也可能并不局限于单一脑区, 而是涉及多个脑区、多个脑网络的动态协作^[12,13]. 因此有必要从脑网络的视角重新审视创造性思维的神经基础, 为理解创造性的本质提供更深入的洞察. 本文简要回顾了局部脑区层面有关创造性思维的脑结构与功能基础, 从静态和动态的角度详细阐述与创造性思维密切相关的脑

引用格式: 何李, 李彧, 庄恺祥, 等. 创造性的大脑网络连接特征与研究展望. 科学通报, 2020, 65: 25–36

He L, Li Y, Zhuang K X, et al. Network connectivity of the creative brain: Current knowledge and future directions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 25–36, doi: [10.1360/TB-2019-0112](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0112)

功能与结构网络连接, 基于当前的研究现状提出未来的研究展望。

1 创造性的脑结构与功能基础

早期研究主要关注了发散思维、顿悟问题解决、远距离联想等创造性思维任务引起的大脑局部活动, 国内研究者已对该主题进行了全面的评述^[4,14-16]。不难发现, 创造性思维过程需要多个脑区参与, 而且特定任务所涉及的关键脑区存在异同。在发散思维方面, 一项采用激活似然估计的任务态元分析揭示了背外侧前额叶、楔前叶、前扣带皮层、梭状回以及颞中回等区域在发散思维任务中有稳定的激活^[17]。这些脑区通常也是“顿悟脑”(insightful brain)的组成部分, 分别负责如思维定式打破和问题表征转换等不同的认知功能^[16]。另外, 随着国内外创造性的多模态影像数据库不断建立, 研究者逐步开始利用较大样本来考察与创造性相关的大脑结构与功能基础。在脑结构方面, 基于体素形态学和基于皮层形态学的分析, 均发现创造性的不同方面, 如言语与视觉发散思维能力、远距离联想能力、创造性成就、日常创造性行为、创造性倾向等分别与特定脑区的结构特征有密切联系(如额下回的灰质体积、额中回的皮层厚度等)^[18-23]。在脑功能方面, 研究者同样发现特定区域(如楔前叶、颞中回等)的局部一致性、分数低频波动振幅等功能属性与创造性思维有显著关联^[24-26]。总的来看, 上述研究分别从功能定位和心脑关联的角度揭示了创造性思维所涉及的特定核心脑区, 其广泛分布在外侧额叶、后顶叶皮层、扣带回、外侧颞叶以及海马等区域, 表明创造性并不依赖于单一脑区的作用, 而是多个功能区域相互作用、相互协调的结果。由此而引申出的问题是: 哪些功能区的协作是创造性所需的? 大脑如何表征这些认知功能的整合过程? 对这类问题的解答得益于人脑连接组学的迅速发展^[27,28]。诸多研究从不同角度揭示了创造性涉及的多脑区、多网络的协作模式, 摆脱了以往仅关注局部脑区的束缚, 从脑网络的视角进一步加深了对创造性神经基础的理解, 为创造性领域相关理论的检验、修正以及发展提供了有力的证据。

2 创造性的大脑功能网络基础

2.1 静态功能网络

网络由节点和连边构成。在大尺度脑网络中, 节点

通常由先验模板或独立成分分析确定的脑区来定义, 如图1展示了Power等人^[29]定义的大尺度功能网络。连边则依赖于特定的影像模态。在功能像中, 每个体素都包含一串时间序列, 代表该区域的血氧水平依赖随时间的变化, 通常将两个脑区时间序列的相关值作为功能网络的连边, 即功能连接。根据相关系数的正负还可以进一步将功能连接区分为功能协同或功能拮抗, 这对于理解创造性思维中核心脑区彼此间的作用模式至关重要。该领域的研究率先从静态的角度展开, 初步揭示了大脑功能网络中与创造性相关的重要连接特征。

创造性的双加工模型指出创造性思维包含两个不同的认知过程: 想法产生和想法评估。前者依赖于自发性的思维过程, 基于记忆系统或利用已有知识产生大量的探索性想法; 后者需要控制加工对想法的新颖性和适宜性进行评价、修正, 过滤掉无意义的答案^[30,31]。这两个过程循环往复, 共同支持了创造性产品的产出。但所知甚少的是不同功能网络和大脑区域对想法产生和评估过程是否有着不同的贡献? 基于该理论模型, 在一项视觉艺术设计的实验中, Ellamil等人^[32]通过实验条件的设定区分了这两个认知过程, 并很好地回答了该问题。在想法产生条件下, 被试需要根据任务描述在与磁共振兼容的绘画板上绘制书籍封面的插图; 在评

图1 (网络版彩色)Power模板定义的大尺度功能脑网络分区^[29]。SMH, 感觉运动网络(sensory/somatomotor hand network, 或SMM (sensory/somatomotor mouth network)); COTC, 扣带盖任务控制网络(cingulo-opercular task control network); DMN, 默认网络(default mode network); FPN, 额顶任务控制网络(fronto-parietal task control network); SN, 突显网络(salience network); Sub, 皮下网络(subcortical network); VAN, 腹侧注意网络(ventral attention network); DAN, 背侧注意网络(dorsal attention network); L, 左半球(left hemisphere); R, 右半球(right hemisphere)

Figure 1 (Color online) The parcellation of large-scale functional brain network defined by Power's template^[29]. SMH, sensory/somatomotor hand network; SMM, sensory/somatomotor mouth network; COTC, cingulo-opercular task control network; DMN, default mode network; FPN, fronto-parietal task control network; SN, salience network; Sub, subcortical network; VAN, ventral attention network; DAN, dorsal attention network; L, left hemisphere; R, right hemisphere

估条件下,被试需要写下对产生阶段想法的评价。结果发现,产生阶段伴随着默认网络子区(内侧颞叶、海马、海马旁回)更强的激活,评估阶段则引起了额顶控制网络子区(背外侧前额叶、背侧前扣带)和默认网络子区(内侧前额叶、后扣带回、楔前叶、颞顶联合区)的共同激活,初步揭示了创造性思维过程中想法产生和想法评估各自特异的神经基础。有趣的是,以往研究通常认为默认网络与额顶控制网络是功能拮抗的关系,一个网络的活动往往伴随着另一个网络的抑制^[33]。默认网络活跃在内部定向加工或清醒的静息状态下,其主要的认知功能与自发性思维有关,如思维漫游、自传体记忆、自我参照加工、观点采择、未来情景想象等^[34-36]。与之相反的是,在外部目标定向的任务中,如抑制控制、工作记忆等,该网络处于失活状态,这与额顶控制网络的激活正好相反。但这两个相互拮抗的网络却在创造性认知加工中表现出共同的激活,彼此间还拥有显著的正向功能连接,意味着创造性思维涉及一种独特的神经加工模式。由默认网络负责的自下而上的自发性联想有助于产生新颖的联结,同时也需要额顶控制网络自上而下地对常规观点以及无意义的答案进行抑制和过滤。

通过视觉艺术创作任务寻找到的神经加工模式是否适用于创造性思维的其他领域?另有研究者采用新颖动词生成任务(verb generation task)来考察言语发散思维引起的脑网络连接模式^[37]。被试需要根据一个名词报告与之相关的新颖的动词,研究者对名词的语义束缚水平进行了操纵。在高语义束缚条件下,被试首先需要学习名词-动词对来加强语义联结,从而实现对名词较高的语义限制,使其很难联想到其他新颖的动词;没有出现在学习阶段的名词作为低语义束缚条件。另外,基线条件被设定为根据学习过的名词回忆与之相匹配的动词。结果显示,在高束缚条件下,名词与动词的语义距离(通过潜在语义分析量化)显著低于低束缚条件,而且伴随着默认网络(后扣带回、角回)、突显网络(前脑岛)、额顶控制网络(背外侧前额叶)部分区域更强的激活。另外,基于独立成分分析的功能连接结果还显示,高低束缚条件均引起了默认网络与额顶控制网络、默认网络与突显网络的连接增强;相比于低束缚条件,高束缚条件尤其增强了默认网络与额顶控制网络的连接。这些结果表明,控制加工有助于抑制优势的语义反应,并与自发性的思维过程相互协作,进而促进从记忆系统中提取远距离的新颖概念。由此可见,

默认网络与额顶控制网络的功能协作均参与了言语与视觉创造性思维过程。

考虑到上述研究样本均为成年早期个体,发散思维引起的脑网络连接变化可能具有年龄特异性。尤其是进入老年期后,流体智力下降明显,晶体智力仍在平缓发展,为了检验认知老化对上述发现的潜在影响,Adnan等人^[38]招募了青年组和老年组,被试均完成相同的一物多用任务(alternative uses task, AUT)。结果发现,老年组在进行发散思维任务时,默认网络与额顶控制网络、默认网络与突显网络的功能连接均显著强于青年组;虽然老年组与青年组在AUT任务上的创造性表现无显著差异,但网络的全局效率(图论中一种功能整合指标,代表整个网络的信息传输效率)仅与老年组的创造性表现有正相关关系。该结果表明,发散思维所涉及的大尺度脑网络连接特征在不同年龄群体中大体相同,但连接强度存在差异。老年人在问题解决时更依赖于已有的知识经验,意味着在发散思维任务中产生新颖的观点时,需要更强的抑制控制来摆脱已经连接稳固的概念,默认网络与额顶控制网络更好的协作可能支持了这一认知过程。

与上述任务态研究不同的是,静息态研究无法揭示创造性思维过程引起的脑网络连接变化,但人脑在静息状态下的基础代谢达到了人体总能耗的20%左右^[39],且产生的自发性神经活动表现出稳定的个体差异。另外,离线的行为测试不受核磁环境的约束并且可以同时施测多个任务,这适合从心脑关联的角度利用较大样本寻找与创造性相关的网络连接特征。有研究者借助AUT等任务区分了高低言语发散思维个体,发现高分组被试在默认网络与额顶控制网络子区(额下回)之间有更强的功能连接^[40]。考虑到言语和视觉是发散思维的两个特定领域,为了进一步澄清其功能网络基础的一般性和特异性,Zhu等人^[41]利用托兰斯创造性思维测验分别考察了言语和视觉发散思维的静息态功能网络连接模式。结果显示,言语和视觉发散思维均与默认网络内和额顶控制网络内的功能连接强度呈负相关,同时也与默认网络和额顶控制网络间的功能连接强度呈正相关。但涉及的网络子成分有所区别,如言语发散思维与前部默认网络和右侧额顶网络的功能连接正相关,视觉发散思维则与后部默认网络和左侧额顶网络的功能连接正相关。由此可见,发散思维的功能网络基础存在着领域特殊性和领域一般性。

由于以往对创造性的功能网络研究多借助单一的

功能模式, 要么利用任务态或是利用静息态, 可能会造成研究结果的片面性. 因此Shi等人^[42]最近开展了一项整合性研究, 利用70名大学生的静息态和AUT任务态数据, 基于独立成分分析的功能连接结果显示, 与物体典型特征相比(控制条件), 新颖用途条件引起了后部默认网络与右侧额顶控制网络间更强的功能连接, 以及左右侧额顶控制网络间更弱的功能连接; 静息态的结果还显示前部默认网络与左侧额顶控制网络间的功能连接与个体独创性得分有显著正相关. 该研究首次整合了两种功能影像数据, 揭示了创造性思维受益于默认网络与额顶控制网络间的协作而非额顶控制网络内的协作. 此外, Beaty等人^[10]还整合了多中心-多站点的数据资源对个体创造性思维进行了一系列预测分析. 该研究利用163名被试的AUT任务态数据构建了新颖用途条件下的全脑功能连接, 基于脑功能连接组的预测模型(connectome-based predictive modeling), 找到了高低创造性网络. 其中高创造性网络表现出较为稠密的连接, 主要分布在默认网络、额顶控制网络和突显网络中; 低创造性网络则表现出较为稀疏的连接, 零散地分布在皮下网络、小脑和默认网络中(图2). 研究者还借助另外两个发散思维任务态样本和一个静息态样本进行外部验证, 发现只有高创造性网络可以稳定地预测个体的发散思维能力, 但无法预测流体智力. 表明该网络涵盖了创造性思维的重要连接特征, 而且可能特异于包括流体智力在内的其他高级认知能力.

尽管任务态和静息态的证据均支持了创造性思维与默认网络和额顶控制网络功能连接的增强有关, 但尚不清楚的是这种连接强度的变化是否会引起网络拓扑属性的改变, 并是否进一步影响功能网络的信息传输效率? Jiao等人^[43]最近的研究很好地回答了该问题. 研究者借助托兰斯创造性思维图形测验区分了高低创造性个体, 运用图论分析, 发现高创造性个体的静息态功能网络表现出更高的全局效率和更短的路径长度, 而且在预测个体的创造性思维表现时, 默认网络内节点的拓扑属性(如介数中心度和节点效率)更具优势, 这些拓扑属性的变化意味着高创造性个体的功能网络在信息传输上更高效^[43].

综上, 在静态功能网络视角下, 任务态与静息态的脑影像研究证据揭示了与创造性思维(尤其是发散思维)密切相关的重要连接特征, 主要包括默认网络、额顶控制网络, 突显网络及其核心脑区的功能连接, 体现了创造性认知加工的复杂性, 涉及多个脑区、脑网络

图2 (网络版彩色)高低创造性的大脑功能网络连接特征^[10]. (a) 通过圆环图展示高低创造性的大脑网络连接; (b) 高低创造性网络连接在大脑上的映射, 节点的大小代表该节点的连边数量. 左半球, left hemisphere(L); 右半球, right hemisphere(R)

Figure 2 (Color online) Connectivity characteristics of the high- and low-creative brain functional networks^[10]. (a) Circle plots show the high-creative network and low-creative network; (b) glass brains show the high-creative network and low-creative network, the size of the sphere indicates the number of edges emanating from that node. L, left hemisphere; R, right hemisphere

的功能协作. 而且这种特定的协作模式与整个网络拓扑属性的改变有关, 可能使得高创造性个体更容易摆脱已形成的稳固的语义联结, 在产生新颖观点时更具优势. 另外, 默认网络和额顶控制网络不同子区的功能连接在言语与视觉创造性领域以及不同年龄群体间还具有一般性和特异性表现. 尽管上述研究为深入理解创造性的神经基础提供了新的启示, 但距离清楚地阐明各个网络及其子区的连接与创造性不同认知成分的关系仍有一定的差距, 这也是未来研究需要着力解决的问题.

2.2 动态功能网络

尽管上述静态的研究揭示了与创造性密切相关的几个核心网络, 但由于静态的研究视角是将创造性思维过程作为一个整体, 忽视了思维过程本身的阶段性, 无法揭示创造性认知加工各阶段特异的功能网络连接模式, 尤其是默认网络、突显网络、额顶控制网络之间的动态协作, 因此当前研究正逐步向动态的视角拓展. Beaty等人^[44]率先开展了这方面的研究, 通过将AUT任务中产生新颖物体用途与产生物体典型特征的时长设定为6个TR共12 s, 在每个TR上进行新颖用途条件与典型特征条件的对比分析, 以此来考察创造性思

维过程中各脑区间的动态交互。结果发现,以默认网络核心节点(后扣带回)为种子点,新颖用途任务前期伴随着后扣带回和突显网络(双侧脑岛)更强的功能连接,但在任务后期该连接并不显著,而是伴随着后扣带回和额顶控制网络(背外侧前额叶、前运动皮层等)更强的功能连接;类似地,以背外侧前额叶为种子点,新颖用途任务前期没有引起该节点与其他脑区显著的功能连接,但任务后期伴随着该节点与默认网络(后扣带回、顶下小叶、颞极)更强的功能连接。该研究首次揭示了创造性思维过程中功能网络连接模式的动态变化,尤其是默认网络与突显网络、默认网络与额顶控制网络的功能协作分别支持了发散思维任务的前后阶段。突显网络在识别外部刺激、整合感觉信息以及调控内外外部定向的认知加工上发挥着重要作用^[45],意味着任务前期的想法产生阶段不仅需要默认网络主导的自发性联想,还涉及突显网络对联想内容的新颖性检测。突显网络可能还根据检测结果来介导功能网络的活动,实现默认网络与额顶控制网络在任务后期的想法评估阶段的灵活转换,例如当所产生观点新颖性不足时切换到额顶控制网络对其抑制,同时又增强默认网络的活动来产生更具创造性的观点,进而促进默认网络和额顶控制网络更好的协作。

考虑到创造性认知加工的复杂性以及尚缺乏更精巧的实验设计来准确分离创造性思维的发生过程,因此有研究者倾向于利用静息态数据,从个体差异角度探索功能网络连接的动态属性与创造性的关系。研究表明,大脑静息状态下的自发性神经活动并不是固定不变的,而是随着时间发生规律性的动态变化^[46]。同时由于静息态不受任务设计的限制,可以较好地开展动态功能网络分析。基于个体差异的视角,高低创造性个体表现出独特的认知能力,如能进行广泛的记忆检索和灵活的思维模式转换,更容易在远距离概念之间建立新颖独特的语义联结,这些个体差异可能意味着高创造性个体的静息态功能网络有着更多的动态交互。最近, Sun等人^[13]利用两个独立样本证实了这一猜想。基于滑动时间窗方法构建的功能连接矩阵,研究者将脑网络在不同时间窗口之间的功能连接进行向量化并计算皮尔逊相关,用数值1与相关系数之差表示该网络的功能连接模式的变化程度,也称时变性(temporal variability),其值越高代表功能连接模式的改变越大,通过与言语创造性得分(托兰斯创造性思维言语测验)进行关联分析。结果显示,默认网络内、默认网络与注

意网络间、控制网络与视听网络间以及全脑的功能连接时变性均与言语创造性呈显著正相关(图3)。结果证实了静息态下功能网络连接模式的动态变化与创造性思维有密切联系,提示高创造性个体的大脑自发性神经活动具有灵活易变的特点,可能有助于个体通过盲目变异在已有概念间建立更多的新颖联结,使创造性思维从中获益。

Li等人^[47]揭示了视觉创造性思维同样具有特定的动态功能网络连接基础。研究者借助托兰斯创造性思维图形测验将被试区分为高低创造性组,并利用滑动时间窗和K-means聚类的方法,根据所有时间窗口下的功能连接模式将功能连接矩阵聚类为4个连接状态,再在个体水平计算了状态之间的切换频率。结果发现,高分组的状态切换频率显著高于低分组,而且状态切换频率还与创造性得分呈显著正相关,意味着高创造性个体的动态功能网络连接不会僵化在固有的模式中,使得大脑可以跨越多个子网络进行灵活的信息交汇与整合,可能有助于创意思法的产出。

另外,开放性作为一种主要的创造性人格特质,其特点是偏爱想象、创造和抽象思维,以及对新事物的好奇和积极探索陌生的环境等,而且可以显著预测创造性思维、创造性行为与成就等方面。这种在高创造性个体身上所突出的人格特质可能也拥有与创造性思维类似的动态功能网络基础, Beaty等人^[48]利用两个独立样本对该问题进行了探索。同样运用滑动时间窗和K-means聚类的方法,研究者将所有时间窗口下的功能连接矩阵聚类为5个状态,每个状态对应着各自特异的功能网络连接模式。通过将开放性得分与每个状态的持续时间进行关联分析,结果发现开放性仅与其中一个状态的出现时长有显著正相关。在该状态中,默认网络、额顶控制网络、突显网络以及背侧注意网络之间均有积极的正向连接,而且在控制了流体智力与大五人格其他维度后,该结果在另外的独立样本上得到了重复验证^[48],表明与创造性思维密切相关的功能网络连接对创造性人格而言同样重要。

总的来说,上述研究从个体差异的角度发现了创造性思维和创造性人格均与功能网络的动态活动有密切联系,尤其体现在默认网络、额顶控制网络、突显网络以及注意网络所组成功能网络及其动态属性上,揭示了高创造性个体的大脑自发性神经活动具有灵活易变的特点。另外,还发现了创造性认知加工过程涉及功能网络连接模式的动态变化。默认网络与突显网络

图3 (网络版彩色)脑网络间的功能连接时变性与创造性思维显著相关^[13]。(a) 网络内功能连接时变性的计算; (b) 网络间功能连接时变性的计算; (c) 雷达图展示了创造性思维分数与网络间功能连接时变性的相关系数

Figure 3 (Color online) The temporal variability of functional connectivity between brain networks is significantly correlated with creative thinking^[13]. (a) The calculation of the temporal variability of functional connectivity within a network; (b) the calculation of the temporal variability of functional connectivity between two networks; (c) the radar map shows the correlation coefficients of the between-network variability with the creative thinking score

的功能协作支持了创意思想产生阶段, 评估阶段则涉及默认网络与额顶控制网络的功能协作, 突显网络可能还介导了默认网络和额顶控制网络的活动, 进而实现二者的灵活转换。总的来说, 动态视角下的研究为理解创造性的神经基础提供了新的证据, 尤其是通过心脑关联较深入地探索了静息状态下的动态功能网络活动与创造性的关系, 但还缺乏更有力的证据来清楚阐明功能网络在创造性思维过程中的动态协作模式, 这对于澄清创造性思维的相关理论设想至关重要。因此, 创造性思维理论模型的引入(如华莱士的四阶段论)、精巧实验设计的开发(如更好分离各个认知阶段), 以及动态分析方法的应用(如隐马尔可夫模型)等都是需要拓展的研究方向。

3 创造性的大脑结构网络基础

大脑结构是功能的基础, 大脑功能是结构的表征^[49,50], 寻找与创造性相关的结构网络特征可进一步丰富对创造性神经基础的认识。与功能网络不同, 结构网络的连边通常由灰质体积、皮层厚度的形态学相关性以及白质纤维的连接数量、概率等方式来定义。如

Ryman等人^[51]通过确定性纤维追踪算法构建了个体水平的白质结构网络, 并借助言语和图形创造性思维测验考察了网络拓扑属性与综合创造性表现的关系的性别交互作用。结果发现, 女性创造性得分与全脑连接强度有较强的负相关性, 男性则表现出较弱的正相关; 另外, 高创造性女性在默认网络和执行控制网络的广泛区域上拥有更弱的连接强度、更低的节点效率和集聚系数, 而高创造性男性在较少脑区上表现出相反的趋势。该结果表明, 女性的创造性思维表现需要招募较多脑区参与, 但是以牺牲信息传输效率为代价; 相比之下, 较少脑区之间更直接的联系和更好的局部信息处理能力支持了男性的创造性思维表现。这也印证了以往研究中有关两性在执行创造性思维任务时的大脑活动模式的差异: 女性遵循从局部脑区活动到左右半球协同活动的加工模式, 男性与之相反, 表现出先整体后局部的加工模式^[52]。这些活动规律提示研究者需要重视创造性思维脑机制的性别差异及其性别与其他因素可能存在的交互作用, 这对于创造性研究领域的深入以及开发个性化的创造性培养方案具有指导意义。

由于上述个体差异的脑影像研究均为横断研究,

较难推断因果关系, Chen等人^[53]率先开展了预测创造性思维发展的纵向研究, 填补了这方面的空白. 基于西南大学公开共享的大学生纵向发展脑影像数据库^[54], 研究者利用159名大学生入学时和毕业时的发散思维分数以及大脑结构影像, 通过纵向预测分析, 发现背外侧前额叶的灰质密度可以预测个体3年后的发散思维分数, 而且额颞、额顶网络灰质密度的萎缩速度越慢越有利于个体发散思维发展^[53]. 该研究首次从纵向追踪的角度揭示了发散思维发展的脑结构网络基础, 并寻找到了预测发散思维发展的特定结构网络和客观的脑影像标记. 根据脑发育的基本规律, 最优的大脑结构出现在青少年晚期与成年早期的过渡阶段^[55], 随着年龄增大, 大脑结构开始出现萎缩趋势, 但发散思维仍然在稳步发展. 灰质密度的缓慢减少可能是发散思维发展的前提, 尤其体现在额颞、额顶网络上, 表明二者各自负责的语义检索与加工、想法评估与抑制控制等认知功能的完好性对发散思维发展尤为重要.

另外, 最近的一项脑损伤研究为创造性思维的结构网络定位提供了更有力的因果证据. 根据创造性的联想理论, Mednick^[56]认为创造性是将遥远的概念整合为新颖有用的组合, 并据此开发了远距离联想测验. Bendetowicz等人^[57]进一步将远距离联想所涉及的认知能力细分为自发性的语义联想、远距离概念的产生、远距离概念的组合, 并采集了29名额叶损伤患者的行为与影像数据. 结果发现, 默认网络核心区域(内侧前额叶)受损影响了远距离概念产生的能力; 额顶控制网络核心区域(背外侧前额叶)受损并未影响远距离概念的产生, 但削弱了对远距离概念进行适当组合的能力^[57]. 该结果提供的因果证据支持了默认网络和额顶控制网络作为创造性思维的关键神经基础, 并成功分离出各自负责的认知功能. 其中, 默认网络受损可能改变了个体在记忆系统中的检索策略或语义内容的存储结构, 使得联想内容固着在与线索词高度关联的内容上而无法通达到语义距离更远的概念. 额顶控制网络可能与联想内容产生无关, 而是负责将远距离联想内容组合成符合任务要求的想法, 并评估这种适宜性. 对创造性思维而言, 两者缺一不可.

基于目前仅有的几项关于创造性的结构网络研究, 不难发现研究结果大都指向了默认网络和额顶控制网络及其核心区域, 这与功能网络的研究结果相吻合. 难能可贵的是, 上述研究涉及纵向追踪、创造性认知成分分离与脑损伤功能定位, 为揭示创造性的结构网络

基础提供了有力的因果证据.

4 总结与展望

创造性作为人类智慧的重要体现, 吸引着众多研究者不断探索其本质, 但由于创造性认知加工的复杂性使得澄清其神经机制受到了很大限制. 基于任务态的激活已让研究者认识到创造性并不是单一脑区作用的结果, 而是依赖于多个功能区的相互作用、相互协调, 但对这种复杂协作模式的认识和探讨在很长时间里始终停留在理论层面, 直到脑网络研究的迅速发展. 通过量化脑区间或脑网络间的交互模式(如功能协作或功能拮抗), 才真正为探明创造性的脑网络连接基础提供了可能, 为揭示创造性的神经机制提供新的启示. 总的来说, 结合静态和动态功能网络的研究结果, 创造性思维主要涉及默认网络、额顶控制网络以及突显网络的功能协作, 而且网络间的协作模式在创造性思维过程中发生着动态变化. 高创造性个体的大脑自发性神经活动还具有灵活易变的特点; 来自结构网络的证据同样支持了默认网络和额顶控制网络在创造性思维中的重要作用, 而且脑损伤研究还进一步确认了这两个网络分别负责不同类型的创造性认知能力, 如远距离概念的检索生成与组合评估. 尽管以往研究认为默认网络和额顶控制网络的活动是相互拮抗的关系, 但创造性思维却需要二者的协作^[44]. 基于创造性思维的双加工模型, 当前研究者普遍认为创意思想的产生需要在记忆系统中检索和提取新颖的信息, 主要由默认网络负责; 也需要对不恰当的优势反应进行抑制或修正, 主要由控制网络负责^[12]. 同时这样的一个过程是循环往复的, 在产生最佳的创意思想之前通常已摒弃掉许多不合适、不新颖的观点, 突显网络可能负责在默认网络和控制网络之间进行灵活转换, 进而实现网络间的动态协作, 以此来支持创造思维性所需的特殊的认知加工方式^[12,44].

尽管当前涌现了诸多有关创造性的脑网络研究, 为创造性的神经基础、预测评估等方面提供了重要见解, 但由于创造性本身的复杂性、动态脑机制的探索较缺乏、创造性的提升及其大脑可塑性机制尚不明确等原因, 未来的研究可考虑在以下几方面深入.

第一, 明确创造性的组成成分与测评工具. 尽管创造性通常被定义为产生新颖且适用的想法或产品的能力, 但其不仅包含创造性思维, 还涉及人格、知识经验、认知能力等方面^[58]. 至今尚还没有一个公认的结

构体系来刻画创造性的构成,造成当前研究无法在一个整合的框架下进行,这使得创造性的神经基础研究虽然在特定领域进行了深入探索,如顿悟领域的原型启发^[59]、组块破解研究^[60,61]。但缺乏可整合的证据来实现对创造性本质的洞察,研究结果的多样性反而使得研究者对创造性神经基础的理解产生了困惑^[62]。另外,组成成分的不同界定也引起了测评工具的选择偏差,这无疑加剧了当前的困境。因此迫切地需要整合现有的创造性研究的数据资源,理论驱动与数据驱动并行,确定创造性的组成与界定,明确成分所对应的测评工具,为创造性的科学研究奠定牢固的基石。

第二,利用多模态影像数据深入揭示创造性思维中多脑区、多网络的动态协作模式以及大脑结构连接在其中发挥的重要作用。大脑功能的分化与整合依赖于固有的结构连接,然而少有研究关注与创造性思维有关的功能网络连接是否受到结构网络的影响。当前的脑影像研究多从静态的角度考察创造性思维,并不能够实时描绘大脑的动态活动。但双加工模式指出创造性思维过程涉及想法产生与想法评价的循环往复,所引起的大脑动态活动可能表现出特定的规律,而且可能还需要除默认网络和额顶控制网络以外的其他功能网络的参与和协作,如多巴胺系统在创造性思维中的作用逐渐受到重视^[58,63]。另外,与双加工模型不同的是,华莱士的四阶段论强调了创造性思维有准备期、酝酿期、豁朗期和验证期,但目前对各阶段的大脑动态活动及其与双加工模型在神经机制上的异同还所知甚少。因此有必要结合多模态脑影像、巧妙的实验设计、前沿的数据分析方法,以及引入多个创造性思维的理论模型,共同揭示创造性思维过程中的脑网络动态连接模式。

第三,利用多组学多模态的数据优势(如脑连接组、基因组、宏基因组等)实现对个体创造性水平的精准预测。与其他认知能力一样,创造性也是遗传与环境复杂的交互作用产物^[64]。研究者已找到与创造性相

关的多个候选基因(如多巴胺D2受体基因、儿茶酚-O-甲基转移酶基因等)^[65-67],而且还基于基因与脑影像数据实现了对个体创造性的融合预测^[68]。如Liu等人^[68]分别利用静息态功能连接、单核苷酸多态性以及二者的结合作为模型特征来建立预测模型,并比较了3个模型对个体创造性的预测效果,证实了多组学数据的融合预测效果最好。另外,该研究还通过独立样本评估了预测模型的泛化能力,这对于建立行之有效的创造性预测评估方法至关重要^[68]。因此,未来研究有必要从多组学多模态的视角纳入多中心-多站点的数据资源,利用大数据优势推动对个体创造性的预测评估,为创新人才选拔做出贡献。

第四,寻找培养创造性的有效途径并揭示其大脑可塑性机制。已有研究报告了如冥想、运动、认知激励等方法促进了个体创造性思维的提升^[69-74],但尚不清楚的是何种方法提升效果最突出,需要有整合的证据作为支撑。考虑到现有的干预方法大都应用在成年样本上,在其他人群中,如儿童青少年更受益于哪种方法,其大脑可塑性变化如何,也需实证研究的证据。另外,越来越多的目光从个体聚焦到群体上。有研究揭示了团队合作、成员间积极评价等方式有效促进了团体创造性的提升,而且团队内部个体的脑间活动同步性(interpersonal brain synchronization)在背外侧前额叶、颞顶联合区表现出更高的水平^[75,76],为进一步探索团体创造力的提升途径与神经机制提供了支撑。还必须提到的是,神经调控的迅速发展使得研究者可以利用多种技术手段针对大脑施加不同类型的能量刺激,普遍涉及电(如经颅电刺激)、磁(如经颅磁刺激)、光(如经颅近红外激光刺激)、波(如经颅超声刺激)等^[77],再结合神经导航技术精准定位到个体水平的特定靶点^[78],探究该脑区的活动变化对创造性认知加工的影响,进而实现从直接的神经刺激入手开发创造性的提升方案,并进一步拓展大脑可塑性研究,为全民创新素质的培养与提升提供科学依据。

参考文献

- Runco M A, Jaeger G J. The standard definition of creativity. *Creativ Res J*, 2012, 24: 92-96
- Stein M I. Creativity and culture. *J Psychol*, 1953, 36: 311-322
- Sternberg R J, Lubart T I. Investing in creativity. *Am Psychol*, 1996, 51: 677-688
- Liu C L, Wang M, Zhang Q L. Neural mechanism of creative thinking (in Chinese). *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]
- Bassett D S, Sporns O. Network neuroscience. *Nat Neurosci*, 2017, 20: 353-364
- Medaglia J D, Lynall M E, Bassett D S. Cognitive network neuroscience. *J Cogn Neurosci*, 2015, 27: 1471-1491

- 7 Bassett D S, Wymbs N F, Porter M A, et al. Dynamic reconfiguration of human brain networks during learning. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 7641–7646
- 8 He X, Bassett D S, Chaitanya G, et al. Disrupted dynamic network reconfiguration of the language system in temporal lobe epilepsy. *Brain*, 2018, 141: 1375–1389
- 9 Braun U, Schäfer A, Walter H, et al. Dynamic reconfiguration of frontal brain networks during executive cognition in humans. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 11678–11683
- 10 Beaty R E, Kenett Y N, Christensen A P, et al. Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 1087–1092
- 11 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 [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]
- 12 Beaty R E, Benedek M, Silvia P J, et al. Creative cognition and brain network dynamics. *Trends Cogn Sci*, 2016, 20: 87–95
- 13 Sun J, Liu Z, Rolls E T, et al. Verbal creativity correlates with the temporal variability of brain networks during the resting state. *Cereb Cortex*, 2019, 29: 1047–1058
- 14 Qiu J, Zhang Q L. Neural correlates of prototype activation in insight during creative thinking (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2011, 19: 312–317 [邱江, 张庆林. 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, 2011, 19: 312–317]
- 15 Shen W B, Liu C, Chen J J. Neural basis of creativity: Evidence from structural and functional imaging (in Chinese). *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]
- 16 Yuan Y, Luo J, Shen W B, et al. One decade for insightful brain: New advances on neural correlates of insight (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 1948–1963 [沈汪兵, 罗劲, 刘昌, 等. 顿悟脑的10年: 人类顿悟脑机制研究进展. 科学通报, 2012, 57: 1948–1963]
- 17 Wu X, Yang W, Tong D, et al. A meta-analysis of neuroimaging studies on divergent thinking using activation likelihood estimation. *Hum Brain Mapp*, 2015, 36: 2703–2718
- 18 Chen Q, Yang W, Li W, et al. Association of creative achievement with cognitive flexibility by a combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity study. *NeuroImage*, 2014, 102: 474–483
- 19 Li W, Li G, Ji B, et al. Neuroanatomical correlates of creativity: Evidence from voxel-based morphometry. *Front Psychol*, 2019, 10: 155
- 20 Li W, Li X, Huang L, et al. Brain structure links trait creativity to openness to experience. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2014, 10: 191–198
- 21 Tian F, Chen Q, Zhu W, et al. The association between visual creativity and cortical thickness in healthy adults. *Neurosci Lett*, 2018, 683: 104–110
- 22 Zhu F, Zhang Q, Qiu J, et al. Relating inter-individual differences in verbal creative thinking to cerebral structures: An optimal voxel-based morphometry study. *PLoS One*, 2013, 8: e79272
- 23 Zhu W, Chen Q, Tang C, et al. Brain structure links everyday creativity to creative achievement. *Brain Cogn*, 2016, 103: 70–76
- 24 Chen Q L, Xu T, Yang W J, et al. Individual differences in verbal creative thinking are reflected in the precuneus. *Neuropsychologia*, 2015, 75: 441–449
- 25 Li W, Yang J, Zhang Q, et al. The association between resting functional connectivity and visual creativity. *Sci Rep*, 2016, 6: 25395
- 26 Takeuchi H, Taki Y, Nouchi R, et al. Regional homogeneity, resting-state functional connectivity and amplitude of low frequency fluctuation associated with creativity measured by divergent thinking in a sex-specific manner. *NeuroImage*, 2017, 152: 258–269
- 27 Lichtman J W, Livet J, Sanes J R. A technicolour approach to the connectome. *Nat Rev Neurosci*, 2008, 9: 417–422
- 28 Sporns O, Tononi G, Kötter R. The human connectome: A structural description of the human brain. *PLoS Comp Biol*, 2005, 1: e42
- 29 Power J D, Cohen A L, Nelson S M, et al. Functional network organization of the human brain. *Neuron*, 2011, 72: 665–678
- 30 Sowden P T, Pringle A, Gabora L. The shifting sands of creative thinking: Connections to dual-process theory. *Think Reasoning*, 2015, 21: 40–60
- 31 Nijstad B A, De Dreu C K W, Rietzschel E F, et al. The dual pathway to creativity model: Creative ideation as a function of flexibility and persistence. *Eur Rev Soc Psychol*, 2010, 21: 34–77
- 32 Ellamil M, Dobson C, Beeman M, et al. Evaluative and generative modes of thought during the creative process. *NeuroImage*, 2012, 59: 1783–1794
- 33 Fox M D, Snyder A Z, Vincent J L, et al. From the cover: The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 9673–9678
- 34 Andrews-Hanna J R, Smallwood J, Spreng R N. The default network and self-generated thought: Component processes, dynamic control, and clinical relevance. *Ann NY Acad Sci*, 2014, 1316: 29–52
- 35 Raichle M E, MacLeod A M, Snyder A Z, et al. A default mode of brain function. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 676–682
- 36 Buckner R L, Andrews-Hanna J R, Schacter D L. The brain's default network. *Ann NY Acad Sci*, 2008, 1124: 1–38
- 37 Beaty R E, Christensen A P, Benedek M, et al. Creative constraints: Brain activity and network dynamics underlying semantic interference during idea production. *NeuroImage*, 2017, 148: 189–196
- 38 Adnan A, Beaty R, Silvia P, et al. Creative aging: Functional brain networks associated with divergent thinking in older and younger adults.

- Neurobiol Aging, 2019, 75: 150–158
- 39 Raichle M E, Mintun M A. Brain work and brain imaging. *Annu Rev Neurosci*, 2006, 29: 449–476
- 40 Beaty R E, Benedek M, Wilkins R W, et al. Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest. *Neuropsychologia*, 2014, 64: 92–98
- 41 Zhu W, Chen Q, Xia L, et al. Common and distinct brain networks underlying verbal and visual creativity. *Hum Brain Mapp*, 2017, 38: 2094–2111
- 42 Shi L, Sun J, Xia Y, et al. Large-scale brain network connectivity underlying creativity in resting-state and task fMRI: Cooperation between default network and frontal-parietal network. *Biol Psychol*, 2018, 135: 102–111
- 43 Jiao B, Zhang D, Liang A, et al. Association between resting-state brain network topological organization and creative ability: Evidence from a multiple linear regression model. *Biol Psychol*, 2017, 129: 165–177
- 44 Beaty R E, Benedek M, Barry Kaufman S, et al. Default and executive network coupling supports creative idea production. *Sci Rep*, 2015, 5: 10964
- 45 Uddin L Q. Salience processing and insular cortical function and dysfunction. *Nat Rev Neurosci*, 2015, 16: 55–61
- 46 Vidaurre D, Smith S M, Woolrich M W. Brain network dynamics are hierarchically organized in time. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 12827–12832
- 47 Li J, Zhang D, Liang A, et al. High transition frequencies of dynamic functional connectivity states in the creative brain. *Sci Rep*, 2017, 7: 46072
- 48 Beaty R E, Chen Q, Christensen A P, et al. Brain networks of the imaginative mind: Dynamic functional connectivity of default and cognitive control networks relates to openness to experience. *Hum Brain Mapp*, 2018, 39: 811–821
- 49 Hermundstad A M, Bassett D S, Brown K S, et al. Structural foundations of resting-state and task-based functional connectivity in the human brain. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 6169–6174
- 50 Wang Z, Dai Z, Gong G, et al. Understanding structural-functional relationships in the human brain. *Neuroscientist*, 2014, 21: 290–305
- 51 Ryman S G, van den Heuvel M P, Yeo R A, et al. Sex differences in the relationship between white matter connectivity and creativity. *NeuroImage*, 2014, 101: 380–389
- 52 Shen W B, Liu C, Shi C H, et al. Gender differences in creative thinking (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2015, 23: 1380–1389 [沈汪兵, 刘昌, 施春华, 等. 创造性思维的性别差异. 心理科学进展, 2015, 23: 1380–1389]
- 53 Chen Q, Beaty R E, Wei D, et al. Longitudinal alterations of frontoparietal and frontotemporal networks predict future creative cognitive ability. *Cereb Cortex*, 2018, 28: 103–115
- 54 Liu W, Wei D, Chen Q, et al. Longitudinal test-retest neuroimaging data from healthy young adults in southwest China. *Sci Data*, 2017, 4: 170017
- 55 Lenroot R K, Giedd J N. Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neurosci Biobehav Rev*, 2006, 30: 718–729
- 56 Mednick S A. The associative basis of the creative process. *Psychol Rev*, 1962, 69: 220–232
- 57 Bendetowicz D, Urbanski M, Garcin B, et al. Two critical brain networks for generation and combination of remote associations. *Brain*, 2018, 141: 217–233
- 58 Jauk E. A bio-psycho-behavioral model of creativity. *Curr Opin Behav Sci*, 2019, 27: 1–6
- 59 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
- 60 Huang F R, He M, Luo J. The cognitive and neural mechanism of chunk decomposition: A particular form of insight (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 3594–3604 [黄福荣, 和美, 罗劲. 组块破解形态顿悟的脑认知机理. 科学通报, 2017, 62: 3594–3604]
- 61 Tang X, Pang J, Nie Q Y, et al. Probing the cognitive mechanism of mental representational change during chunk decomposition: A parametric fMRI study. *Cereb Cortex*, 2016, 26: 2991–2999
- 62 Dietrich A. Where in the brain is creativity: A brief account of a wild-geese chase. *Curr Opin Behav Sci*, 2019, 27: 36–39
- 63 Tik M, Sladky R, Luft C D B, et al. Ultra-high-field fmri insights on insight: Neural correlates of the Aha!-moment. *Hum Brain Mapp*, 2018, 39: 3241–3252
- 64 Ren Z, Yang W, Qiu J. Neural and genetic mechanisms of creative potential. *Curr Opin Behav Sci*, 2019, 27: 40–46
- 65 Si S, Zhang S, Yu Q, et al. The interaction of *DRD2* and parenting style in predicting creativity. *Think Skills Creat*, 2018, 27: 64–77
- 66 Zhang S, Zhang J. The association of *DRD2* with insight problem solving. *Front Psychol*, 2016, 7: 1865
- 67 Zhang S, Zhang M, Zhang J. Association of *COMT* and *COMT-DRD2* interaction with creative potential. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8: 216
- 68 Liu Z, Zhang J, Xie X, et al. Neural and genetic determinants of creativity. *NeuroImage*, 2018, 174: 164–176
- 69 Colzato L S, Szapora A, Lippelt D, et al. Prior meditation practice modulates performance and strategy use in convergent- and divergent-thinking problems. *Mindfulness*, 2017, 8: 10–16
- 70 Guo Y H, He L, Chen X Y, et al. The impact of different types of meditation on creative thinking and the underlying mechanism (in Chinese). *J Psychol Sci*, 2018, 41: 1254–1260 [郭英慧, 何李, 陈小异, 等. 不同冥想类型对创造性思维的影响及作用机制. 心理科学, 2018, 41: 1254–1260]

- 71 Oppezzo M, Schwartz D L. Give your ideas some legs: The positive effect of walking on creative thinking. *J Exp Psychol-Learn Mem Cogn*, 2014, 40: 1142–1152
- 72 Sun J, Chen Q, Zhang Q, et al. Training your brain to be more creative: Brain functional and structural changes induced by divergent thinking training. *Hum Brain Mapp*, 2016, 37: 3375–3387
- 73 Sun J, Zhang Q, Li Y, et al. Plasticity of the resting-state brain: Static and dynamic functional connectivity change induced by divergent thinking training. *Brain Imaging Behav*, 2019, <https://xs.scihub.ltd/https://doi.org/10.1007/s11682-019-00077-9>
- 74 Wei D, Yang J, Li W, et al. Increased resting functional connectivity of the medial prefrontal cortex in creativity by means of cognitive stimulation. *Cortex*, 2014, 51: 92–102
- 75 Lu K, Qiao X, Hao N. Praising or keeping silent on partner's ideas: Leading brainstorming in particular ways. *Neuropsychologia*, 2019, 124: 19–30
- 76 Lu K, Xue H, Nozawa T, et al. Cooperation makes a group be more creative. *Cereb Cortex*, 2019, 29: 3457–3470
- 77 Lu H N, Chan S S M, Lam L C W, et al. Towards individualized psychiatric practice: The legacy of neurotherapeutics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2592–2598 [路翰娜, 陈秀雯, 林翠华, 等. 物理疗法在脑科疾病中的前沿应用: 神经治疗学的复兴. 科学通报, 2018, 63: 2592–2598]
- 78 Blumberger D M, Vila-Rodriguez F, Thorpe K E, et al. Effectiveness of theta burst versus high-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with depression (THREE-D): A randomised non-inferiority trial. *Lancet*, 2018, 391: 1683–1692

Summary for “创造性的大脑网络连接特征与研究展望”

Network connectivity of the creative brain: Current knowledge and future directions

Li He[†], Yu Li[†], Kaixiang Zhuang, Qunlin Chen, Jiangzhou Sun, Wenjing Yang, Dongtao Wei & Jiang Qiu^{*}

Key Laboratory of Cognition and Personality of Ministry of Education, Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China

[†] These authors contributed equally to this work

^{*} Corresponding author, E-mail: qiu318@swu.edu.cn

Creativity is an important manifestation of human wisdom and is generally defined as the ability to generate something both novel and useful. Emerging evidence suggests that the complex cognitive processes of creative thinking involve the interaction of multiple brain regions and networks and may not depend on the specific function of a single brain region. The study of the human connectome provides a chance to reveal the brain network basis of creativity, and the focus in the neural mechanisms of creativity has gradually expanded from the local region to the brain network.

A growing number of functional brain network studies have shown a consistent pattern of functional network connectivity underlying creativity that has been characterized by interactions between the default mode network, the salience network, and the fronto-parietal control network. Dynamic functional connectivity analysis further suggested that the coupling of the network hubs dynamically changes at different stages of creative thinking. The spontaneous neural activity of the creative brain has also been characterized by flexibility and variability, even during the resting state. On the other hand, evidence from brain lesion research has confirmed that the default mode network and the fronto-parietal control network are responsible for different aspects of creative cognitive abilities, such as the generation of remote associates and the combination of remote associates. According to the dual-process theory of creative thinking, researchers have suggested that the default mode network retrieves and extracts novel information from the semantic and episodic memory systems through spontaneous associations. The fronto-parietal control network assesses and selects current views according to specific task goals. Moreover, the salience network may be responsible for the flexible switching between the default mode network and the fronto-parietal control network based on the novelty of the associative content.

Future research needs to continuously integrate data resources to identify the main components of creativity and to develop advanced assessment tools with more ecological validity, which is a critical and fundamental endeavor for scientific research on creativity. Equally important, it is necessary to combine multimodal brain imaging to provide new insight into the dynamic collaborative mode of functional networks and the specific role of structural networks in creative thinking that would contribute to deepening the understanding of the cognitive processes and neural mechanisms of creativity. In addition, due to the poor predictive power of single modality data, future studies could take advantage of multi-omics and multimodal data to achieve the goal of accurate prediction and assessment of individuals' creativity. Furthermore, it is important to explore how to improve individuals' creative abilities and develop effective promotion methods, such as cognitive training and neuromodulation. Although specific interventions have led to some improvements in individuals' creativity, the dynamic underlying neural mechanisms of brain plasticity during the intervention are not clear and should be addressed in the future.

creativity, divergent thinking, brain network, functional connectivity, multimodal neuroimaging, prediction and evaluation

doi: [10.1360/TB-2019-0112](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0112)