科学通报 2026 年 第 71 卷 第 14 期: 3061 ~ 3063
亮点述评
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

海马体-前额叶低维协同编码驱动创造性高阶学习

张文宇[1], 郝宁[1,2*]

1. 华东师范大学心理与认知科学学院, 上海市心理健康与危机干预重点实验室, 上海 200062
2. 合肥师范学院, 青少年心理健康与危机干预安徽省哲学社会科学重点实验室, 合肥 230601
* 联系人, E-mail: nhao@psy.ecnu.edu.cn

Hippocampal-prefrontal low-dimensional coordinated encoding drives higher-order learning for creative ideation

Wenyu Zhang[1] & Ning Hao[1,2*]

[1] *Shanghai Key Laboratory of Mental Health and Psychological Crisis Intervention, School of Psychology and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China*
[2] *Key Laboratory of Philosophy and Social Science of Anhui Province on Adolescent Mental Health and Crisis Intelligence Intervention, Hefei Normal University, Hefei 230601, China*
* Corresponding author, E-mail: nhao@psy.ecnu.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0068

创造性思维是人类智能的核心体现, 推动着人类文明进步与社会发展[1]. 认知科学与教育心理学一直十分关注“学习他人的创造性范例并启发自身”这一创造方式. 创造力联想理论认为, 创造性思维过程主要是基于已有的概念基础, 展开发散性联想, 再对不同要素进行重新整合, 继而生成原创性观点[2]. 这一理论描述了创造性观点生成的过程机制, 但相对忽视了在观点生成之前, 个体对外在知识信息进行学习与整合的过程. 虽然目前已有研究表明对他人创造性范例的学习能够有效提升后续创新表现[3], 但大脑如何对外在范例信息进行高阶学习(指超越简单记忆复制的抽象化规则迁移), 并将其转化为自身原创性观点, 这一认知过程背后的神经机制仍不清楚.

在过往创造性思维神经基础的研究中, 海马体与前额叶皮层被证明发挥着重要作用[4~6]. 海马体是记忆编码与提取最重要的脑区之一, 其在情景记忆整合、联想学习等认知过程中起着关键作用[7]; 前额叶皮层, 特别是腹外侧前额叶皮层(ventrolateral prefrontal cortex, vlPFC), 则在语义选择、认知控制与规则抽象中扮演着不可或缺的角色[8]. 近年研究表明, 这两个脑区可能相互协同作用, 以支持知识的泛化与灵活运用[9]. 但具体到创造性思维领域, 二者如何分工协作以实现从范例学习到创意生成的转化, 目前尚未有明确答案. 同时, 大脑对信息的低维表征(指用较少的神经维度编码信息核心特征)作为一种高效的信息处理方式, 已被证实参与了概念的学习及记忆泛化的形成[10,11], 但这一信息处理方式能否解释创造性学习中的范例信息抽象过程, 仍缺乏直接的实验证据.

近日, 首都师范大学罗劲教授团队与北京师范大学秦绍正教授团队合作在*Nature Communications*发表了题为“Hippocampal-prefrontal orchestration supports higher-order learning for creative ideation”的研究论文, 系统揭示了高阶学习支持创造性思维的神经机制[12]. 该研究创新性地提出“海马体-前额叶协同编码”假说, 证实左海马体通过降低表征维度实现范例信息的结构化压缩(指去除冗余细节, 保留抽象化结构), 同时增强与前额叶的功能连接促进抽象信息的迁移, 二者共同构成了区别于普通记忆的创造性高阶学习神经通路. 该研究采用“范例学习-创造性观点生成-线索回忆”三阶段范式, 结合文本与图片两种刺激材料, 通过整合功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术与认知行为实验, 构建了多维度、交叉验证的研究体系. 在核心实验中, 参与者首先学习“物体-创造性用途”配对范例(如“打蛋器-烛台”), 随后为目标物体生成新颖用途, 最后回忆学习阶段的范例. 基于创造性评分的个体内中位数分割, 将学习试

引用格式: 张文宇, 郝宁. 海马体-前额叶低维协同编码驱动创造性高阶学习. 科学通报, 2026, 71: 3061–3063
Zhang W, Hao N. Hippocampal-prefrontal low-dimensional coordinated encoding drives higher-order learning for creative ideation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3061–3063, doi: 10.1360/CSB-2026-0068

© 2026《中国科学》杂志社

次分为“高后续创造性(higher subsequent creation, HSC)”和“低后续创造性(lower subsequent creation, LSC)”两组, 通过对比分析两组的神经编码差异, 挖掘支持创造性学习的关键神经标志物.

行为结果表明, 创造性范例学习对后续创新具有促进作用. 相比无范例学习、普通范例学习等对照条件, 创造性范例学习组的后续创新表现更好. 这证实了范例学习中“创造性”特征的关键支撑作用. 同时, 研究发现“模仿-创新权衡”效应: 范例模仿能促进记忆保持, 但是也会抑制创造力输出, 如果采取适当的定向遗忘以及低负荷孵化的模式, 则可以减弱无关细节记忆、优化表征抽象, 进而提升后续创新表现. 在大脑层面, 本研究对海马体激活模式进行了主成分分析(图1(a)), 识别出了创造性高阶学习的两个核心神经标记物. 一是左海马体表征维度的降低: HSC试次的左海马体表征维

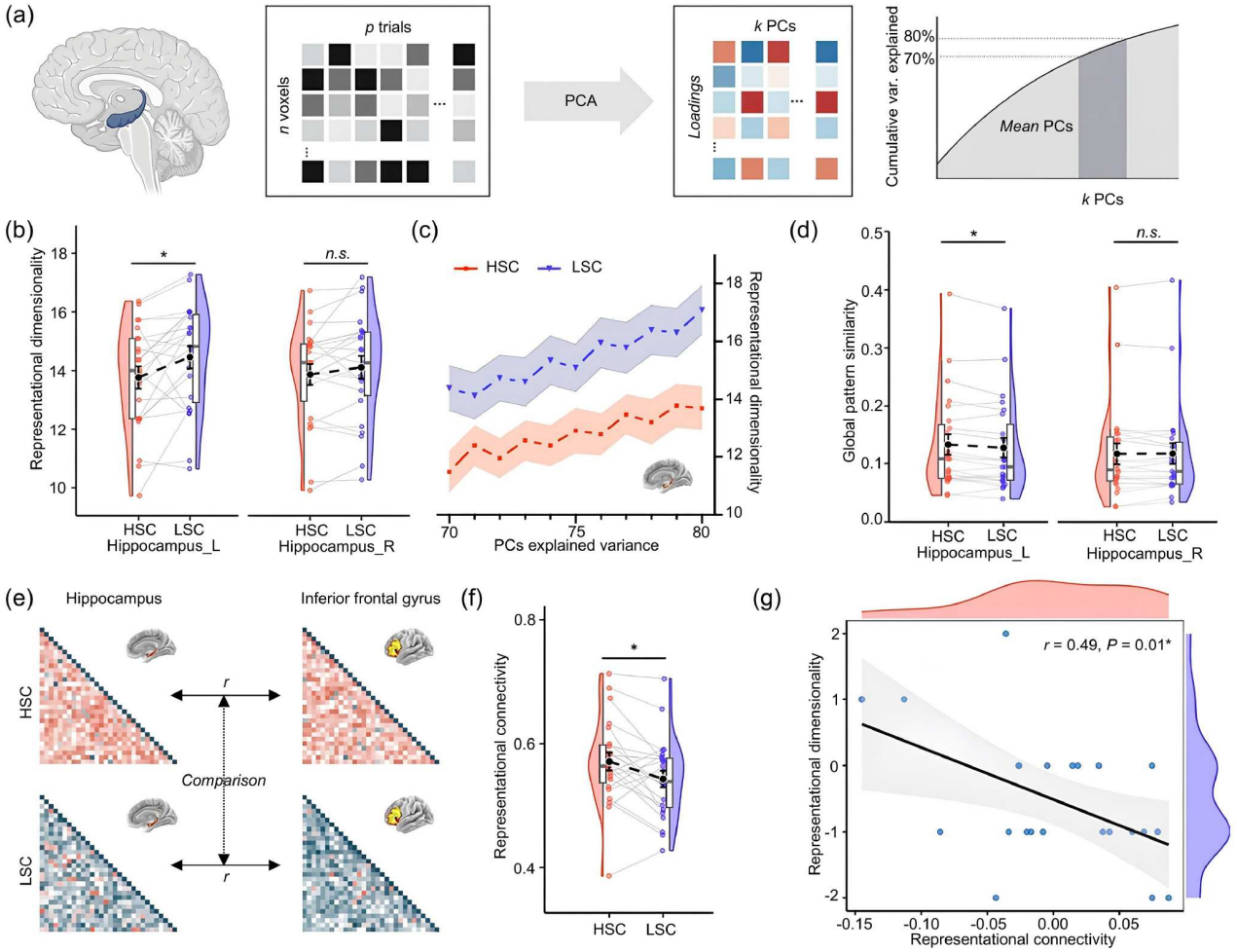


图 1 海马体对范例信息的低维表征及其与前额叶的表征连接共同促进创造性观点生成(修改自文献[12]). (a) 对范例学习期间海马体激活模式进行主成分分析. (b) 高后续创作(higher subsequent creation, HSC)试次条件下左侧海马体对范例信息表征维度更低. (c) 在70%~80%解释方差范围内, HSC试次条件下的海马体表征维度均低于低后续创作(lower subsequent creation, LSC)试次. (d) HSC试次条件左侧海马体全局模式相似性显著高于LSC试次条件. (e) 左侧海马体与左额下回表征差异矩阵相关性计算. (f) HSC试次条件左侧海马体与左额下回表征连接性显著高于LSC试次条件. (g) 海马体-额下回表征连接性与海马体表征维度呈显著负相关

Figure 1 The hippocampus's low-dimensional representation of exemplar information and its representational connectivity with the prefrontal cortex jointly promote the subsequent generation of creative ideas (reproduced from Ref. [12]). (a) Performed principal component analysis on the hippocampal activation patterns during exemplar learning phase; (b) under the higher subsequent creation (HSC) trial condition, the left hippocampus exhibited a lower representational dimension of exemplar information; (c) within the range of 70%–80% explained variance, the hippocampal representational dimension under the HSC trial condition was consistently lower than that under the lower subsequent creation (LSC) trial condition; (d) the global pattern similarity of the left hippocampus under the HSC trial condition was significantly higher than that under the LSC trial condition; (e) calculated the correlation of the representational dissimilarity matrix between the left hippocampus and the left inferior frontal gyrus; (f) under the HSC trial condition, the representational connectivity between the left hippocampus and the left inferior frontal gyrus was significantly higher than that under the LSC trial condition; (g) the hippocampus-inferior frontal gyrus representational connectivity exhibited a significant negative correlation with the hippocampal representational dimension

度显著低于LSC试次(图1(b, c)), 且呈现出更高的全局模式相似性(图1(d)). 这表明海马体通过维度压缩实现范例核心特征的提取与结构化编码, 而非简单存储细节信息. 二是海马体-前额叶功能连接的增强: HSC试次中左海马体与左前额叶的功能连接和表征连接(指不同脑区对同一信息神经编码模式的相似性)均显著强于LSC试次(图1(e, f)), 且这种连接增强与海马体表征维度降低呈负相关(图1(g)). 这提示前额叶可能通过调节海马体的表征压缩过程, 促进抽象信息的提取与整合. 跨实验验证显示, 这两个神经标记物在文本与图片范例学习中均稳定存在, 且与创造性评分呈显著负相关, 说明了其较好的普适性与有效性.

此外, 这项工作借助跨阶段分析深入探讨了创造性高阶学习的神经表征迁移机制. 结果发现HSC试次中左海马体的低维表征与前额叶的全维表征在学习与创造性生成阶段的相似度显著更高, 这表明抽象化的神经表征能够从学习阶段有效迁移至创新阶段. 进一步的解码分析发现, 左前额叶能够基于学习阶段的神经模式, 准确区分创造性生成阶段的HSC与LSC试次, 且这种解码能力与创造性评分正相关, 而去除海马体低维表征后该解码效应消失, 这证实了海马体低维编码对前额叶泛化解码的关键支持作用. 此外, 通过与“后续记忆效应”的对比, 研究发现支持创造性学习的神经机制(低维压缩+强连接)与支持一般记忆的神经机制(高激活+高模式相似性)存在本质差异, 进一步明确了支持创造性思维的高阶学习区别于普通记忆的独特神经路径.

综上所述, 本研究首创性地结合了基于体素的主成分分析等方法, 深入揭示了范例学习促进后续创新的认知神经机制. 该研究表明: 海马对记忆信息的低维度抽象化表征, 以及海马-前额叶更强的功能耦合, 共同构成了支持创造性高阶学习的特异性神经机制, 且这一机制与普通记忆的编码机制存在本质区别. 该研究结论也提示, 相比于精确记忆的“强学习”模式, 适度遗忘的“弱学习”或许会更加有利于创造力的激发. 这也在一定程度上契合了“得意忘言”这一古人理念, 即: 既得其意, 则忘其言. 这项工作通过构建跨阶段双向验证的研究体系, 为理解创造性观念如何从已有学习经验中“生成”而非“复制”, 提供了关键神经科学证据. 受限于fMRI技术时间分辨率的局限, 未来研究可在此基础上结合脑磁图(magnetoencephalograph, MEG), 颅内脑电(intracranial electro-encephalogram, iEEG)等具备更高时间分辨率的技术深入探索创造性高阶学习的动态神经变化. 本研究也提示我们可以通过引导适度遗忘、降低记忆负荷等方式强化外在信息的低维抽象表征, 从而促进知识内化与灵活迁移, 激发个体创造力.

参考文献

1 Hennessey B A, Amabile T M. Creativity. Annu Rev Psychol, 2010, 61: 569–598
2 Mednick S. The associative basis of the creative process. Psychol Rev, 1962, 69: 220–232
3 Fink A, Koschutnig K, Benedek M, et al. Stimulating creativity via the exposure to other people’s ideas. Hum Brain Mapp, 2012, 33: 2603–2610
4 He L, Li Y, Zhuang K, et al. Network connectivity of the creative brain: current knowledge and future directions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 25–36 [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]
5 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
6 Cabeza R, Becker M, Davis S W. Are the hippocampus and its network necessary for creativity? Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117: 13870–13872
7 Wang J X, Rogers L M, Gross E Z, et al. Targeted enhancement of cortical-hippocampal brain networks and associative memory. Science, 2014, 345: 1054–1057
8 Mack M L, Preston A R, Love B C. Ventromedial prefrontal cortex compression during concept learning. Nat Commun, 2020, 11: 46
9 Samborska V, Butler J L, Walton M E, et al. Complementary task representations in hippocampus and prefrontal cortex for generalizing the structure of problems. Nat Neurosci, 2022, 25: 1314–1326
10 Sheng J, Zhang L, Liu C, et al. Higher-dimensional neural representations predict better episodic memory. Sci Adv, 2022, 8: eabm3829
11 Tang E, Mattar M G, Giusti C, et al. Effective learning is accompanied by high-dimensional and efficient representations of neural activity. Nat Neurosci, 2019, 22: 1000–1009
12 Zhang Z, Li Z, Ding R, et al. Hippocampal-prefrontal orchestration supports higher-order learning for creative ideation. Nat Commun, 2026, 17: 464