

# 不同类型心智游移对创造性思维的 差异化预测及其神经机制\*

李亚丹<sup>1</sup> 谢 聪<sup>2</sup> 张姬毓<sup>1</sup> 苏佳豪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>陕西师范大学现代教学技术教育部重点实验室, 西安 710062)

(<sup>2</sup>华东师范大学心理与认知科学学院, 上海 200062)

**摘 要** 心智游移(mind-wandering, MW)与创造性思维的关系复杂。然而, 以往研究仅将心智游移视为单一结构进行探讨, 忽视了其异质性, 导致研究结论存在分歧。本研究采用功能性近红外光谱脑成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS), 通过两个实验, 分别从特质和状态层面探讨不同类型的心智游移对创造性思维的预测作用及其神经机制。结果发现, 在静息态下, 积极-建设型心智游移(positive-constructive daydreaming, PCD)分别在双侧颞上回之间的功能连接对创造性观点产生的正向预测、额极与左颞中回之间的功能连接对创造性观点产生的负向预测、左背外侧前额叶与右额下回之间的功能连接对创造性观点评价的正向预测中发挥了中介作用(实验 1)。在任务态下, 相比于有意的心智游移(deliberate MW), 任务相关的心智游移(task-related MW)对创造性思维的预测权重更大, 且能够负向预测创造性任务期间左额下回与左缘上回之间的静态功能连接、双侧额下回之间的静态功能连接, 并正向预测右背外侧前额叶与右额下回之间的动态功能连接(实验 2)。上述结果表明, 特定类型的心智游移能正向预测创造性思维, 为正确理解心智游移的适应性作用和阐明创造性思维形成的潜在路径提供了新启示。

**关键词** 创造性思维, 心智游移, 积极-建设型心智游移, 任务相关的心智游移, 功能性近红外光谱脑成像技术  
**分类号** B842

## 1 引言

心智游移(mind-wandering, MW), 又称白日梦(daydreaming), 指与当前正在进行的任务无关的想法, 是一种以相对自由和不受约束的方式进行的自发思维(Christoff et al., 2016; Jayasinghe, 2020)。研究表明, 心智游移会在各种生活事件中出现, 大约占据人们每天 30%~50%的清醒时间(Killingsworth & Gilbert, 2010)。长期以来, 心智游移被认为是认知控制失败的产物, 对任务表现、心理健康和生活满意度等均会产生消极影响(Marchetti et al., 2014;

Mooneyham & Schooler, 2013; Mrazek et al., 2013)。但也有研究发现心智游移的适应性作用, 例如酝酿期间的心智游移可以提升个体之后的创造性思维表现(Irving et al., 2022; Yamaoka & Yukawa, 2019), 即“酝酿效应”。创造性思维(creative thinking)是指个体产生新颖(original)且适宜(appropriate)的想法的高级思维活动(Abraham, 2018), 是创新人才产出创造性成果、做出创造性贡献的关键思维能力。探讨心智游移这类自发思维对创造性思维的预测作用及其神经机制, 是充分理解创造性思维本质和发生发展规律的前提和基础, 也是培养创新人才、赋

收稿日期: 2025-04-10

\* 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2025JC-YBMS-208)、陕西省社会科学基金年度项目(2024P004)、陕西省三秦英才特殊支持计划创新创业团队项目、中央高校基本科研业务费科技领军创新团队培育项目(GK202502005)和中央高校基本科研业务项目(2023BFXM005)资助。

李亚丹和谢聪为本文共同第一作者。

通信作者: 李亚丹, E-mail: liyadan@snnu.edu.cn

能新质生产力发展和实现国家高质量发展的重要途径。

双过程理论(dual-process theory)认为创造性思维包括自下而上的产生(generation)阶段和自上而下的评价(evaluation)阶段(Chrysikou, 2019; Ivancovsky et al., 2019)。心智游移与创造性思维双过程中的两个阶段都密切相关(Fox & Beaty, 2019)。在创造性思维的产生阶段,个体将已有的记忆经验进行有机结合形成新观点(Beaty et al., 2020),经验的组合具备随机性,可以认为是一种盲目变异(blind variation, Simonton, 2011),涉及更多的自下而上加工。心智游移是一种动态多变的思维状态,其内容往往包含过去的记忆或者未来的预想(Karapanagiotidis et al., 2017; Stawarczyk, 2018),从而提供创造性思维的“原料”。而创造性思维的评价阶段需要个体评估和完善已经产生的新观点,属于选择性保留的过程(selective retention, Simonton, 2011),涉及更多的自上而下加工。个体可以意识到心智游移的产生并进行自我报告,并能够借助其内容完善未来计划(Baird et al., 2011),该过程与观点评价阶段对有用性评估的认知监控过程相似。心智游移的自发性体现了其自下而上的特性,是心智游移的内在属性,而个体对心智游移的元觉察和调用则涉及更多的自上而下加工。即是说,当心智游移涉及自上而下加工时,才能对自由移动的思维“原料”进行有效调用,进而促进酝酿期后的创造性思维表现。由此可见,心智游移与创造性思维在认知过程中具有内在联系。

然而,已有研究在心智游移对创造性思维所发挥的影响上存在分歧。一方面,心智游移对创造性思维可能具有促进作用。Baird 等人(2012)在前后测多用途任务(alternative uses task, AUT)之间设置酝酿期,并在酝酿期内设置不同难度的 n-back 任务: 2-back 任务(高要求任务)或 0-back 任务(低要求任务)。此研究发现,酝酿期中的 0-back 组心智游移比例显著高于 2-back 组,并且 0-back 组在 AUT 后测中产出更多的创造性回答,心智游移比例与创造性表现正相关。后续研究进一步证实酝酿期间的心智游移能够直接预测后续创造力任务表现的提升(Irving et al., 2022; Yamaoka & Yukawa, 2019)。而另一方面,也有研究发现酝酿期的心智游移与创造性思维之间相关并不显著(Murray et al., 2021; Smeekens & Kane, 2016)。Murray 等人(2021)使用两个实验复刻 Baird 等人(2012)的研究。实验 1 仅包含酝酿期

和 AUT 后测,实验 2 更贴近原实验,同样设置 AUT 前后测,并在期间设置 2-back 任务或 0-back 任务作为酝酿期任务,以诱发不同比例的心智游移。结果发现,在 0-back 任务中,思维探针探测到的心智游移比例更高,但在控制前测 AUT 得分后,n-back 组别对后测 AUT 无显著主效应,心智游移比例无法预测后测 AUT 表现。Smeekens 和 Kane (2016)采用系列实验探讨工作记忆容量、心智游移能否预测创造性思维,其中实验 3 也使用 Baird 等人(2012)的 0-back 任务作为酝酿期心智游移的诱发任务,同样发现心智游移比例与后测 AUT 无关。上述分歧可能的原因是:研究仅考虑酝酿期间心智游移的频率对酝酿期后创造性思维表现的影响,忽视了心智游移是一种异质性(heterogeneity)的思维结构,即在内容、成因等多个维度上具备多样性(Zedelius & Schooler, 2016)。不同类型的心智游移可能产生不同的效应,仅关注心智游移频率可能导致效应的混淆,难以得出可复制的实验结果。只有深入探讨“何种类型”的心智游移能够促进酝酿期后的创造性思维,才能够真正明确心智游移在酝酿效应中发挥积极作用的边界条件。

部分研究已经开始重视特定类型的心智游移与创造性思维的关系。Huba 等人(1981)根据内容将特质心智游移分为积极-建设型心智游移(positive-constructive daydreaming, PCD)和消极-内疚型心智游移(guilty-dysphoric daydreaming, GDD)。PCD 指包含“计划、愉快的想法、生动和充满希望的意象以及好奇心”的心智游移,而 GDD 包含“强迫性、内疚和痛苦的幻想”。Sun 等人(2021)发现 PCD 特质与创造力正相关,而 GDD 与创造力没有显著关系。心智游移的“积极建设性”可能直接体现于心智游移的内容。Zedelius 等人(2021)发现对个体有意义的心智游移可以正向预测创造力。而在任务情境下,“有意义”可能具体表现为与任务相关。Leszczynski 等人(2017)发现,当酝酿期任务中的刺激与未解决的创造力任务相关时,心智游移的频率与创造性表现存在显著正相关;当酝酿期任务中的刺激与创造性任务无关时,二者并无显著相关。McDaniel 等人(2025)也发现:仅在写作提示前后相同的条件下,酝酿期的心智游移能显著提升创造性写作任务的表现。这些研究结果提示了任务相关的心智游移(task-related MW, MW-r)而非任务无关的心智游移(task-unrelated MW, MW-u)能对创造性表现产生促进作用。同时,与任务相关的心智游移往往伴随着

有意识的觉察和报告(Xie et al., 2023)。Agnoli 等人(2018)从心智游移形成的有意性(deliberation)出发,发现有意的心智游移(deliberate MW, MW-d)与创造性思维存在显著相关,而自发的心智游移(spontaneous MW, MW-s)与创造性思维未发现相关,这一结果强调了注意控制在二者关系中的重要作用。综上,与创造性思维具备正向关系的心智游移往往具备“计划性”“任务相关性”或“有意性”,不管从内容还是成因维度出发,均涉及注意控制(自上而下加工)。综合双过程理论和近年来的研究,本研究提出以下核心假设:只有涉及自上而下认知加工的心智游移,才能最有效地促进创造性思维。

在认知神经层面上,以往研究也发现心智游移和创造性思维可能存在共同神经机制,二者都与默认网络(default mode network, DMN)和额顶控制网络(frontal-parietal control network, FPCN)密切相关(Kleinmuntz et al., 2019)。研究(Liu et al., 2021; Marron et al., 2020)发现静息态下 DMN 内部的功能连接对创造性表现的影响受到了联想能力的部分中介作用,而联想能力被认为是创造性观点产生阶段的核心成分之一(Kenett et al., 2018)。这表明包括记忆提取、组合、联想等在内的观点产生过程可能是以 DMN 相关脑区的活动为其认知神经基础。FPCN 在创造性认知过程中发挥的作用主要在于识别并舍弃不合理想法,从而使新想法符合现实问题情境的要求(Chrysikou, 2018)。DMN 和 FPCN 的功能连接也是创造性思维的标志性神经活动之一。Sun 等人(2019)发现 DMN 与 FPCN 在静息态扫描中功能连接的动态变化能够有效反映被试的创造性思维水平。Beaty 等人(2015)发现在创造性思维任务初始阶段,被试脑功能连接主要体现在 DMN 与突显网络(salience network, SN)之间,随着任务的推进,功能连接逐渐转向到 DMN 与 FPCN 之间,这一研究结果与双过程理论所假设的产生-评价过程高度一致,进一步验证了创造性思维过程中存在不同脑网络之间的动态交互机制。同时,在心智游移的产生过程中,DMN 和 FPCN 也发挥着重要的作用,其中 DMN 通过对个体记忆的提取形成心智游移,而 FPCN 则主要负责控制与调节心智游移的内容(Christoff et al., 2016)。在此基础上, Golchert 等人(2017)发现有意的心智游移同 FPCN 与 DMN 之间的功能连接密切相关,而自发的心智游移同 DMN 与边缘系统(limbic system)之间的功能连接密切相关。Sun 等人(2021)发现 PCN 与创造性思维在 DMN

与 FPCN 上有着共同的功能连接模式。因此,尽管心智游移与创造性思维涉及共同的认知神经基础,但不同类型的心智游移与创造性思维的关系不尽相同。

心智游移可以被区分为特质心智游移与状态心智游移,二者在时间尺度、表现方式与神经机制上均具有可识别的差异,这些差异也深刻体现在其依托的神经网络上。特质心智游移通常通过静息态功能连接来刻画,强调个体在非任务状态下思维偏离外部环境的稳定倾向;而状态心智游移则多借助任务范式与经验取样法(experience sampling method, ESM)进行实时捕捉,反映认知活动中瞬时的注意脱离(Christoff et al., 2009)。在特质水平上,研究普遍发现个体 DMN 的静态功能连接与其心智游移倾向呈正相关(Kucyi et al., 2016; Seli et al., 2018)。其关键节点包括内侧前额叶皮层(medial prefrontal cortex, mPFC)、后扣带皮层(posterior cingulate cortex, PCC)、角回(angular gyrus, AG)及海马旁回(parahippocampal gyrus, PHG)(Fox et al., 2015)。FPCN 与 DMN 的耦合增强也可预测个体有意的心智游移倾向,这表明跨网络耦合可能构成特质心智游移的神经基础(Golchert et al., 2017)。

心智游移的相关研究更侧重揭示状态心智游移在认知过程中的瞬时神经响应。研究发现,心智游移发生时包括后扣带皮层(posterior cingulate cortex, PCC)、内侧前额叶皮层(medial prefrontal cortex, mPFC)和颞顶联合区(temporoparietal junction, TPJ)等 DMN 的核心脑区的激活,反映了思维从当前任务目标上脱离。同时前扣带皮层(anterior cingulate cortex, ACC)和岛叶(insula, INS)负责识别心智游移状态(Christoff et al., 2009)。任务正相关网络(task positive network, TPN)与执行控制网络(executive control network, ECN)通常表现出功能抑制(Christoff et al., 2016; Mittner et al., 2014)。ECN 侧重目标导向行为的持续监控与调节,涉及额中回(middle frontal gyrus, MFG)等核心脑区,对维持任务执行和控制心智游移的发生至关重要(Christoff et al., 2016; Fox et al., 2015)。然而,Christoff 等人(2009)的研究发现状态心智游移也会伴随背侧前扣带皮层(dACC)和背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)的激活,表明心智游移并非单纯的认知脱离状态,而涉及一定程度的执行控制过程。这种网络间的动态平衡构成了心智游移状态下复杂的神经调控机制(Seli et al., 2018)。

然而,以往研究中使用的 fMRI 通常对被试的躯体活动有严格的限制,进而可能影响被试的认知任务表现(Unwalla et al., 2021)。鉴于心智游移极易受到实验环境中噪声、姿势限制与身体束缚等因素的干扰,同时创造性思维(尤其是本研究关注的发散性思维)的真实展现亦需要较自然、低约束的条件,本研究采用了功能性近红外光谱脑成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)以提高生态效度(Lu et al., 2020; Tempest & Radel, 2019)。fNIRS 具有噪声低、允许坐姿测量、头部活动限制较小等优势,能够显著降低传统 fMRI 环境对心智游移的抑制效应,特别是在认知负荷较低的酝酿阶段(如 SART 任务)中,有助于更自然地诱发自发性心智游移。同时,该技术允许被试在进行 AUT 等创造性任务时自由书写或口头表达,从而为捕捉心智游移与创造性思维的动态交互及其神经机制提供了更具生态效度的实验环境。此外, fNIRS 较高的时间分辨率也有助于捕捉心智游移和创造力任务中神经活动的快速动态变化。所以本研究使用生态效度与时间分辨率更高的 fNIRS,在重复验证并拓展以往 fMRI 相关研究的同时,也便于将研究结果推广至现实情境中。因此,本研究将在前人研究的基础上,从心智游移的异质性出发,利用 fNIRS 技术更细致且系统地探讨“何种”心智游移“如何”预测创造性思维并揭示其具体的神经机制。

尽管探讨特定类型的心智游移促进创造性思维的研究日益增多,但关于心智游移有意性的探讨多局限于特质层面;此外,鲜有研究明确量化任务相关的心智游移,并深入考察其对创造力的独特价值。因此,本研究的实验 1 在特质层面,揭示具有不同效价和内容的心智游移倾向(PCD vs. GDD)对创造性思维的预测效应,并假设仅有涉及自上而下加工的 PCD 能够正向预测创造性思维。接着探讨“积极-建设型”心智游移在状态层面的具体体现。实验 2 聚焦心智游移任务相关性(MW-r vs. MW-u)与有意性(MW-d vs. MW-s)的关键维度,心智游移的任务相关性和有意性分别在内容和成因层面体现了自上而下的认知控制。虽然任务相关的心智游移往往伴随着有意性(Xie et al., 2023),两个维度关系密切,但在概念和测量上可以分离,更有必要明确究竟“何种”心智游移更能稳健预测创造性思维。同时,实验 1 聚焦静息态功能连接,采用探索性分析揭示大脑在无任务下的自发活动模式与 PCD、GDD 倾向及创造性思维能力的深层联系。实验 2

转向具体的任务情境,捕捉任务全程的大脑活动,以解析任务态功能连接如何反映心智游移的发生及其与创造力表现的共性。通过整合“特质-状态”的纵向维度、“行为-神经”的观测维度和“静态-动态”的机制维度,实现结构化探究。本研究预期, fNIRS 反映的脑功能网络连接模式同样能有效预测创造性思维,不论是在特质还是状态层面,仅有包含自上而下认知加工的心智游移能够预测创造性思维,不同类型的心智游移预测创造性思维的神经机制有所不同。

## 2 实验 1: 积极-建设型心智游移(PCD)和消极-内疚型心智游移(GDD)与创造性思维的关系及其神经机制

### 2.1 研究目的与假设

实验 1 构建 LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)回归模型,并对 PCD 和 GDD 与创造性思维的关系及其神经机制进行探索性分析。结合前人研究(Li et al., 2022; Marron et al., 2020; McMillan et al., 2013),实验 1 假设:(1)静息态下 DMN 和 FPCN 之间的功能连接增强能够预测高创造性思维;(2)PCD 在 DMN 和 FPCN 的功能连接增强对创造性思维的正向预测中起到中介作用,而 GDD 无显著中介作用,具体来说,DMN 和 FPCN 的功能连接与更高频率的 PCD 有关,进而能够在特质水平有效预测创造性思维水平。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 被试

随机选取在校大学生 72 人(男性 12 人,女性 60 人),被试均为右利手、视力或矫正视力正常、无精神障碍或精神药物使用史。本实验涉及问卷均采用问卷星平台进行线上作答,采用 HOMER2 工具包(Huppert et al., 2009)对脑影像数据进行数据检验以及预处理,剔除三名脑影像数据信噪比过低的被试数据后,最终被试为 69 名(男性 11 人,女性 58 人,年龄  $M = 19.71$  岁,  $SD = 0.60$  岁)。实验前所有被试均被告知实验仪器及实验内容的相关信息,且签署书面知情同意书,实验结束后被试均获得一定额度的报酬。实验方案获得陕西师范大学现代教育技术教育部重点实验室伦理委员会批准(L202401-01-01)。

#### 2.2.2 实验材料

(1)简版想象过程量表(Short Imaginal Processes

Inventory, SIPI; Huba et al., 1981; Huba & Tanaka, 1983) 包含 3 个分量表: 注意控制缺乏 (Poor Attention Control, PAC)、积极-建设型心智游移, 以及消极-内疚型心智游移。每个分量表均包含 15 道测试题目, 共 45 道题目。采用 1 (完全不符合我) 到 5 (完全符合我) 点 Likert 计分。PAC 分量表中包含 7 道反向计分题目, PCD 分量表中包含 5 道反向计分题目, GDD 分量表中包含 2 道反向计分题目。

(2) 产生与选择问卷 (Generation and Selection Questionnaire, GSQ; Fürst et al., 2016; Fürst & Grin, 2018) 用于测查被试在特质水平上的创造性思维, 包括个体的创造性观点产生与创造性观点评价能力, 问卷包含两个分量表, 分别为产生 (generation) 分量表, 例如: “我很容易产生大量的点子”; 与选择 (selection) 分量表, 例如: “我会去寻求方案的优化”。每个分量表均包含 6 道题目并采用 1 (几乎从不) 到 5 (经常) 点 Likert 计分, 所有题目均为正向计分。

### 2.2.3 fNIRS 数据采集

本研究采用日本岛津公司生产的功能性近红外光谱脑成像仪 (LABNIRS 系统, Shimadzu Corp., Kyoto, Japan) 收集静息态脑功能成像数据, 设备近红外光为三波段, 分别为 780 nm、805 nm 及 830 nm, 采样率为 83 Hz, 后降采样至 10 Hz。根据以往研究结果 (Tempest & Radel, 2019; Xie et al., 2022) 将感兴趣脑区 (regions of interest, ROIs) 设定为前额叶 (2×7 共 14 个光极) 与颞顶联合区 (左右两侧各 3×3 共 18 个光极), 光极间隔为 3 cm, 通道总数为 43, 具体排布如图 1 所示。

研究收集 3 分钟睁眼静息态数据以及 3 分钟闭眼静息态数据, 以防止 3 分钟以上的静息时间会使被试感到困倦 (Tagliazucchi & Laufs, 2014)。在睁眼静息过程中, 要求被试注视黑色屏幕中央的白色十字注视点, 同时, 为防止被试到达实验室时其心理状态的起伏变化带来的随机扰动, 本研究只选取闭

眼静息时段的数据进行后续分析 (Xie et al., 2022)。

### 2.2.4 近红外数据分析

数据预处理:

根据前人研究结果 (Cui et al., 2012), 本研究以氧合血红蛋白 (oxyhemoglobin, HbO) 为基础进行后续分析。采用 HOMER2 工具包 (Huppert et al., 2009) 进行预处理滤波。首先将原始数据信号转化为光密度信号 (optical density), 后根据 hmrMotionArtifactByChannel 功能检测头动伪迹并采用 hmrMotionCorrectSpline 功能对其进行矫正。最后, 对信号进行滤波处理并保留 0.01 到 0.10 Hz 信号, 对每个被试噪声过高的通道进行标记, 并移除标记比率高于 50% 的通道 (Mayseless et al., 2019)。根据 HOMER2 的预处理结果, 通道 2、通道 5、通道 15、通道 18 以及通道 20 的数据被排除在后续分析之外。

功能连接网络的构建:

本研究同时考虑静态功能连接与动态功能连接与创造性思维的关系。对于静态功能连接, 功能连接矩阵采用通道作为节点, 采用通道之间血氧含量随时间变化的皮尔逊相关系数进行 Fisher Z 正态转换后的标准分数作为连边值, 对于每一个被试, 最后生成 38×38 的功能连接矩阵。对于动态功能连接, 首先采用滑动窗口相关 (sliding window correlation, SWC; Allen et al., 2014) 计算被试静息态下不同时间段的脑功能连接, 根据前人研究, 窗口长度设定为 60 秒, 步长设定为 1 秒 (Urquhart et al., 2020)。与静态功能连接类似, 通过计算窗口内通道之间的血氧含量随时间变化的皮尔逊相关系数并进行 Fisher Z 转换获得单个窗口内的功能连接矩阵, 随后通过计算同一通道对不同时间窗口内的功能连接的标准差来获得动态功能连接指标 (functional connectivity variability, FCV; Fong et al., 2019), 最后以 FCV 值构建动态功能连接矩阵。具体建构过

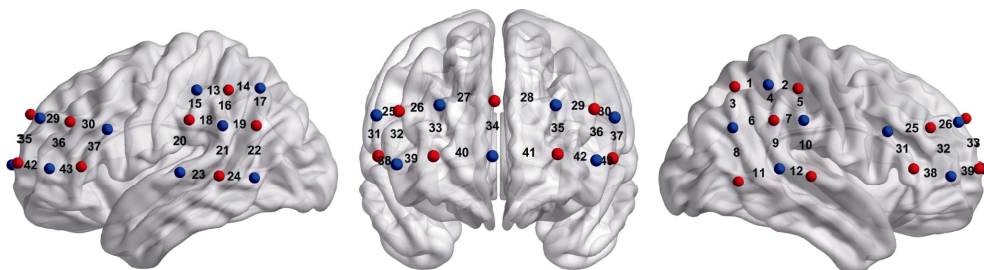


图 1 fNIRS 光极排布与通道编号

注: 红色为发射极; 蓝色为接收极; 数字为数据通道及其相应的编号。彩图见电子版, 下同。

程如图 2 所示。

基于网络连接的预测分析:

采用 MATLAB 2021a 进行 LASSO 回归模型构建和留一交叉验证(leave one out cross-validation, LOOCV)。首先以与创造性思维显著相关的连边值 ( $p < 0.05$ , 不矫正)为自变量, 特质水平创造性思维为因变量构建 LASSO 回归模型, 对功能连接值进行特征提取, 将通过特征提取的连边用于后续分析。确定最佳回归模型——通过 LOOCV 找到最优正则化参数  $\lambda$ , 即选择使模型预测值与真实值均方误差(mean square error, MSE)最小的  $\lambda$  值, 以平衡模型的拟合优度与复杂度, 确保模型具备最佳泛化能力。模型整体显著性以 10000 次置换检验

(permutation test)结果为准(Duan et al., 2020)。根据 LASSO 回归的结果, 以最佳模型中回归系数不为 0 的连边为通过特征选取的连边, 以其为自变量, 分别构建数个以特质水平不同类型心智游移为中介变量, 特质水平创造性思维为因变量的中介模型。LASSO 回归模型构建如图 3 所示。

### 2.3 结果

#### 2.3.1 行为结果

对 SIPI 问卷的三个分量表(PAC、PCD、GDD)进行 Pearson 相关分析。结果表明, PAC 与 PCD 之间呈显著负相关( $r = -0.29, p = 0.015$ ), PAC 与 GDD 之间呈显著正相关( $r = 0.48, p < 0.001$ ), PCD 与 GDD 之间相关关系未达到统计学显著性水平( $r =$

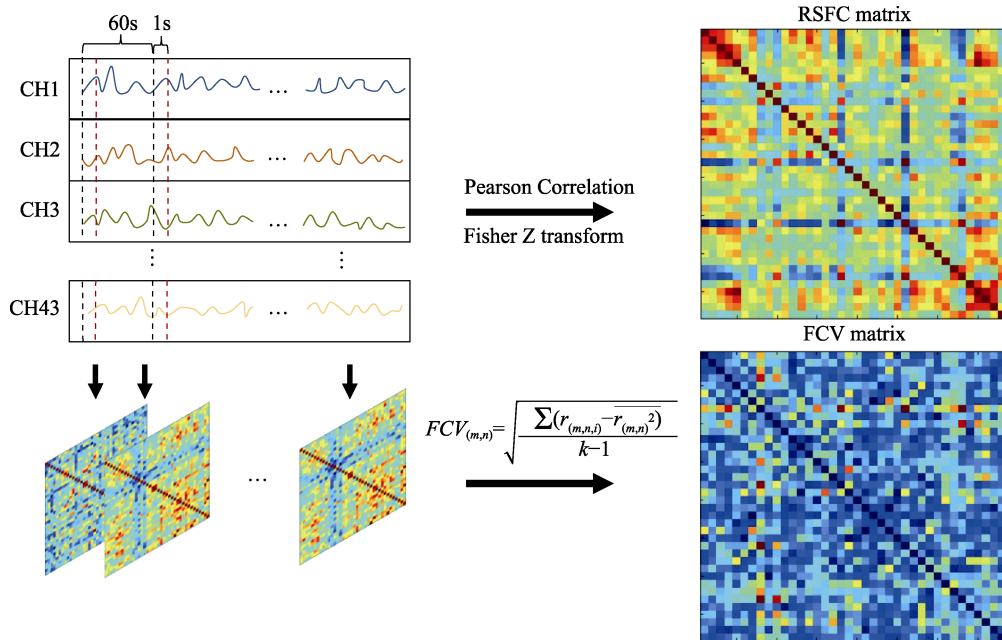


图 2 功能连接矩阵构建流程  
注: RSFC: 静息态功能连接; FCV: 动态功能连接。

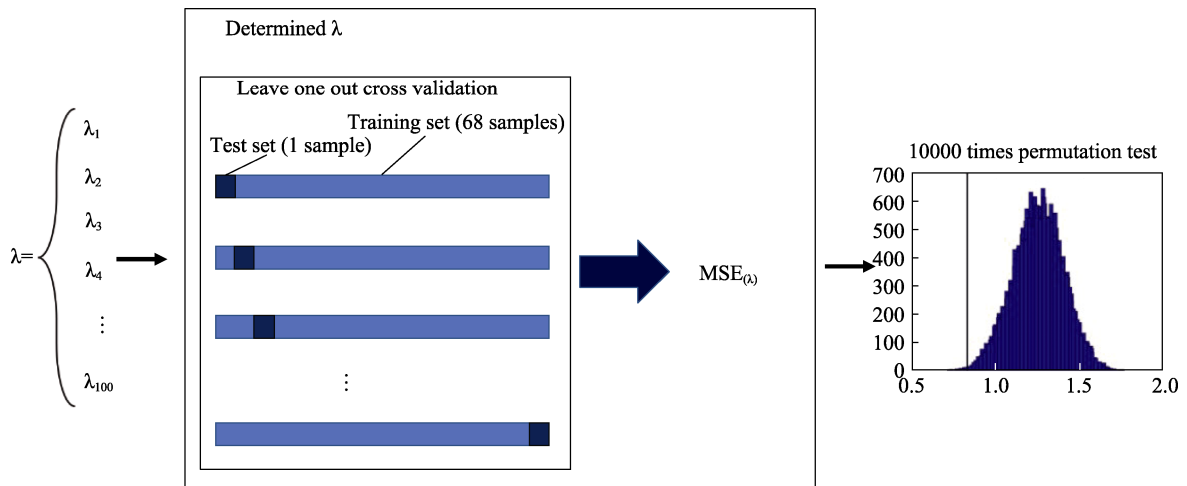


图 3 LASSO 回归模型构建流程

-0.14,  $p = 0.261$ )。

### 2.3.2 基于静息态功能连接的创造性思维预测模型

基于静息态功能连接, DMN 与 FPCN 的静态与动态功能连接既能显著预测创造性观点产生, 也能显著预测创造性观点评价。当  $\lambda$  设定为 0.1481 时, DMN 与 FPCN 的静态功能连接对创造性观点产生的预测效果表现最佳( $MSE = 10.55$ ), 预测值对真实值的解释率为 53.48%。当  $\lambda$  设定为 0.1085 时, DMN 与 FPCN 的动态功能连接对创造性观点产生的预测效果表现最佳( $MSE = 10.31$ ), 预测值对真实值的解释率为 68.17%。基于静态功能连接和动态功能连接的创造性观点产生预测模型分别如图 4、图 5 所示。两个模型的 10000 次置换检验表明两个模型都能够显著预测创造性观点产生表现( $p_1 < 0.001$ ;  $p_2 < 0.001$ )。在创造性观点产生的预测模型中, DMN 与 FPCN 之间的功能连接权重更大, 静态功能连接模型和动态功能连接中各连边的权重值详见附录表 S1 和 S2。

当  $\lambda$  设定为 0.1528 时, DMN 与 FPCN 的静态功能连接对创造性观点评价的预测效果表现最佳( $MSE = 10.92$ ), 预测值对真实值的解释率为 61.40%。当  $\lambda$  设定为 0.1502 时, DMN 与 FPCN 的动态功能连接对创造性观点评价的预测效果表现最佳( $MSE = 11.43$ ), 预测值对真实值的解释率为 66.90%。基于静态功能连接和动态功能连接的创造性观点评价预测模型分别如图 6、图 7 所示。10000

次置换检验表明两个模型都能够显著预测创造性观点评价表现( $p_1 < 0.001$ ;  $p_2 < 0.001$ )。在创造性观点评价的预测模型中 FPCN 内部的功能连接权重更大, 静态模型和动态模型各连边的权重值见附录表 S3 和表 S4。

### 2.3.3 预测模型的特异性检验

本研究通过 Steiger's Z 检验不同预测值与不同创造性思维真实值的相关来比较模型拟合程度。检验结果如表 1、表 2 所示, 结果表明无论是基于静态功能连接还是动态功能连接, 对创造性思维的预测模型均有较好的特异性(Duan et al., 2020; Xie et al., 2022)。

### 2.3.4 不同类型心智游移在静息态功能连接与创造性思维之间的中介效应

以静态功能连接为自变量, PCD 为中介变量, 创造性观点产生和评价分别为因变量进行中介分析, 并进行 5000 次 bootstrap 抽样检验。结果表明: PCD 完全中介了双侧颞上回(superior temporal gyrus, STG)之间的静态功能连接与创造性观点产生的关系( $\beta = 1.14$ , 95% CI [0.19, 2.58]), 如图 8; PCD 部分中介了 DLPFC 与 IFG 之间的静态功能连接与创造性观点评价的关系( $\beta = 0.77$ , 95% CI [0.01, 2.63]), 如图 9。

以动态功能连接为自变量, PCD 为中介变量, 创造性观点产生和评价为因变量进行中介分析, 并进行 5000 次 bootstrap 抽样检验。结果表明: PCD

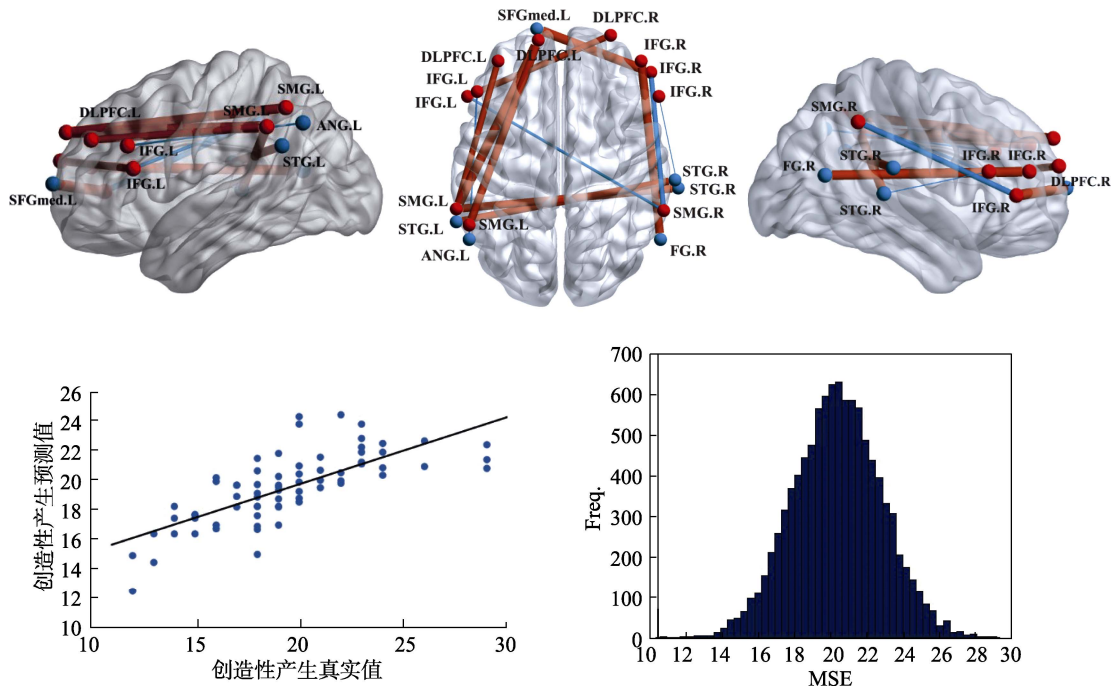


图 4 基于静态功能连接的创造性观点产生预测模型

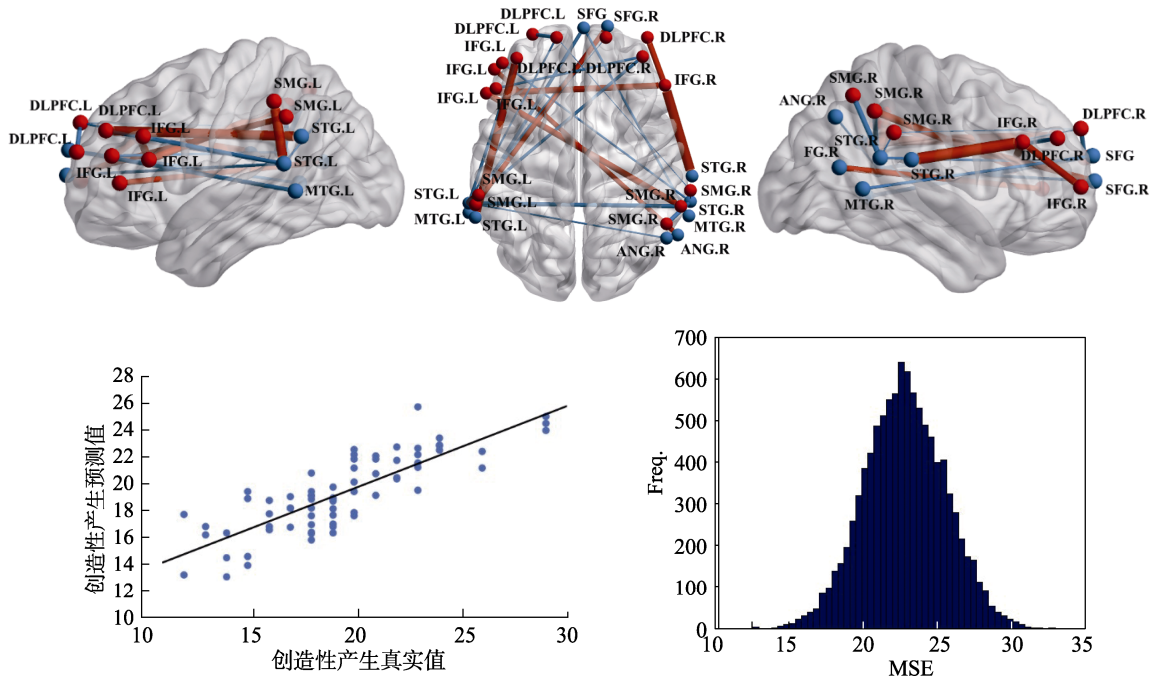


图 5 基于动态功能连接的创造性观点产生预测模型

注: 上图为预测模型中具体功能连接及其相应节点, 红色节点为额顶控制网络相关脑区, 蓝色节点为默认网络相关节点, 红色连边为预测模型中权重为正的功能连接, 蓝色连边为预测模型中权重为负的功能连接; 下左图为创造性观点产生预测值与真实值散点图; 下右图为置换检验结果, 竖线为真实 MSE 值。L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; FG: 梭状回; Freq.: 置换检验中各 MSE 出现频率; MSE: 均方误差。

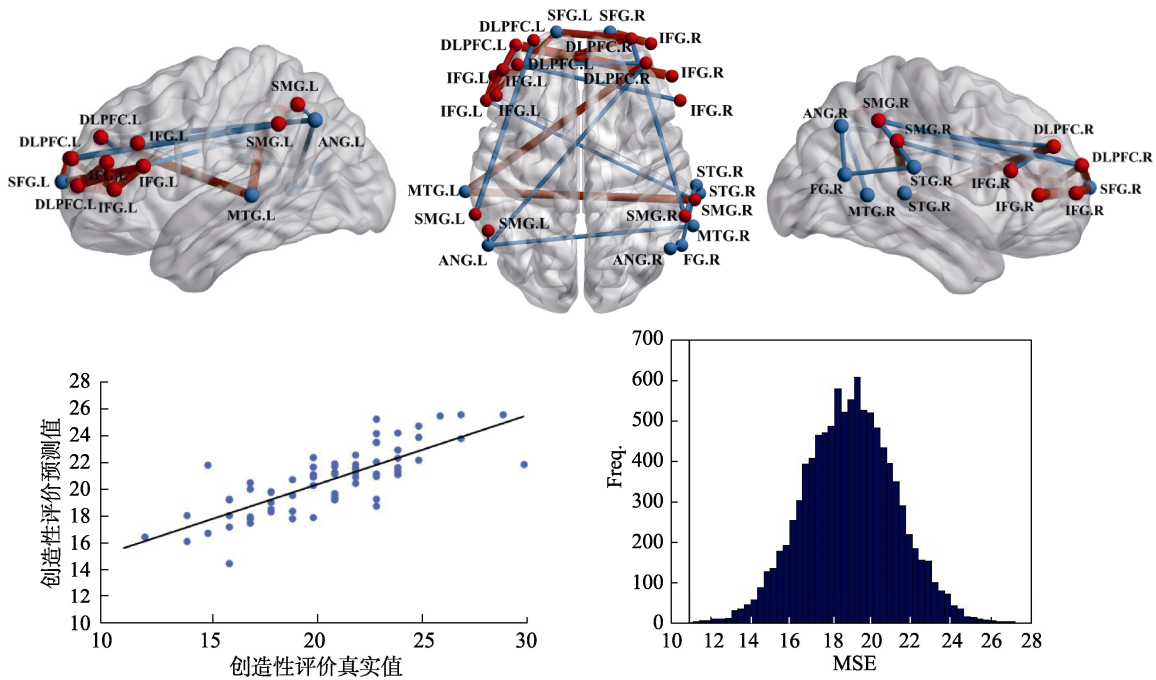


图 6 基于静态功能连接的创造性观点评价预测模型

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; MTG: 颞中回; FG: 梭状回; Freq.: 置换检验中各 MSE 出现频率; MSE: 均方误差。

完全中介了额上回(superior frontal gyrus, SFG)与左侧颞中回(middle temporal gyrus, MTG)之间的动态功能连接与创造性观点产生的关系( $\beta = -2.54, 95\%$

CI [-5.13, -0.69]), 如图 10。但未发现 PCD 在动态功能连接与创造性观点评价二者关系之间存在显著的中介作用。

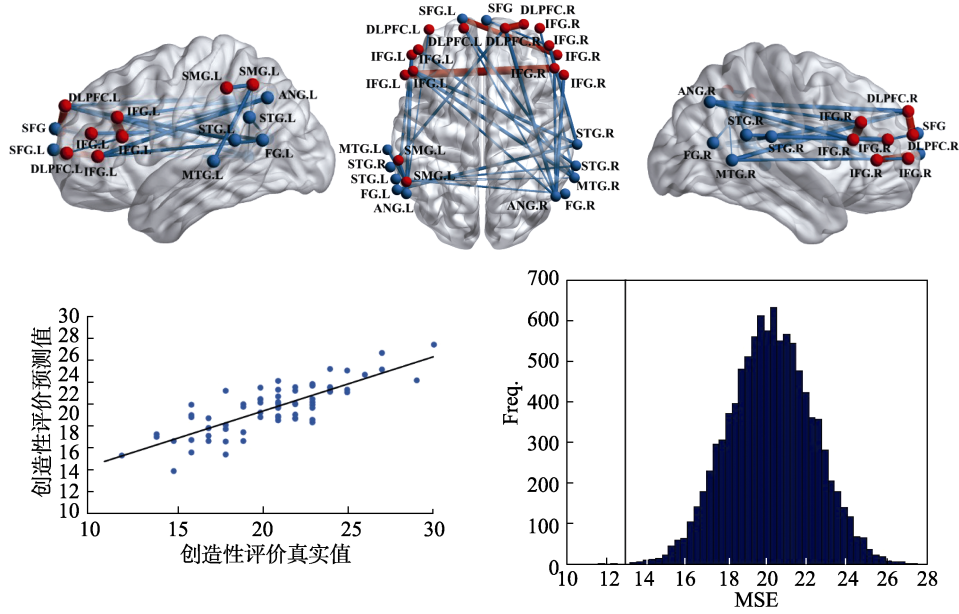


图 7 基于动态功能连接的创造性观点评价预测模型

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; MTG: 颞中回; FG: 梭状回; Freq.: 置换检验中各 MSE 出现频率; MSE: 均方误差。

表 1 基于静态功能连接的预测模型特异性

变量	产生	评价
产生预测值	0.73***	0.29**
评价预测值	0.32**	0.78***
Steiger's Z	3.60***	-4.49***

注: 前两行为研究变量的相关系数, 第三列为 Steiger's Z 检验效应量。\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

表 2 基于动态功能连接的预测模型特异性

变量	产生	评价
产生预测值	0.83***	0.38**
评价预测值	0.40***	0.81***
Steiger's Z	4.91***	-4.71***

注: 前两行为研究变量的相关系数, 第三列为 Steiger's Z 检验效应量。\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

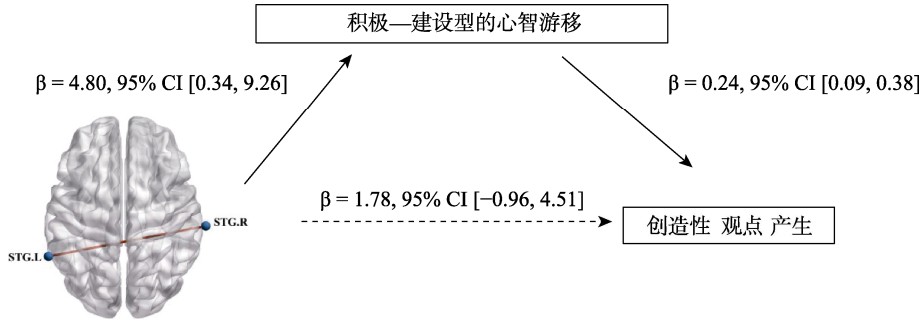


图 8 PCD 在双侧 STG 静态功能连接与创造性观点产生之间的中介作用

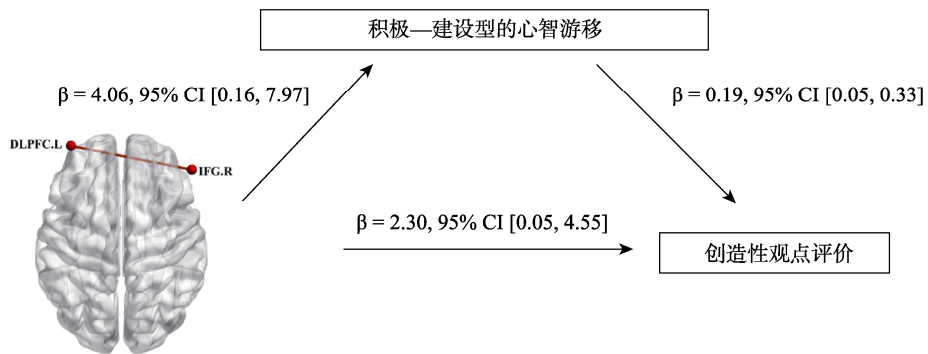


图 9 PCD 在左侧 DLPFC 与右侧 IFG 静态功能连接与创造性观点评价之间的中介作用

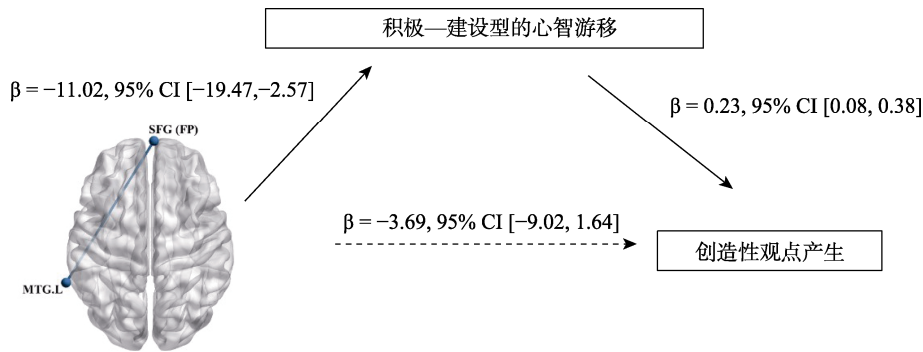


图 10 PCD 在左侧 MTG 与 SFG (FP) 动态功能连接与创造性观点产生之间的中介作用

注: L: 左侧; R: 右侧; STG: 颞上回; MTG: 颞中回; SFG (FP): 额极; DLPFC: 背外侧前额叶; IFG: 额下回; PCD: 积极-建设型心智游移。

此外, 以 GDD 为中介变量, 进行相应分析, 并未发现 GDD 在静息态功能连接和创造性思维关系之间的中介作用。

## 2.4 讨论

实验 1 使用静息态 fNIRS 复制并深化了以往 fMRI 研究的结果, 系统考察了 DMN 与 FPCN 功能连接和特质性心智游移对创造性观点产生和观点评价的预测作用, 也在特质层面初步验证了本研究的整体假设, 即只有当心智游移涉及自上而下加工时, 才能预测创造性表现的提升。相关分析结果显示: PAC 与 PCD 呈显著负相关, 特质 PCD 水平高的个体可能表现出更高水平的注意控制参与。这一发现提示 PCD 可能涉及自上而下的认知加工, 为本研究的假设提供了初步的行为证据支持。静息态下, DMN 与 FPCN 之间的静态与动态功能连接均能显著预测创造性思维。具体而言, 在创造性观点产生的预测模型中, DMN 与 FPCN 之间的功能连接权重更大, 且产生过程依赖于 DMN 与 FPCN 之间的动态功能连接, 而创造性观点评价的预测模型中 FPCN 内部的功能连接权重更大。中介分析的结果显示: PCD 完全中介了双侧 STG 之间的静态功能连接与创造性观点产生、FP 与左侧 MTG 之间的动态功能连接与创造性观点产生的关系, 并部分中介了左侧 DLPFC 与右侧 IFG 的静态功能连接与创造性观点评价的关系。PCD 的计划性和内容控制的有意性体现了其涉及自上而下的认知加工。高 PCD 倾向者往往将心智游移视为一种积极体验, 在具体的任务情境下更愿意有意识地进行心智游移 (McMillan et al., 2013)。有意心智游移 (deliberate MW) 的内容可能涉及未完成的任务或即将到来的任务, 即心智游移的有意性 (deliberation) 维度和任务相关性 (task relatedness) 维度可能存在一定程度

的重叠 (Xie et al., 2023)。因此, 实验 2 进一步从心智游移的有意性和任务相关性维度出发, 探讨二者与创造性思维的关系及其认知神经机制。

## 3 实验 2 有意心智游移和与任务相关的心智游移预测创造性思维的认知神经机制

### 3.1 研究目的与假设

实验 1 仅在特质层面上考察了心智游移与创造性思维在静息态功能连接层面上的特征, 无法说明在状态层面上心智游移和创造力的关系。而 PCD 在具体任务情境中最有可能体现在心智游移的任务相关性 (task-relatedness) 和有意性 (deliberation) 维度 (McMillan et al., 2013; Xie et al., 2023), MW 的任务相关性和有意性分别在内容和成因层面体现自上而下加工在 MW 状态中的参与。因此, 为了在实验 1 的基础上更进一步地刻画不同类型心智游移与创造性思维的关系, 实验 2 以创造性思维的酝酿过程为切入点, 将心智游移从成因上区分为有意的心智游移 (MW-d) 和无意的心智游移 (MW-s), 从内容上区分为任务无关的心智游移 (MW-u) 和任务有关的心智游移 (MW-r), 更为聚焦地探索不同类型的心智游移与创造性思维的关系。同时通过借助高生态效度的 fNIRS 技术对心智游移预测酝酿后创造性思维的认知神经机制进行探索。实验 2 假设: (1) 仅有 MW-d 与 MW-r 能够预测酝酿后创造性任务表现, MW-s 和 MW-u 对创造性任务表现无显著的预测效应; (2) 相比于成因, 心智游移的具体内容可能对于创造性思维表现更为重要, 因此相比于 MW-d, MW-r 能够更有效地预测酝酿后创造性任务表现; (3) 任务态中, 个体的创造性任务表现与 DMN 和 FPCN 之间静态功能连接和动态功能连接均呈正相

关。(4)酝酿期间的心智游移可以预测创造性思维任务的脑网络连接模式。

## 3.2 研究方法

### 3.2.1 被试

研究首先通过 G\*power 软件(Faul et al., 2009)确定被试量,通过先验效应量分析的方法,对于多元回归分析,在显著性为 0.05 的前提下达到中等水平的效应量( $f^2 = 0.15$ )至少需要 55 名被试。因此,本研究随机招募了 70 名在校大学生作为被试(11 名男性,59 名女性)。被试均为右利手、视力或矫正视力正常、无精神障碍或精神药物使用史。同时,由于有 7 名被试未完成全部实验,后续数据分析仅包含 63 名被试(11 名男性,52 名女性,年龄  $M = 19.20$  岁,  $SD = 0.62$  岁)。实验前所有被试均被告知实验仪器及实验内容的相关信息,且签署书面知情同意书,实验结束后被试均获得一定额度的报酬。实验方案获得陕西师范大学现代教学技术教育部重点实验室伦理委员会批准(L20240101-01)。

### 3.2.2 实验材料

(1)简版想象过程量表同实验 1。本研究中 PAC、PCD 以及 GDD 三个分量表的克隆巴赫  $\alpha$  系数分别为 0.86、0.71 以及 0.80。

(2)采用新颖寻求与自我提升问卷(Novelty Seeking and Augmentation Questionnaire, NSAQ)测量协变量即个体新颖寻求的倾向(Gocłowska et al., 2019)。问卷共包含 19 个题项,其中 14 个项目用于测量个体的新颖寻求(novelty seeking)的倾向,即个体寻找新鲜刺激或探索新环境的倾向,5 个项目用于测量个体的自我提升(augmentation)的倾向,即个体对已知事物进行进一步了解的倾向。在本研究中,新颖寻求与自我提升两个分量表的克隆巴赫  $\alpha$  系数分别为 0.88 与 0.82。

### 3.2.3 fNIRS 实验任务及流程

采用多用途任务(Alternative Uses Task, AUT; Guilford, 1968)对个体的创造性思维进行测量。AUT 任务要求被试尽可能地去思考一些常见物品的非常规用途(如:砖头的创造性用途是什么?答:磨成粉末做颜料)。在本实验中,根据前人研究结果(Baird et al., 2012; Yamaoka & Yukawa, 2019),酝酿前后两次 AUT 所采用的刺激材料完全一致。本研究采用的刺激材料分别为小刀、筷子和报纸,前后测中刺激材料的呈现顺序完全随机。本研究 AUT 共 3 个 block,在每个 block 中被试有 1.5 min 去思考某个常见物品的若干个非常规的用途,并进行口

头报告,报告内容由录音笔记录用于后续分析。

实验采用物品描述任务(Object Characteristics Task, OCT)作为对照任务(Beaty, Kenett, et al., 2018),OCT 任务通常要求被试在 1.5 min 内尽可能多地报告一个常见物品的特征,例如向被试提问:“钥匙有哪些特征?”。本实验中使用的 OCT 素材包括:钥匙、电线和塑料袋。获取被试回答后去除重复的和不合理的答案,如:“钥匙是湿的。”被试在每个材料上的 OCT 得分使用被试在本试次中的答案数来进行量化,总 OCT 表现使用被试在所有试次中的 OCT 得分均值进行量化。

本研究同时采用了客观与主观两种不同的量化手段,以更系统全面地量化 AUT 任务的表现。研究采用由沈汪兵与邵美玲(2019)开发的基于 JIEBA 中文分词器(Sun, 2013)与 Word2Vec 算法(Mikolov et al., 2013)的自动化评分模型对被试的 AUT 表现从流畅性(fluency)、灵活性(flexibility)以及独特性(uniqueness)三个方面进行客观评价,被试最终的流畅性、灵活性以及独特性表现为基于三个 block 得分结果的主成分分析(principal component analysis, PCA)结果。基于上述自然语言处理(natural language processing, NLP)的评分方法尽管在一定程度能够克服 AUT 传统评分的缺点,但是该类方法不涉及另一个创造性思维的核心评价维度,即适宜性。因此,为了尽可能全面地刻画个体的 AUT 表现,本研究同时也采用了同感评估技术(consensus assessment technique, CAT; Amabile, 1982)对被试的 AUT 表现进行主观量化,研究招募了三位创造性研究领域的相关研究人员作为评分者,并要求评分者根据答案的新颖性(originality)与适宜性(appropriateness)对每一个答案的创造性进行 1 到 7 点评分,为避免顺序效应,评分材料均随机化呈现。被试每个 block 的创造性表现为其得分最高的两个答案的平均值(Smeekens & Kane, 2016),最终表现为基于三个 block 表现的 PCA 值。

本研究采用持续注意反应任务(sustained attention to response task, SART; Robertson et al., 1997)作为酝酿期间的分心任务(Baird et al., 2012; Murray et al., 2021; Smeekens & Kane, 2016; Steindorf et al., 2021)。酝酿期设置于前后两次创造性思维任务之间。SART 是一种对认知资源要求较低的任务,常被用于诱发个体的心智游移(Leszczyński et al., 2017)。任务要求被试看见非目标刺激时按下“Q”键,看见目标刺激时不按键。本研究采用的刺激材料为

随机抽选的瑞文标准推理测验中的无意义几何图形,通过无意义几何图形的几何特征来区分目标刺激与非目标刺激(如:是否左右轴对称),不同的block中采用不同的几何特征作为区分,并在每个block开始之前呈现相应的提示。本任务中4个block的目标刺激的特征分别为对称、包含圆形、非对称以及不包含圆形。

实验中利用思维探针(thought-probe)探测被试在SART任务中的心智游移(Christoff et al., 2009; Smallwood et al., 2009)。每一个探针均包含两个问题:在该问题出现之前你在想什么?该问题共4个备选项:1)当前的任务(即SART);2)刚才的创造性任务;3)上述两者皆非;4)我不知道。本研究中,“任务相关/无关”的判断均以被试当前正在执行的SART任务为直接参照。因此,设置“刚才的创造性任务”这一选项的目的为精准捕捉与AUT相关的MW-r。仅当被试选择选项2或者3时,屏幕会呈现第二个问题,即你是有意间想到的还是无意间想到这件事情的?该问题共有两个备选项:1)有意;2)无意。根据被试的选择,初步将被试在SART期间的思维分为6类:1)集中于当前任务;2)有意且与任务有关(即和AUT相关,后同);3)无意且与任务有关;4)有意且与任务无关;5)无意且与任务无关;6)空白。MW-d为分类2与分类4的总和;MW-s为分类3与分类5的总和;MW-r为分类2与分类3的总和;MW-u为分类4与分类5的总和。

在正式实验开始之前,所有被试均先通过问卷星平台完成SIPI与新颖寻求及自我提升问卷。在告知被试本研究涉及实验的基本流程后,先进行练习实验。在练习阶段,首先向被试呈现AUT的例题并告诉其相应的创造性答案(如:砖头的创造性用途是什么?答:磨成粉末做颜料),随后为被试呈现SART中的刺激材料。在正式实验中,首先要求被试完成AUT,并在完成AUT后,SART开始前告知被试在完成SART后需要再完成一次同样的AUT,随后依次完成带有思维探针的SART以及第二次AUT,最后完成对照任务。总实验流程见图11。该范式设计(Baird et al., 2012; Smeekens & Kane, 2016)通过前后测AUT表现的差异量化酝酿效应,已被多项研究证实是探究MW与发散思维关系的有效方法(Du et al., 2025; Huang et al., 2024)。需要强调的是,本研究并非旨在区分创造性的经典阶段,而是聚焦于状态性MW的动态测量及其对即时创造性表现的预测作用,其中后测AUT主要作为“创

造性产出检测器”,用于捕捉酝酿期MW活动对创造性思维的即时影响。

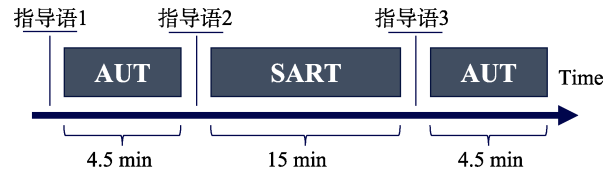


图11 实验2总流程

注: AUT: 多用途任务; SART: 持续注意反应任务。

本研究采用的SART任务包含4个block,每一个block包含120个试次,其中108个为非目标试次,12个为目标试次。每一个试次中,刺激的呈现时间为2000ms,刺激之间的间隔为1000ms。所有试次随机呈现。在SART任务中,以伪随机的形式每隔15~25个试次插入思维探针。实验全程被试佩戴fNIRS设备。

### 3.2.4 近红外数据采集

本研究采用fNIRS技术同实验1,光极排布同实验1。

### 3.2.5 数据分析

对于行为数据,先对本实验涉及的4种不同的心智游移的相关关系进行了探讨。随后,以人口学变量(年龄以及性别)、新颖寻求、前测创造性思维表现、心智游移(有意无意/有关无关)为自变量,后测创造性思维表现为因变量进行层次回归分析(hierarchical regression)。为了比较有意性与任务相关性二者之中以哪种分类更能有效地预测酝酿后创造性思维,研究通过LOOCV分析了不同模型中预测值与真实值的关系,并通过Steiger's Z检验比较了上述关系的差异。最后将所有类型心智游移放入同一个LASSO回归模型中检验何种心智游移更能稳定预测后测创造性思维表现。

本实验同实验1,同样通过LASSO回归首先构建了基于任务态功能连接的创造性思维预测模型,并同时考虑静态与动态功能连接。由于本研究AUT共三个组块,最终用于预测模型构建与后续分析的功能连接值为三个组块中对应值进行PCA降维后的值,功能连接矩阵构建如图12所示。根据上述功能连接矩阵构建预测模型。为了保证预测模型在酝酿前后的一致性,构建过程中将前后测数据一并纳入数据集中。同时,为了确保模型的特异性,研究同时针对OCT表现进行了预测分析。最后,以预测模型中权重不为0的预测变量所对应的前后测功能连接值为变量进行层次回归分析,其中均以人口学

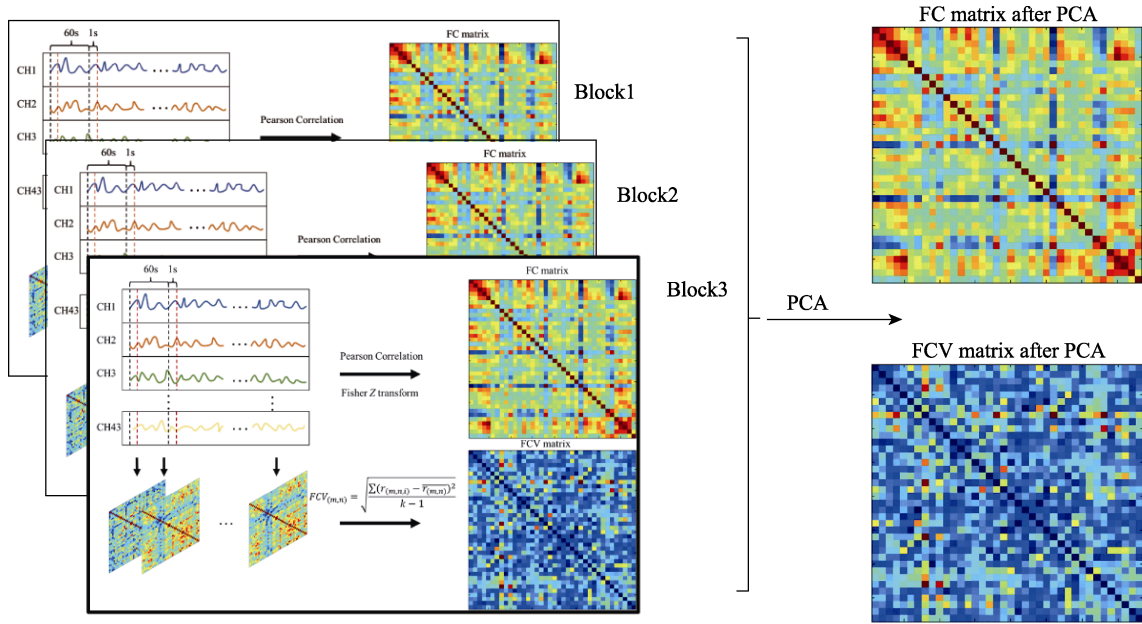


图 12 功能连接矩阵构建流程  
注: FC: 功能连接; FCV: 动态功能连接; PCA: 主成分分析。

变量为第一层自变量, 前测功能连接为第二层自变量, 心智游移为第三层自变量, 相对应后测功能连接为因变量。

### 3.3 结果

#### 3.3.1 行为结果

SART 任务的平均正确率为 0.92 ( $SD = 0.06$ )。SART 任务的错误率与各类 MW 的相关性分析结果如表 3 所示。SART 错误率仅与 MW-u 显著正相关 ( $r = 0.25, p = 0.049$ )。各类 MW 的占比如表 4 所示。

相关分析结果发现 MW-r 与 MW-d 呈高度正相关 ( $r = 0.93, p < 0.001$ ), MW-u 与 MW-s 呈高度正相关 ( $r = 0.85, p < 0.001$ )。在控制了对应的前测 AUT 表现以及可能的干扰变量之后, 发现仅有 MW-r 能够显著地预测酝酿后 AUT 的独特性 ( $\beta = 0.27, p < 0.01$ )、灵活性 ( $\beta = 0.19, p < 0.05$ ) 以及综合得分表现 ( $\beta = 0.20, p < 0.05$ ), 而 MW-d 仅仅能显著预测酝酿

表 4 SART 期间被试心智游移状况

变量	数目	频率 (总和)	频率 (心智游移)
MW-r	240	15.9%	57.1%
MW-u	180	11.9%	42.9%
MW-d	189	12.5%	45.0%
MW-s	231	15.3%	55.0%
MW-总	420	27.8%	100%

注: MW-r: 任务相关的心智游移; MW-u: 任务无关的心智游移; MW-d: 有意心智游移; MW-s: 无意心智游移; MW-总: 所有心智游移; 频率 (总和): 某类心智游移占有思维探针探测结果的比例; 频率 (心智游移): 某类心智游移占有心智游移的比例

后 AUT 的独特性表现 ( $\beta = 0.22, p < 0.05$ ), 无法显著预测灵活性 ( $\beta = 0.15, p > 0.05$ ) 以及综合得分表现 ( $\beta = 0.16, p > 0.05$ ), 由于未观测到 MW-r 或 MW-d 对酝酿后创造性任务的流畅性的显著效应, 后续分析中将不纳入流畅性维度。

使用 LOOCV 来测试预测模型的稳定性, 结果表明: 对于独特性, MW-r 能够在控制前测 AUT 独特性之后有效预测酝酿后 AUT 独特性 ( $r = 0.28, p = 0.027$ ), 为保证 LOOCV 的鲁棒性 (robustness) 对 LOOCV 结果进行 5000 次置换检验, 结果表明 LOOCV 的结果较为稳定 ( $p = 0.013$ )。但基于 MW-d 的预测模型稳定性较差 ( $r = 0.22, p = 0.087$ )。对于灵活性, MW-r 和 MW-d 均未通过 LOOCV (MW-r:  $r = 0.20, p = 0.115$ , MW-d:  $r = 0.13, p = 0.324$ )。对于综合得分, MW-r 和 MW-d 也均未通过 LOOCV (MW-r:

表 3 心智游移与 SART 任务错误率之间的相关性

变量	MW-r	MW-u	MW-d	MW-s	errors
MW-r	—				
MW-u	-0.18	—			
MW-d	0.93***	-0.11	—		
MW-s	0.14	0.85***	0.03	—	
errors	-0.07	0.25*	-0.04	0.18	—

注: MW-r: 任务相关的心智游移; MW-u: 任务无关的心智游移; MW-d: 有意心智游移; MW-s: 无意心智游移; errors: SART 任务的错误率

$r = 0.20, p = 0.116, MW-d: r = 0.14, p = 0.272$ )。对 LOOCV 的结果进行 Steiger's Z 检验发现, MW-r 与 MW-d 对 AUT 独特性的预测效应存在边缘显著的差异( $t = 1.35, p = 0.089$ )。由于针对灵活性和综合得分的预测模型稳定性未通过 LOOCV, 所以后续分析将不纳入灵活性维度和综合评分。

最后, 研究采用了 LASSO 回归对二者在回归模型中的权重进行了比较。结果表明, 当 L1 惩罚系数为 0.0165 时, LASSO 回归模型的误差的最小 ( $MSE = 0.56$ ), 此时 MW-r 的权重为 0.057, MW-d 的权重为 0。即相对于 MW-d, MW-r 在预测酝酿后 AUT 的独特性表现时更加重要, 所以后续 fNIRS 数据分析将排除 MW-d 维度。由于行为数据研究结果表明 MW-r 对创造性思维的预测效应主要集中在独特性维度上, 后续基于近红外任务态脑功能连接的预测模型均以独特性为因变量进行构建。

### 3.3.2 任务态脑功能连接的预测分析

结果表明, DMN 与 FPCN 的静态功能连接模型和动态功能连接模型都可以显著预测独特性。静态功能连接预测模型如图 13 所示, 当  $\lambda$  为 0.0244 时, 静态功能连接对独特性的预测效果表现最佳 ( $MSE = 0.51$ ), 预测值对真实值的解释率为 61.65%, 10000 次置换检验表明该模型能够显著预测独特性 ( $p < 0.001$ ); 动态功能连接预测模型如图 14 所示, 当  $\lambda$  为 0.0106 时, 预测效果表现最佳 ( $MSE = 0.55$ ), 预测值对真实值的解释率为 71.13%, 10000 次置换检

验表明该模型能够显著预测独特性 ( $p < 0.001$ )。静态和动态功能连接模型中各连边的权重值见附录表 S5 和 S6。分别将两个预测模型带入 OCT 进行拟合, 显示两个模型都能在一定程度上预测 OCT 表现 ( $r_{静} = 0.27, p_{静} = 0.031; r_{动} = 0.30, p_{动} = 0.020$ ); 两个模型的 Steiger's Z 检验结果都表明, 模型对独特性的预测能力显著大于对 OCT 表现的预测能力 ( $Z_{静} = 4.16, p_{静} < 0.001; Z_{动} = 4.54, p_{动} < 0.001$ ), 说明两个模型对独特性表现的预测具有较高的特异性。

### 3.3.3 MW-r 对创造性思维过程期间功能连接的预测

以预测模型中权重不为 0 的预测变量所对应的前后测功能连接值为变量进行层次回归分析, 其中以人口学变量为第一层自变量, 前测功能连接为第二层自变量, MW-r 为第三层自变量, 相对应后测功能连接为因变量。结果表明(表 5, 图 15)在酝酿后创造性思维期间左侧 IFG 与左侧 SMG 之间的静态功能连接、双侧 IFG 的静态功能连接会随着酝酿期间 MW-r 的增加而降低, 而右侧 IFG 与右侧 DLPFC 的动态功能连接会随着 MW-r 的增加而增加。

### 3.4 讨论

实验 2 通过任务态 fNIRS 技术, 系统考察了 DMN 与 FPCN 功能连接和状态性心智游移对发散思维的预测作用。行为结果表明, 相较于 MW-d, MW-r 对酝酿后 AUT 的独特性表现的预测作用更

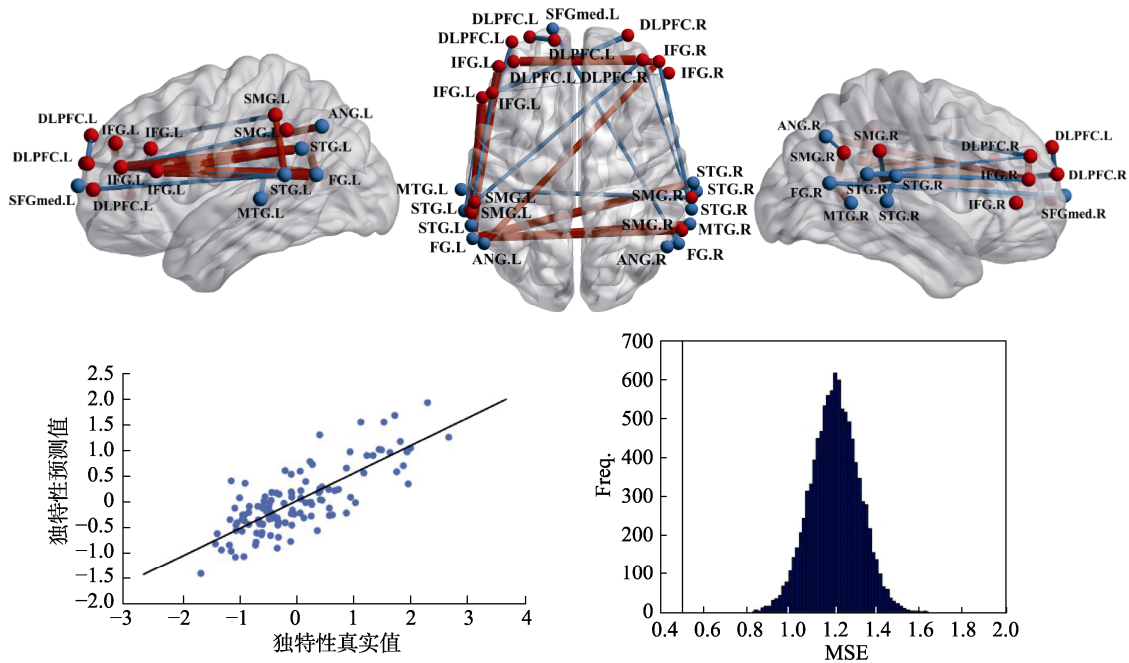


图 13 基于静态功能连接的发散思维独特性的预测模型

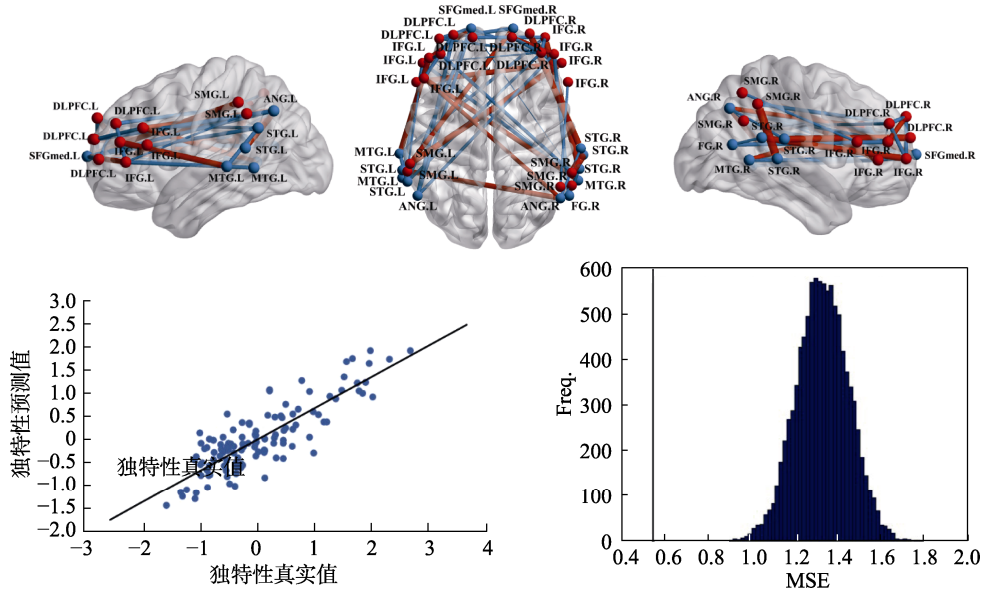


图 14 基于动态功能连接的发散思维独特性的预测模型

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; MTG: 颞中回; FG: 梭状回; Freq.: 置换检验中各 MSE 出现频率; MSE: 均方误差。

表 5 MW-r 对酝酿后创造性思维期间功能连接的回归

Predictor	IFG.L - SMG.L			IFG.L - IFG.R			DLPFC.R - IFG.R <sup>a</sup>		
	Step1	Step2	Step3	Step1	Step2	Step3	Step1	Step2	Step3
性别	-0.12	-0.05	-0.03	-0.33*	-0.09	0.00	0.10	0.12	0.11
年龄	-0.16	-0.05	-0.06	0.13	0.06	0.01	0.13	0.13	0.15
Pre		0.29*	0.30*		0.49***	0.65***		0.30*	0.24
MW-r			-0.27*	0.02		-0.45***			0.29*
R <sup>2</sup>	0.04	0.10	0.17	0.13	0.31	0.49	0.04	0.13	0.21
ΔR <sup>2</sup>	0.04	0.06	0.07	0.13	0.18	0.18	0.04	0.09	0.08
F	1.14	2.14	2.87*	4.11*	8.23***	10.03***	1.09	2.67	3.60*
ΔF	1.14	4.02*	4.65*	0.47	14.5***	13.9***	1.09	5.64*	5.74*

注: Pre: 酝酿前; L: 左侧; R: 右侧; IFG: 额下回; SMG: 缘上回; DLPFC: 背外侧前额叶; MW-r: 任务相关的心智游移; a: 基于动态功能连接的分析结果; \* $p < 0.05$ , \*\*\* $p < 0.001$

强。脑功能连接分析表明, 无论是静态还是动态的任务态功能连接, 均能够有效正向预测发散思维的独特性。酝酿期间的 MW-r 既能够负向预测(创造任务期间)左侧 IFG 与左侧 SMG、双侧 IFG 的静态功能连接, 也能正向预测(创造任务期间)右侧 IFG 与右侧 DLPFC 的动态功能连接。

### 4 总讨论

本研究利用高生态效度的 fNIRS 技术, 在特质和状态两个层面, 探讨心智游移与创造性思维的关系及神经机制。实验 1 揭示了特质性 MW (积极-建设型心智游移, 即 PCD)对自我感知创造力的预测作用及其神经机制。基于实验 1 的结果, 进一步

考虑状态层面下心智游移的异质性, 实验 2 发现酝酿期特定类型 MW (任务相关的心智游移, 即 MW-r)对随后 AUT 任务中发散思维独特性表现的预测作用及其神经机制。

本研究在前人研究(Beaty et al., 2015; Beaty, Kenett, et al., 2018; Xie et al., 2022)的基础上, 进一步证明不论是在静息态下还是在任务态下, DMN 与 FPCN 之间的静态与动态功能连接均能显著预测创造性思维, 这进一步证实, fNIRS 反映的创造性思维过程中的脑活动模式能够有效预测个体的创造性思维表现。且实验 1 发现: 静息态下创造性观点产生与评价的预测模型存在差异。在创造性观点产生的预测模型中, DMN 与 FPCN 之间的功能连接

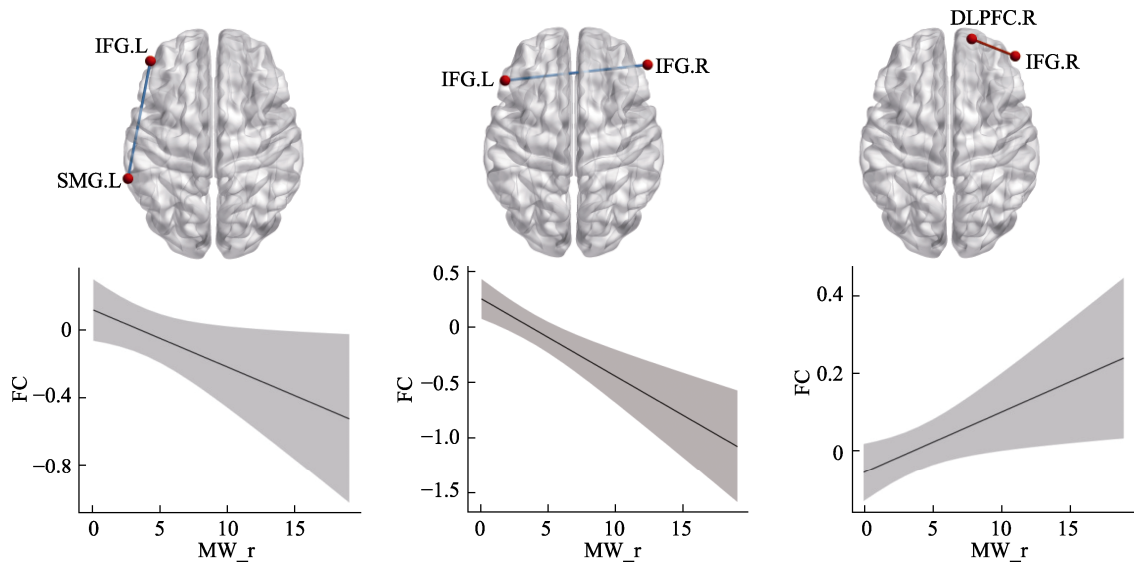


图 15 MW-r 对酝酿后创造性思维期间功能连接的预测

注: 上图中 a 为基于动态功能连接的分析结果; 下图为对应的边际均值估算结果; L: 左侧; R: 右侧; IFG: 额下回; SMG: 缘上回; DLPFC: 背外侧前额叶; MW-r: 任务相关的心智游移; FC: 功能连接估计值。

权重更大, 且该过程主要依赖于 DMN 与 FPCN 之间动态功能连接(Sun et al., 2019)。而在创造性观点评价的预测模型中, FPCN 内部的功能连接权重更大, 且该过程主要依赖于 DMN 与 FPCN 之间功能连接的稳定性。实验 1 的中介分析显示: PCD 分别在双侧 STG 之间的功能连接对创造性观点产生的正向预测、FP 与左侧 MTG 之间的功能连接对创造性观点产生的负向预测、左侧 DLPFC 与右侧 IFG 之间的功能连接对创造性观点评价的正向预测中发挥了中介作用; 实验 2 发现, 任务态下 DMN 和 FPCN 之间的静态和动态功能连接均能显著预测 AUT 的独特性, 且酝酿期间的 MW-r 能够通过降低左侧 IFG 与左侧 SMG、双侧 IFG 的静态功能连接、提升右侧 IFG 与右侧 DLPFC 的动态功能连接来正向预测创造性思维的独特性。

在脑网络层面, DMN 是支持自发思维产生的主要脑网络(Fox et al., 2015; Zhou & Lei, 2018), FPCN 是支持个体认知控制、注意分配等高级认知功能的脑网络(Maillet et al., 2019)。创造性观点产生过程需要对以往经验的再加工(Beaty, Thakral, et al., 2018), 且产生过程中个体对思维内容的约束性会随着时间的推移不断变化, 若干次产生过程与评价过程的交替出现, 最终才能产生新的创造性想法(Girn et al., 2020), FPCN 与 DMN 的耦合意味着对以往知识经验的重组和初步决策(Chrysikou, 2019; Kleinmintz et al., 2019); 而创造性观点评价过程则更依赖于自上而下的认知控制, 个体需要对

自发的思维内容进行持续性的注意控制, 从而实现已有想法的优化与提升。

在细致刻画心智游移与创造性思维的共同神经机制的基础之上, 本研究进一步对不同类型心智游移对创造性思维的预测作用及其神经机制的细微差异进行系统探讨。实验 1 发现, 双侧 STG 的静态功能连接对创造性观点产生的正向预测受到 PCD 的中介作用。双侧 STG 是 DMN 的核心脑区之一(Boccia et al., 2015; Buckner et al., 2008), 还参与摆脱思维定式、进行新颖表征和未来设想等认知过程(Beaty, Thakral, et al., 2018)。这表明 PCD 可能涉及个体破除思维定式、产生新异想法以及对未来进行设想等认知活动, 这与以往研究结果类似(McMillan et al., 2013; Stawarczyk, 2018)。实验 1 也发现 PCD 中介了 FP 与左侧 MTG 的功能连接对创造性观点产生的负向预测。左侧 MTG 被认为是对抽象词语进行语义表征的关键脑区(Wang et al., 2018), FP 是远距离联想的关键脑区(Green et al., 2012)。左侧 MTG 与 FP 之间稳定的功能连接可能表明在 PCD 中, 个体以已有的知识经验为材料进行远距离联想, 将看似无关的概念组合到一起, 从而产生新异想法(Bendetowicz et al., 2018), 而新异想法在被个体有意识地捕捉后(Fox & Beaty, 2019), 最终得以形成创新观点。同时, 本研究也发现左侧 DLPFC 与右侧 IFG 的功能连接对创造性观点评价的正向预测受到 PCD 的中介作用。左侧 DLPFC 与右侧 IFG 均是 FPCN 的核心节点, 左侧 DLPFC 与

注意控制转换有关(Vanderhasselt et al., 2009), 而右侧 IFG 在创造性思维过程中的主要作用是抑制信息检索过程中的无关干扰(Chen et al., 2020), 二者的功能连接在心智游移中可能表现为将个体富余的认知资源分配到其他任务中, 比如实现已有创造性想法的优化与提升。实验 1 虽通过中介分析揭示了静息态功能连接通过 PCD 在特质水平上影响创造性思维的潜在神经路径, 这为理解三者关系提供了比简单相关更进一步的机制假设, 但需考虑 PCD、相关脑连接与创造力在神经基础上存在固有重叠这一因素。为此, 未来研究应从因果验证角度出发, 采用非侵入式脑刺激(如 TMS 或 tDCS)靶向调控上述脑网络, 或通过纵向设计跟踪干预前后 PCD 与创造性表现的动态变化, 以明确特定功能连接-PCD-创造力链条的因果方向。综上, PCD 在一方面能够产生关于未来的新异想法, 进行长期的远距离联想, 有利于创造性观点产生。从另一方面来讲, 由于有认知控制的参与, PCD 可能是可控的, 因而个体可以在此期间优化自身的创新想法。

实验 2 揭示了 MW-r 对创造性思维过程中任务态脑功能连接的预测作用。在控制了相应的前测值后, MW-r 能够显著地负向预测创造性思维过程中左侧 IFG 与左侧 SMG、双侧 IFG 的静态功能连接。IFG 和 SMG 均为 FPCN 的核心节点。左侧 IFG 的脑活动可能会削弱个体的远距离联想能力(Marron et al., 2018), 而左侧 SMG 的脑活动则涉及对情景记忆的定向提取, 以将问题情境与已有的知识经验相匹配(Benedek et al., 2018)。二者间功能连接的减弱可能意味着个体对先验知识经验的依赖降低, 从而转向通过远距离联想产生新想法, 这一过程有助于提升创造性思维表现。而右侧 IFG 在创造性思维过程中的主要作用是抑制信息检索过程中的无关干扰(Chen et al., 2020)。双侧 IFG 之间的功能连接增强, 可能反映个体过度专注于问题本身, 联想能力受限, 从而对最终想法的独特性产生消极影响。酝酿期间的 MW-r 有助于个体脱离对当前问题的固着, 从而能够使个体在后续任务中进行远距离联想, 进而提升最终想法的创造力。研究还表明 MW-r 能正向预测右侧 IFG 与右侧 DLPFC 的动态功能连接。右侧 DLPFC 是对注意的整体控制的区域(Vanderhasselt et al., 2009), 二者的功能连接可能意味着个体集中注意于当前的任务中, 不断排除外界干扰。而其功能连接的动态变化则反映了个体注意控制水平的波动, 而这种波动与创造性思维过程的动态特性相

符(Girn et al., 2020; Hart et al., 2018)。MW-r 与右侧 IFG-DLPFC 动态功能连接的正向关系表明, 高 MW-r 个体在酝酿期间可能对看似与任务无关的想法具有更高的包容性, 经常将一些看似无关的想法纳入问题情境中, 从而产生更多的新异想法。值得注意的是, 实验 2 采用发散思维任务作为创造性思维测量指标, 虽然能有效捕捉 MW 对联想生成能力的预测作用, 但尚不足以全面评估创造性问题解决的多维认知过程(如聚合思维和问题重构能力)。未来研究可引入更复杂的创造性问题解决任务, 以系统考察 MW 对不同创造力成分的差异化预测作用。综上所述, 只有当心智游移的内容能够与问题情境建立关联时, 才可能促进发散思维的独特性, 而这类心智游移通常需要个体调动认知资源对其内容进行主动调控才能产生。

整合两项实验的结果发现, 在认知层面, 研究一从宏观特质上证明了“积极建设型内容”的重要性, 研究二则在微观状态上指出了“任务相关性”的关键作用, 二者共同勾勒出“有益于创造性思维的 MW”的核心特征。在神经机制层面, 本研究揭示了一个从“稳定特质”到“动态状态”的神经活动模式。虽然 PCD 和 MW-r 分别通过不同的神经路径预测创造性思维, 但二者都通过远距离联想这一核心认知过程发挥作用。PCD 主要依赖于 DMN 与 FPCN 网络的协同活动, 具体表现为: 双侧 STG 参与脱离定势的新颖表征生成, FP 与左侧 MTG 的稳定连接支持远距离联想, 进而整合看似无关的概念, 而左侧 DLPFC 与右侧 IFG 的协同则负责对自发联想进行筛选优化。这一神经模式与 Mednick (1962)提出的远距离联想理论高度吻合, 表明高 PCD 特质个体在放松状态下能够更有效地产生并保留有价值的远距离联想。MW-r 则通过动态调节 FPCN 的抑制功能来预测创造性表现, 具体表现为: MW-r 会减弱左侧 IFG-SMG 及双侧 IFG 的连接强度, 这种神经变化可能降低对先验知识的刻板依赖(Benedek et al., 2018), 为远距离联想的产生创造条件。与此同时, 右侧 DLPFC-IFG 动态功能连接的增强则支持执行控制的灵活切换(Zabelina & Andrews-Hanna, 2016), 使个体能够有效捕捉和重组这些被释放的远距离关联。这一发现与酝酿效应的无意识重组理论(Sio & Ormerod, 2009)高度一致, 说明 MW-r 暂时性地扩大联想范围, 并通过动态注意控制实现创意重组。在创造性思维过程中, PCD 提供了稳定的远距离联想基础, 而 MW-r 则通过状态性的神经调

节进一步释放联想潜力。PCD使个体具备更强的自发联想能力,而MW-r则在特定任务情境下通过调节注意控制来优化联想效果。这一发现不仅深化了我们对心智游移功能的理解,也为创造性认知的神经机制研究提供了新的理论视角。然而,本研究发现的心智游移和创造性思维的这一潜在机制尚未得到直接的实证验证,特别是在状态层面(即任务进行中的MW-r)与特质层面(即PCD)之间的交互尚不明确。未来的研究可尝试结合特质测量与动态心智游移评估,以探查高PCD个体是否确实更倾向于在任务中产生有意识且任务相关的心智游移内容,以进一步验证这种MW形式是否与更高的创造性成果相关。

本研究通过对心智游移的成因与内容进行区分,并借助高生态的fNIRS技术,探索不同类型的心智游移与创造性思维背后的神经机制,在阐明二者关系的同时,也为今后的实践工作提供了理论基础。首先,针对以往研究结论的矛盾以及经典研究(Baird et al., 2012)结论难以复制的困境,本研究创新性地将稳定的特质性MW倾向(通过实验1的静息态功能连接刻画)与动态的情境化MW状态(通过实验2的任务全程脑活动追踪)纳入统一设计,并从心智游移的多个维度出发(效价、内容和成因),考察了其与创造力的关系,揭示了心智游移预测创造性思维的边界条件。这一整合超越了以往研究中特质与状态分离的局限,解构了“MW是否有益”这一笼统命题,也为解释心智游移与创造力关系的矛盾结论提供了多层次、结构化的整合视角。

第二,在上述研究框架下,本研究实现了关键维度的深化。相较于前人仅关注MW的频率或有意性,本研究聚焦于任务相关性这一在理论上重要但实证研究尚少的维度。通过实验2的任务态功能连接分析,从脑网络层面检验了MW-r在创造力酝酿效应中的独特价值。研究发现,相较于更受关注的有意心智游移(MW-d),MW-r对创造力具有更强的预测效力。这一发现不仅填补了酝酿理论中情境适配性研究的缺口,更从神经机制层面证实:只有当自发思维内容与任务目标隐性相关时,MW才能最有效地激活创造性思维,从而深化了我们对创造性酝酿效应的理解。

第三,在研究范式的生态化改进方面,fNIRS技术在保证神经成像精度的同时,为被试提供了安静、允许自然坐姿、可进行肢体活动和口头报告的实验环境,更贴合酝酿期以及创造力任务所需的真

实环境,避免了以往使用功能性核磁共振成像(fMRI)对被试心智游移自然产生及创造力表现所造成的抑制。被试在接近真实生活情境中自由完成创造力任务,有助于捕捉更接近自然状态的心智游移及其对创造力的影响,增强了研究结果的生态效度和现实推广性。这并非简单的技术替换,唯有在最大限度保留认知自然性的范式下,才能真正揭示现实世界中心智游移的创造力赋能机制。

然而,本研究仍有一定的不足。第一,本研究所招募的被试均为在校大学生,具有一定的同质性,未来研究应当采用在人口学变量上更加多样性的被试群体,来验证研究结果的跨群体一致性。第二,心智游移的动态性也值得进一步的分析探索(Irving et al., 2020; Zanesco, 2020; Zanesco et al., 2020)。受限于问卷及思维探针的问题设置,本研究未能有效探索心智游移的动态性特征。未来研究可采用自然语言处理等技术对心智游移的内容进行更细致的划分(Fu et al., 2022; Li et al., 2021),也可考虑引入采用多维经验采样技术(如即时自我报告、情境信息和生物指标数据的同步高频次重复采样),以实现心智游移状态更精细的全景式动态捕捉,从而实现对不同心智游移内容细微差异的动态变化的探索。第三,本研究采用fNIRS技术以保障高生态效度并对以往fMRI的研究结果进行拓展,但fNIRS技术无法有效探测大脑深部核团的活动模式。而DMN的核心节点如扣带回(cingulate cortex)、海马(hippocampus)等均为大脑深部核团(Wang et al., 2020)。因此,未来研究还需要应用fMRI技术将上述脑区纳入分析,以进一步探索心智游移与创造性思维的认知神经机制。第四,为精准捕捉与AUT任务有关的心智游移,本研究在思维探针中使用“刚才的创造性任务”这一特定选项,这种方法可能在某种程度上对MW报告产生诱导效应,影响其自然性。然而,通过采用频次计算与AUT独特性的线性关系分析,有效控制了诱导效应对研究结果的影响,从而在一定程度上保证了MW-r与AUT独特性关联强度的可靠性。若诱导存在,应导致所有被试MW-r报告增加,但个体差异与AUT表现的关联仍可揭示真实关系。本研究结果证明了MW-r在创造性思维中的重要作用,未来研究还需进一步探索更优化的MW-r的诱发范式。

## 5 结论

本研究在脑网络层面揭示了心智游移和创造

性思维的共同神经机制,不论是在静息态还是任务态下,DMN与FPCN之间的静态与动态功能连接均可通过特定类型的心智游移显著预测创造性思维。具体表现在,静息态下,双侧颞上回之间的功能连接通过PCD的完全中介作用正向预测创造性观点产生,额极与左颞中回之间的功能连接通过PCD的完全中介作用负向预测创造性观点产生,而左背外侧前额叶与右额下回之间的功能连接通过PCD的部分中介作用正向预测创造性观点评价。任务态下,MW-r能够更稳定地预测酝酿期后创造性思维的独特性,且能够负向预测创造性任务期间个体左额下回与左缘上回之间的静态功能连接、双侧额下回之间的静态功能连接,并正向预测右背外侧前额叶与右额下回之间的动态功能连接。本研究在以往研究基础上进一步明确了不同类型心智游移和创造性思维的关系,表明并非所有类型的心智游移都对创造性思维有预测作用,强调了认知控制与个体意义在不同类型心智游移预测创造性思维过程中的重要作用。

### 参 考 文 献

- Abraham, A. (2018). *The neuroscience of creativity*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316816981>
- Agnoli, S., Vanucci, M., Pelagatti, C., & Corazza, G. E. (2018). Exploring the link between mind wandering, mindfulness, and creativity: A multidimensional approach. *Creativity Research Journal*, 30(1), 41–53. <https://doi.org/10.1080/10400419.2018.1411423>
- Allen, E. A., Damaraju, E., Plis, S. M., Erhardt, E. B., Eichele, T., & Calhoun, V. D. (2014). Tracking whole-brain connectivity dynamics in the resting state. *Cerebral Cortex*, 24(3), 663–676. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs352>
- Amabile, T. M. (1982). Social psychology of creativity: A consensual assessment technique. *Journal of Personality and Social Psychology*, 43(5), 997–1013. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.43.5.997>
- Baird, B., Smallwood, J., Mrazek, M. D., Kam, J. W., Franklin, M. S., & Schooler, J. W. (2012). Inspired by distraction: Mind wandering facilitates creative incubation. *Psychological Science*, 23(10), 1117–1122. <https://doi.org/10.1177/0956797612446024>
- Baird, B., Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2011). Back to the future: Autobiographical planning and the functionality of mind-wandering. *Consciousness and Cognition*, 20(4), 1604–1611. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.007>
- Beaty, R. E., Benedek, M., Kaufman, S. B., & Silvia, P. J. (2015). Default and executive network coupling supports creative idea production. *Scientific Reports*, 5, 10964. <https://doi.org/10.1038/srep10964>
- Beaty, R. E., Chen, Q. L., Christensen, A. P., Kenett, Y. N., Silvia, P. J., Benedek, M., & Schacter, D. L. (2020). Default network contributions to episodic and semantic processing during divergent creative thinking: A representational similarity analysis. *NeuroImage*, 209, 116499. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116499>
- Beaty, R. E., Kenett, Y. N., Christensen, A. P., Rosenberg, M. D., Benedek, M., Chen, Q., ... Silvia, P. J. (2018). Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(5), 1087–1092. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713532115>
- Beaty, R. E., Thakral, P. P., Madore, K. P., Benedek, M., & Schacter, D. L. (2018). Core network contributions to remembering the past, imagining the future, and thinking creatively. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30(12), 1939–1951. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01327](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01327)
- Bendetowicz, D., Urbanski, M., Garcin, B., Foulon, C., Levy, R., Brechemier, M. L., ... Volle, E. (2018). Two critical brain networks for generation and combination of remote associations. *Brain*, 141(1), 217–233. <https://doi.org/10.1093/brain/awx294>
- Benedek, M., Schues, T., Beaty, R. E., Jauk, E., Koschutnig, K., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2018). To create or to recall original ideas: Brain processes associated with the imagination of novel object uses. *Cortex*, 99, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.10.024>
- Boccia, M., Piccardi, L., Palermo, L., Nori, R., & Palmiero, M. (2015). Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain-specific creativity. *Frontiers in Psychology*, 6, 1195. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01195>
- Buckner, R. L., Andrews-Hanna, J. R., & Schacter, D. L. (2008). The brain's default network: Anatomy, function, and relevance to disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124(1), 1–38. <https://doi.org/10.1196/annals.1440.011>
- Chen, Q., Beaty, R. E., & Qiu, J. (2020). Mapping the artistic brain: Common and distinct neural activations associated with musical, drawing, and literary creativity. *Human Brain Mapping*, 41(12), 3403–3419. <https://doi.org/10.1002/hbm.25025>
- Christoff, K., Gordon, A. M., Smallwood, J., Smith, R., & Schooler, J. W. (2009). Experience sampling during fMRI reveals default network and executive system contributions to mind wandering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(21), 8719–8724. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900234106>
- Christoff, K., Irving, Z. C., Fox, K. C., Spreng, R. N., & Andrews-Hanna, J. R. (2016). Mind-wandering as spontaneous thought: A dynamic framework. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(11), 718–731. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.113>
- Chrysikou, E. G. (2018). The costs and benefits of cognitive control for creativity. In R. E. Jung & O. Vartanian (Eds.), *The Cambridge handbook of the neuroscience of creativity* (pp. 299–317). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316556238.018>
- Chrysikou, E. G. (2019). Creativity in and out of (cognitive) control. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.09.014>
- Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *NeuroImage*, 59(3), 2430–2437. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.09.003>
- Du, Q., Gordon, R., & Tolmie, A. (2025). The role of mind wandering during incubation in divergent and convergent creative thinking. *Brain Sciences*, 15(6), 595. <https://doi.org/10.3390/brainsci15060595>
- Duan, L., Van Dam, N. T., Ai, H., & Xu, P. (2020). Intrinsic organization of cortical networks predicts state anxiety: An

- functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study. *Translational Psychiatry*, 10(1), 402. <https://doi.org/10.1038/s41398-020-01088-7>
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G\*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149–1160. <https://doi.org/10.3758/BRM.41.4.1149>
- Fong, A. H. C., Yoo, K., Rosenberg, M. D., Zhang, S., Li, C. R., Scheinost, D., Constable, R. T., & Chun, M. M. (2019). Dynamic functional connectivity during task performance and rest predicts individual differences in attention across studies. *NeuroImage*, 188, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.11.057>
- Fox, K. C. R., & Beaty, R. E. (2019). Mind-wandering as creative thinking: Neural, psychological, and theoretical considerations. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.10.009>
- Fox, K. C., Spreng, R. N., Ellamil, M., Andrews-Hanna, J. R., & Christoff, K. (2015). The wandering brain: Meta-analysis of functional neuroimaging studies of mind-wandering and related spontaneous thought processes. *NeuroImage*, 111, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.02.039>
- Fu, Z., Wang, X., Wang, X., Yang, H., Wang, J., Wei, T., ... Bi, Y. (2022). Different computational relations in language are captured by distinct brain systems. *Cerebral Cortex*, 33(4), 997–1013. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac117>
- Fürst, G., Ghisletta, P., & Lubart, T. (2016). Toward an integrative model of creativity and personality: Theoretical suggestions and preliminary empirical testing. *The Journal of Creative Behavior*, 50(2), 87–108.
- Fürst, G., & Grin, F. (2018). A comprehensive method for the measurement of everyday creativity. *Thinking Skills and Creativity*, 28, 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.03.007>
- Girn, M., Mills, C., Roseman, L., Carhart-Harris, R. L., & Christoff, K. (2020). Updating the dynamic framework of thought: Creativity and psychedelics. *NeuroImage*, 213, 116726. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116726>
- Gocłowska, M. A., Ritter, S. M., Elliot, A. J., & Baas, M. (2019). Novelty seeking is linked to openness and extraversion, and can lead to greater creative performance. *Journal of Personality*, 87(2), 252–266. <https://doi.org/10.1111/jopy.12387>
- Golchert, J., Smallwood, J., Jefferies, E., Seli, P., Huntenburg, J. M., Liem, F., ... Margulies, D. S. (2017). Individual variation in intentionality in the mind-wandering state is reflected in the integration of the default-mode, frontoparietal, and limbic networks. *NeuroImage*, 146, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.025>
- Green, A. E., Cohen, M. S., Kim, J. U., & Gray, J. R. (2012). An explicit cue improves creative analogical reasoning. *Intelligence*, 40(6), 598–603. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2012.08.005>
- Guilford, J. P. (1968). *Intelligence, creativity, and their educational implications*. Edits Pub.
- Hart, Y., Goldberg, H., Striem-Amit, E., Mayo, A. E., Noy, L., & Alon, U. (2018). Creative exploration as a scale-invariant search on a meaning landscape. *Nature Communications*, 9, 5411. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07715-8>
- Huang, Y., Song, X., & Ye, Q. (2024). Mind wandering and the incubation effect: Investigating the influence of working memory capacity and cognitive load on divergent thinking. *Thinking Skills and Creativity*, 52, 101499. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2024.101499>
- Huba, G. J., Aneshensel, C. S., & Singer, J. L. (1981). Development of scales for three second-order factors of inner experience. *Multivariate Behavioral Research*, 16(2), 181–206. [https://doi.org/10.1207/s15327906mbr1602\\_4](https://doi.org/10.1207/s15327906mbr1602_4)
- Huba, G. J., & Tanaka, J. S. (1983). Confirmatory evidence for three daydreaming factors in the Short Imaginal Processes Inventory. *Imagination, Cognition and Personality*, 3(2), 139–147.
- Huppert, T. J., Diamond, S. G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2009). HomER: A review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain. *Applied Optics*, 48(10), 280–298. <https://doi.org/10.1364/ao.48.00d280>
- Irving, Z. C., Glasser, A., Gopnik, A., Pinter, V., & Sripada, C. (2020). What does “mind-wandering” mean to the folk? An empirical investigation. *Cognitive Science*, 44(10), e12908. <https://doi.org/10.1111/cogs.12908>
- Irving, Z. C., McGrath, C., Flynn, L., Glasser, A., & Mills, C. (2022). The shower effect: Mind wandering facilitates creative incubation during moderately engaging activities. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 18(6), 1096–1107. <https://doi.org/10.1037/aca0000516>
- Ivancovsky, T., Shamay-Tsoory, S., Lee, J., Morio, H., & Kurman, J. (2019). A dual process model of generation and evaluation: A theoretical framework to examine cross-cultural differences in the creative process. *Personality and Individual Differences*, 139, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2018.11.012>
- Jayasinghe, S. (2020). Conceptualizing mind wandering using a systems approach: A preliminary exploration. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, 54(4), 742–751. <https://doi.org/10.1007/s12124-020-09527-2>
- Karapanagiotidis, T., Bernhardt, B. C., Jefferies, E., & Smallwood, J. (2017). Tracking thoughts: Exploring the neural architecture of mental time travel during mind-wandering. *NeuroImage*, 147, 272–281. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.12.031>
- Kenett, Y. N., Levy, O., Kenett, D. Y., Stanley, H. E., Faust, M., & Havlin, S. (2018). Flexibility of thought in high creative individuals represented by percolation analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(5), 867–872. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717362115>
- Killingsworth, M. A., & Gilbert, D. T. (2010). A wandering mind is an unhappy mind. *Science*, 330(6006), 932. <https://doi.org/10.1126/science.1192439>
- Kleinmintz, O. M., Ivancovsky, T., & Shamay-Tsoory, S. G. (2019). The two-fold model of creativity: The neural underpinnings of the generation and evaluation of creative ideas. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.11.004>
- Kucyi, A., Esterman, M., Riley, C. S., & Valera, E. M. (2016). Spontaneous default network activity reflects behavioral variability independent of mind-wandering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48), 13899–13904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611743113>
- Leszczynski, M., Chaieb, L., Reber, T. P., Derner, M., Axmacher, N., & Fell, J. (2017). Mind wandering simultaneously prolongs reactions and promotes creative incubation. *Scientific Reports*, 7, 10616. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10616-3>
- Li, H. X., Lu, B., Chen, X., Li, X. Y., Castellanos, F. X., & Yan, C. G. (2021). Exploring self-generated thoughts in a resting state with natural language processing. *Behaviour Research Methods*, 54(4), 1725–1743. <https://doi.org/10.3758/>

- s13428-021-01710-6
- Li, Y., Xie, C., Yang, Y., Liu, C., Du, Y., & Hu, W. (2022). The role of daydreaming and creative thinking in the relationship between inattention and real-life creativity: A test of multiple mediation model. *Thinking Skills and Creativity*, 46, 101225. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101181>
- Liu, C., Ren, Z. T., Zhuang, K. X., He, L., Yan, T. R., Zeng, R. C., & Qiu, J. (2021). Semantic association ability mediates the relationship between brain structure and human creativity. *Neuropsychologia*, 151, 107722. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107722>
- Lu, K., Yu, T., & Hao, N. (2020). Creating while taking turns, The choice to unlocking group creative potential. *NeuroImage*, 219, 117025. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117025>
- Maillet, D., Beaty, R. E., Kucyi, A., & Schacter, D. L. (2019). Large-scale network interactions involved in dividing attention between the external environment and internal thoughts to pursue two distinct goals. *NeuroImage*, 197, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.054>
- Marchetti, I., Van de Putte, E., & Koster, E. H. W. (2014). Self-generated thoughts and depression: From daydreaming to depressive symptoms. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 131. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00131>
- Marron, T. R., Berant, E., Axelrod, V., & Faust, M. (2020). Spontaneous cognition and its relationship to human creativity: A functional connectivity study involving a chain free association task. *NeuroImage*, 220, 117064. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117064>
- Marron, T. R., Lerner, Y., Berant, E., Kinreich, S., Shapira-Lichter, I., Hendler, T., & Faust, M. (2018). Chain free association, creativity, and the default mode network. *Neuropsychologia*, 118(Part A), 40–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.018>
- Mayseless, N., Hawthorne, G., & Reiss, A. L. (2019). Real-life creative problem solving in teams: fNIRS-based hyperscanning study. *NeuroImage*, 203, 116161. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116161>
- McDaniel, C., Habibi, A., & Kaplan, J. (2025). Mind wandering during creative incubation predicts increases in creative performance in a writing task. *Scientific Reports*, 15(1), 24629. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09736-y>
- McMillan, R. L., Kaufman, S. B., & Singer, J. L. (2013). Ode to positive constructive daydreaming. *Frontiers in Psychology*, 4, 626. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00626>
- Mednick, S. A. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological Review*, 69(3), 220–232. <https://doi.org/10.1037/h0048850>
- Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G. S., & Dean, J. (2013). Distributed representations of words and phrases and their compositionality. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 26, 3111–3119.
- Mittner, M., Boekel, W., Tucker, A. M., Turner, B. M., Heathcote, A., & Forstmann, B. U. (2014). When the brain takes a break: A model-based analysis of mind wandering. *The Journal of Neuroscience*, 34(49), 16286–16295. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2062-14.2014>
- Mrazek, M. D., Phillips, D. T., Franklin, M. S., Broadway, J. M., & Schooler, J. W. (2013). Young and restless: Validation of the Mind-Wandering Questionnaire (MWQ) reveals disruptive impact of mind-wandering for youth. *Frontiers in Psychology*, 4, 560. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00560>
- Mooneyham, B. W., & Schooler, J. W. (2013). The costs and benefits of mind-wandering: A review. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 67(1), 11–18. <https://doi.org/10.1037/a0031569>
- Murray, S., Liang, N., Brosowsky, N., & Seli, P. (2021). What are the benefits of mind wandering to creativity? *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 18(3), 403–416. <https://doi.org/10.1037/aca0000420>
- Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). ‘Oops!’: Performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, 35(6), 747–758.
- Seli, P., Kane, M. J., Smallwood, J., Schacter, D. L., Maillet, D., Schooler, J. W., & Smilek, D. (2018). Mind-wandering as a natural kind: A family-resemblances view. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(6), 479–490. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.03.010>
- Shen, W., & Shao, M. (2019). *The classification method of words in text, the evaluation method and system of literal creativity* (CN Patent No. CN109241276A)
- [沈汪兵, 邵美玲. (2019). 文本中词语分类方法、言语创造性评价方法和系统 (中国专利号 CN109241276A).]
- Simonton, D. K. (2011). Creativity and discovery as blind variation: Campbell's (1960) BVSR model after the half-century mark. *Review of General Psychology*, 15(2), 158–174. <https://doi.org/10.1037/a0022912>
- Sio, U. N., & Ormerod, T. C. (2009). Does incubation enhance problem solving? A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 135(1), 94–120. <https://doi.org/10.1037/a0014212>
- Smallwood, J., Nind, L., & O'Connor, R. C. (2009). When is your head at? An exploration of the factors associated with the temporal focus of the wandering mind. *Consciousness and Cognition*, 18(1), 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2008.11.004>
- Smeekens, B. A., & Kane, M. J. (2016). Working memory capacity, mind wandering, and creative cognition: An individual-differences investigation into the benefits of controlled versus spontaneous thought. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 10(4), 389–415. <https://doi.org/10.1037/aca0000046>
- Stawarczyk, D. (2018). Phenomenological properties of mind-wandering and daydreaming: A historical overview and functional correlates. In K. Christoff & K. C. R. Fox (Eds.), *The Oxford handbook of spontaneous thought: Mind-wandering, creativity, and dreaming* (pp. 193–214). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190464745.013.18>
- Steindorf, L., Hammerton, H. A., & Rummel, J. (2021). Mind wandering outside the box: About the role of off-task thoughts and their assessment during creative incubation. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 15(4), 584–595. <https://doi.org/10.1037/aca0000373>
- Sun, J. (2013). “Jieba” Chinese for “to stutter” Chinese text segmentation: Built to be the best Python Chinese word segmentation module. <https://github.com/fxsjy/jieba>
- Sun, J., He, L., Chen, Q., Yang, W., Wei, D., & Qiu, J. (2021). The bright side and dark side of daydreaming predict creativity together through brain functional connectivity. *Human Brain Mapping*, 43(3), 902–914. <https://doi.org/10.1002/hbm.25693>
- Sun, J., Liu, Z., Rolls, E. T., Chen, Q., Yao, Y., Yang, W., ... Qiu, J. (2019). Verbal creativity correlates with the temporal variability of brain networks during the resting state. *Cerebral Cortex*, 29(3), 1047–1058. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy010>
- Tagliazucchi, E., & Laufs, H. (2014). Decoding wakefulness levels from typical fMRI resting-state data reveals reliable drifts between wakefulness and sleep. *Neuron*, 82(3),

- 695–708. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.03.020>
- Tempest, G. D., & Radel, R. (2019). Put on your (fNIRS) thinking cap: Frontopolar activation during augmented state creativity. *Behavioural Brain Research*, *373*, 112082. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112082>
- Unwalla, K., Cadieux, M. L., & Shore, D. I. (2021). Haptic awareness changes when lying down. *Scientific Reports*, *11*(1), 13479. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92192-1>
- Urqhart, E. L., Wang, X., Liu, H., Fadel, P. J., & Alexandrakis, G. (2020). Differences in net information flow and dynamic connectivity metrics between physically active and inactive subjects measured by functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) during a fatiguing handgrip task. *Frontiers in Neuroscience*, *14*, 167. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00167>
- Vanderhasselt, M. A., De Raedt, R., & Baeken, C. (2009). Dorsolateral prefrontal cortex and Stroop performance: Tackling the lateralization. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*(3), 609–612. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.3.609>
- Wang, S., Tepfer, L. J., Taren, A. A., & Smith, D. V. (2020). Functional parcellation of the default mode network: A large-scale meta-analysis. *Scientific Reports*, *10*(1), 16096. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72317-8>
- Wang, X., Wu, W., Ling, Z., Xu, Y., Fang, Y., Wang, X., ... Bi, Y. (2018). Organizational principles of abstract words in the human brain. *Cerebral Cortex*, *28*(12), 4305–4318. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx283>
- Xie, C., Li, Y., Yang, Y., Du, Y., & Liu, C. (2023). What's behind deliberation? The effect of task-related mind-wandering on post-incubation creativity. *Psychological Research*, *87*(7), 2157–2170. <https://doi.org/10.1007/s00426-023-01793-0>
- Xie, C., Luchini, S., Beaty, R. E., Du, Y., Liu, C. Y., & Li, Y. D. (2022). Automated creativity prediction using natural language processing and resting-state functional connectivity: An fNIRS study. *Creativity Research Journal*, *34*(4), 401–418. <https://doi.org/10.1080/10400419.2022.2108265>
- Yamaoka, A., & Yukawa, S. (2019). Does mind wandering during the thought incubation period improve creativity and worsen mood? *Psychological Reports*, *123*(5), 1785–1800. <https://doi.org/10.1177/0033294119896039>
- Zabelina, D. L., & Andrews-Hanna, J. R. (2016). Dynamic network interactions supporting internally-oriented cognition. *Current Opinion in Neurobiology*, *40*, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2016.06.014>
- Zanesco, A. P. (2020). Quantifying streams of thought during cognitive task performance using sequence analysis. *Behavior Research Methods*, *52*, 2417–2437. <https://doi.org/10.3758/s13428-020-01416-1>
- Zanesco, A. P., Denkova, E., & Jha, A. P. (2020). Self-reported mind wandering and response time variability differentiate prestimulus electroencephalogram microstate dynamics during a sustained attention task. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *33*(1), 28–45. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_01636](https://doi.org/10.1162/jocn_a_01636)
- Zedelius, C. M., & Schooler, J. W. (2016). The richness of inner experience: Relating styles of daydreaming to creative processes. *Frontiers in Psychology*, *6*, 2063. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.02063>
- Zedelius, C. M., Protzko, J., Broadway, J. M., & Schooler, J. W. (2021). What types of daydreaming predict creativity? Laboratory and experience sampling evidence. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, *15*(4), 596–611. <https://doi.org/10.1037/aca0000342>
- Zhou, X., & Lei, X. (2018). Wandering minds with wandering brain networks. *Neuroscience Bulletin*, *34*(6), 1017–1027. <https://doi.org/10.1007/s12264-018-0278-7>

## Differential predictions of various types of mind-wandering on creative thinking and the underlying neural mechanisms

LI Yadan<sup>1</sup>, XIE Cong<sup>2</sup>, ZHANG Jiyu<sup>1</sup>, SU Jiahao<sup>1</sup>

<sup>(1)</sup> MOE Key Laboratory of Modern Teaching Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China

<sup>(2)</sup> The School of Psychology and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China

### Abstract

Mind-wandering (MW), a prevalent mental experience, has been linked to creative thinking, but empirical findings remain inconsistent. Some research suggests that mind-wandering can enhance creative thinking, while other studies show no significant relationship. This inconsistency may arise from treating mind-wandering as a unitary construct, neglecting its heterogeneous nature. To address this gap, the present study used functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) to investigate the distinct relationships between different types of mind-wandering and creative thinking, alongside their underlying neural correlates, at both trait and state levels.

In Experiment 1 (trait level), resting-state brain activity was recorded via fNIRS. Participants completed the Generation and Selection Questionnaire (GSQ) to assess creative thinking at the trait level and the Short Imaginal Processes Inventory (SIPI) to measure positive-constructive daydreaming (PCD) and guilty-dysphoric daydreaming (GDD). Results showed that PCD mediated three distinct pathways: the positive relationship between functional connectivity of the bilateral superior temporal gyri and creative idea generation, the negative relationship between functional connectivity of the frontal pole and left middle temporal gyrus and creative idea

generation, and the positive relationship between functional connectivity of the left dorsolateral prefrontal cortex and right inferior frontal gyrus and creative idea selection.

Experiment 2 (state level) employed a creative incubation paradigm. Brain activity was recorded during an Alternative Uses Task (AUT). The Sustained Attention to Response Task (SART) served as the incubation period, during which thought probes assessed deliberate (MW-d), spontaneous (MW-s), task-related (MW-r) and task-unrelated (MW-u) mind-wandering. The findings revealed that MW-r was significantly associated with higher post-incubation AUT originality, whereas MW-u showed no such association. At the neural level, MW-r was linked to decreased functional connectivity between the left inferior frontal gyrus and left supramarginal gyrus, as well as between bilateral inferior frontal gyri, and to increased dynamic functional connectivity between the right dorsolateral prefrontal cortex and right inferior frontal gyrus.

These findings elucidate the specific types of mind-wandering that are associated with creative thinking, providing a multi-level neural account that helps resolve previous contradictory findings and deepens our understanding of the adaptive potential of mind-wandering.

**Keywords** mind-wandering, creative thinking, positive-constructive daydreaming, task-related mind-wandering, fNIRS

## 附录

表 S1 基于静态功能连接的创造性观点产生预测模型中各预测变量权重值

通道	节点 1		通道	节点 2		权重
	脑区	网络		脑区	网络	
28	DLPFC.L	FPCN	16	SMGL	FPCN	2.18
41	SFGL	DMN	38	IFG.R	FPCN	1.97
32	IFG.R	FPCN	8	FG.R	DMN	1.55
28	DLPFC.L	FPCN	14	SMGL	FPCN	1.30
16	SMGL	FPCN	12	STG.R	DMN	1.22
19	STG.L	DMN	10	STG.R	DMN	0.86
37	IFG.L	FPCN	33	DLPFC.R	FPCN	0.41
29	DLPFC.L	FPCN	16	SMGL	FPCN	0.38
38	IFG.R	FPCN	4	SMGR	FPCN	-0.45
37	IFG.L	FPCN	4	SMGR	FPCN	-1.63
30	IFG.L	FPCN	17	ANGL	DMN	-2.32
31	IFG.R	FPCN	12	STG.R	DMN	-2.90

表 S2 基于动态功能连接的创造性观点产生预测模型中各预测变量权重值

通道	节点 1		通道	节点 2		权重
	脑区	网络		脑区	网络	
25	IFG.R	FPCN	10	STG.R	DMN	8.25
21	STG.L	DMN	13	SMGL	FPCN	5.97
29	DLPFC.L	FPCN	19	STG.L	DMN	5.64
37	IFG.L	FPCN	25	IFG.R	FPCN	2.85
37	IFG.L	FPCN	4	SMGR	FPCN	2.81
39	IFG.R	FPCN	25	IFG.R	FPCN	2.07
40	SFG.R	DMN	16	SMGL	FPCN	0.87
43	IFG.L	FPCN	8	FG.R	DMN	0.60
9	STG.R	DMN	1	SMGR	FPCN	-0.34
21	STG.L	DMN	4	SMGR	FPCN	-0.56
35	DLPFC.L	FPCN	28	DLPFC.L	FPCN	-1.28
34	SFG	DMN	24	MTGL	DMN	-1.60
26	DLPFC.R	FPCN	21	STG.L	DMN	-2.05
29	DLPFC.L	FPCN	21	STG.L	DMN	-2.15
30	IFG.L	FPCN	26	DLPFC.R	FPCN	-3.05
40	SFG.R	DMN	21	STG.L	DMN	-3.27
34	SFG	DMN	11	MTG.R	DMN	-3.30
36	IFG.L	FPCN	9	STG.R	DMN	-3.83
28	DLPFC.L	FPCN	21	STG.L	DMN	-4.06
21	STG.L	DMN	3	ANG.R	DMN	-4.38
9	STG.R	DMN	7	SMGR	FPCN	-5.39
28	DLPFC.L	FPCN	7	SMGR	FPCN	-6.09
27	DLPFC.R	FPCN	21	STG.L	DMN	-6.29

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; FG: 梭状回; MTG: 颞中回; DMN: 默认网络; FPCN: 额顶控制网络

表 S3 基于静态功能连接对于创造性观点评价的预测模型

节点 1			节点 2			权重
通道	脑区	网络	通道	脑区	网络	
42	DLPFC.L	FPCN	38	IFG.R	FPCN	1.88
43	IFGL	FPCN	36	IFGL	FPCN	1.37
23	MTGL	DMN	7	SMGR	FPCN	1.31
40	SFGR	DMN	39	IFG.R	FPCN	1.30
26	DLPFC.R	FPCN	23	MTGL	DMN	1.02
41	SFGL	DMN	33	DLPFC.R	FPCN	0.93
43	IFGL	FPCN	37	IFGL	FPCN	0.57
42	DLPFC.L	FPCN	37	IFGL	FPCN	0.37
42	DLPFC.L	FPCN	36	IFGL	FPCN	0.29
43	IFGL	FPCN	33	DLPFC.R	FPCN	0.07
41	SFGL	DMN	37	IFGL	FPCN	0.04
35	DLPFC.L	FPCN	16	SMGL	FPCN	-0.05
10	STG.R	DMN	4	SMGR	FPCN	-0.38
33	DLPFC.R	FPCN	4	SMGR	FPCN	-0.38
26	DLPFC.R	FPCN	17	ANGL	DMN	-0.40
31	IFGR	FPCN	29	DLPFC.L	FPCN	-0.45
17	ANGL	DMN	11	MTGR	DMN	-0.51
29	DLPFC.L	FPCN	26	DLPFC.R	FPCN	-0.61
37	IFGL	FPCN	7	SMGR	FPCN	-0.66
10	STG.R	DMN	8	FG.R	DMN	-0.71
8	FG.R	DMN	3	ANG.R	DMN	-0.74
17	ANGL	DMN	14	SMGL	FPCN	-1.07
30	IFGL	FPCN	12	STG.R	DMN	-2.03

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; FG: 梭状回; MTG: 颞中回; DMN: 默认网络; FPCN: 额顶控制网络

表 S4 基于动态功能连接对于创造性观点评价的预测模型

节点 1			节点 2			权重
通道	脑区	网络	通道	脑区	网络	
37	IFGL	FPCN	25	IFG.R	FPCN	7.32
33	DLPFC.R	FPCN	27	DLPFC.R	FPCN	4.60
41	SFGL	DMN	38	IFG.R	FPCN	2.77
27	DLPFC.R	FPCN	3	ANG.R	DMN	-0.03
30	IFGL	FPCN	11	MTGR	DMN	-0.20
31	IFGR	FPCN	3	ANG.R	DMN	-0.34
43	IFGL	FPCN	17	ANGL	DMN	-0.47
32	IFGR	FPCN	10	STG.R	DMN	-0.54
30	IFGL	FPCN	10	STG.R	DMN	-0.56
22	FG.L	DMN	10	STG.R	DMN	-0.83
14	SMGL	FPCN	13	SMGL	FPCN	-1.23
28	DLPFC.L	FPCN	11	MTGR	DMN	-1.26
27	DLPFC.R	FPCN	21	STG.L	DMN	-1.30
36	IFGL	FPCN	9	STG.R	DMN	-1.64
23	MTGL	DMN	14	SMGL	FPCN	-1.67
43	IFGL	FPCN	22	FG.L	DMN	-1.99

续表

节点 1			节点 2			权重
通道	脑区	网络	通道	脑区	网络	
25	IFG.R	FPCN	3	ANG.R	DMN	-2.20
30	IFG.L	FPCN	3	ANG.R	DMN	-2.34
39	IFG.R	FPCN	11	MTG.R	DMN	-2.48
34	SFG	DMN	32	IFG.R	FPCN	-3.10
19	STG.L	DMN	8	FG.R	DMN	-3.13
14	SMG.L	FPCN	9	STG.R	DMN	-3.20
28	DLPFC.L	FPCN	3	ANG.R	DMN	-3.45
42	DLPFC.L	FPCN	17	ANGL	DMN	-4.07
14	SMG.L	FPCN	11	MTG.R	DMN	-5.20
19	STG.L	DMN	11	MTG.R	DMN	-5.69

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; FG: 梭状回; MTG: 颞中回; DMN: 默认网络; FPCN: 额顶控制网络

表 S5 基于静态任务态功能连接的独特性预测模型中各预测变量权重

节点 1			节点 2			权重
通道	脑区	网络	通道	脑区	网络	
37	IFG.L	FPCN	22	FG.L	DMN	0.35
29	DLPFC.L	FPCN	26	DLPFC.R	FPCN	0.31
22	FG.L	DMN	10	STG.R	DMN	0.26
36	IFG.L	FPCN	19	STG.L	DMN	0.26
37	IFG.L	FPCN	19	STG.L	DMN	0.16
22	FG.L	DMN	6	SMG.L	FPCN	0.15
22	FG.L	DMN	11	MTG.R	DMN	0.12
32	IFG.R	FPCN	29	DLPFC.L	FPCN	0.11
32	IFG.R	FPCN	17	ANGL	DMN	0.10
21	STG.L	DMN	13	SMG.L	FPCN	0.07
37	IFG.L	FPCN	33	DLPFC.R	FPCN	-0.01
35	DLPFC.L	FPCN	28	DLPFC.L	FPCN	-0.05
23	MTG.L	DMN	7	SMG.R	FPCN	-0.06
12	STG.R	DMN	10	STG.R	DMN	-0.08
26	DLPFC.R	FPCN	13	SMG.L	FPCN	-0.09
41	SFGmed.L	DMN	8	FG.R	DMN	-0.10
32	IFG.R	FPCN	9	STG.R	DMN	-0.11
42	DLPFC.L	FPCN	21	STG.L	DMN	-0.12
36	IFG.L	FPCN	16	SMG.L	FPCN	-0.13
6	SMG.L	FPCN	3	ANG.R	DMN	-0.18
26	DLPFC.R	FPCN	9	STG.R	DMN	-0.21
37	IFG.L	FPCN	21	STG.L	DMN	-0.27
38	IFG.R	FPCN	30	IFG.L	FPCN	-0.36

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; FG: 梭状回; MTG: 颞中回; DMN: 默认网络; FPCN: 额顶控制网络

表 S6 基于动态任务态功能连接的独特性预测模型中各预测变量权重

通道	节点 1		节点 2			权重
	脑区	网络	通道	脑区	网络	
12	STG.R	DMN	4	SMG.R	FPCN	1.19
33	DLPFC.R	FPCN	10	STG.R	DMN	0.75
38	IFG.R	FPCN	13	SMG.L	FPCN	0.67
39	IFG.R	FPCN	9	STG.R	DMN	0.62
36	IFG.L	FPCN	23	MTG.L	DMN	0.45
38	IFG.R	FPCN	37	IFG.L	FPCN	0.44
21	STG.L	DMN	3	ANG.R	DMN	0.42
40	SFGmed.R	DMN	13	SMG.L	FPCN	0.28
43	IFG.L	FPCN	41	SFGmed.L	DMN	0.27
30	IFG.L	FPCN	11	MTG.R	DMN	0.25
32	IFG.R	FPCN	27	DLPFC.R	FPCN	0.21
30	IFG.L	FPCN	3	ANG.R	DMN	0.04
35	DLPFC.L	FPCN	17	ANGL	DMN	-0.01
42	DLPFC.L	FPCN	41	SFGmed.L	DMN	-0.04
32	IFG.R	FPCN	8	FG.R	DMN	-0.07
42	DLPFC.L	FPCN	40	SFGmed.R	DMN	-0.07
39	IFG.R	FPCN	28	DLPFC.L	FPCN	-0.09
27	DLPFC.R	FPCN	26	DLPFC.R	FPCN	-0.12
39	IFG.R	FPCN	26	DLPFC.R	FPCN	-0.12
23	MTG.L	DMN	19	STG.L	DMN	-0.14
43	IFG.L	FPCN	11	MTG.R	DMN	-0.14
29	DLPFC.L	FPCN	4	SMG.R	FPCN	-0.16
41	SFGmed.L	DMN	19	STG.L	DMN	-0.17
43	IFG.L	FPCN	24	MTG.L	DMN	-0.17
35	DLPFC.L	FPCN	30	IFG.L	FPCN	-0.20
41	SFGmed.L	DMN	17	ANGL	DMN	-0.25
32	IFG.R	FPCN	17	ANGL	DMN	-0.26
41	SFGmed.L	DMN	38	IFG.R	FPCN	-0.26
43	IFG.L	FPCN	29	DLPFC.L	FPCN	-0.26
39	IFG.R	FPCN	23	MTG.L	DMN	-0.28
26	DLPFC.R	FPCN	19	STG.L	DMN	-0.36
42	DLPFC.L	FPCN	26	DLPFC.R	FPCN	-0.41
9	STG.R	DMN	8	FG.R	DMN	-0.48
10	STG.R	DMN	3	ANG.R	DMN	-0.49
31	IFG.R	FPCN	1	SMG.R	FPCN	-0.50
43	IFG.L	FPCN	16	SMG.L	FPCN	-0.63
43	IFG.L	FPCN	26	DLPFC.R	FPCN	-0.77
6	SMG.L	FPCN	3	ANG.R	DMN	-0.98
41	SFGmed.L	DMN	11	MTG.R	DMN	-1.01
36	IFG.L	FPCN	11	MTG.R	DMN	-1.17

注: L: 左侧; R: 右侧; SMG: 缘上回; STG: 颞上回; IFG: 额下回; DLPFC: 背外侧前额叶; ANG: 角回; SFG: 额上回; FG: 梭状回; MTG: 颞中回; DMN: 默认网络; FPCN: 额顶控制网络