

科学创造思维的脑机制研究与教学模型构建

胡航^{1a,b}, 魏心怡^{1a}, 廖伊雯²

(1.西南大学 a.教师教育学院; b.中希文明互鉴中心, 重庆 400715; 2.宜宾市特殊教育学校, 四川 宜宾 644699)

摘要:科学创造思维是适应未来智能社会的关键素养。本研究融合脑科学与教育学视角, 采用32导脑电技术(EEG)结合非线性格兰杰因果分析方法, 对科学创造过程中想法生成与想法改进2个阶段的神经活动机制进行了实证探究。结果发现, 想法生成阶段主要依赖颞叶驱动的自下而上加工, 而想法改进阶段则表现为枕叶与前额叶之间的双向交互。基于此, 研究遵循“神经机制-认知功能-教学策略”的转化逻辑, 将视觉想象、知识重组等脑认知功能解码为具体教学干预点, 构建了与之适配的科学创造思维教学模型, 从而在神经科学证据的支持下为教学实践优化提供了新路径。

关键词:科学创造思维; 脑机制; 教学模型

中图分类号:G442; B845.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)05-0072-11

在推动教育现代化的进程中, 习近平总书记强调, 应“高度重视人工智能对教育的深刻影响, 积极推动人工智能和教育深度融合, 促进教育变革创新”, 为教育体系数字化转型与思维结构重塑提供了根本遵循^[1]。在此指引下, 我国《关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》(教育部, 2023)进一步明确“前移创新人才培养关口”, 突出青少年阶段作为科学兴趣激发与思维能力培养的关键窗口, 旨在从基础教育层面系统夯实科技人才储备。与此同时, 国际教育改革趋势亦聚焦高阶思维培养, 例如美国《21世纪技能框架》将“创造性与创新能力”(creativity and innovation)置于核心素养体系, 彰显出创造性思维在应对未来复杂挑战中的战略地位^[2]。由此可见, 科学教育已逐步超越传统知识传授模式, 转向以科学创造性思维为核心素养的系统化培养新范式。

1 研究基础

科学创造思维是创造性思维在科学学科领域中的具体表现, 也是一般创造力与科学知识体系深度融合的产物。该概念源于学者将一般创造性思维与科学问题解决过程相结合的探索, 其内涵强调认知因素(如创意、智力、专业技能)与非认知因素(如动机、人格特征)的共同作用, 体现为个体在科学活动中产出具有独特性、新颖性及实用价值的智力品质^[3-4]。从结构上看, 科学创造思维遵循“理解问题-生成想法-评估与改进-形成解决方案”的迭代认知流程, 该过程融合了吉尔福特所提出的发散思维与聚合思维双过程模型, 并体现出

收稿日期:2025-10-30; **修回日期:**2025-12-16.

基金项目:重庆市2025年哲学社会科学文明互鉴重点项目“文明互鉴数智计算与决策”(2025WMHJ05); 重庆市2024年高等教育教学改革研究项目数字化转型专项“‘人工智能+教师教育’新质教师培养体系的构建与区域实践”(244022).

作者简介:胡航(1982—), 男, 四川南充人, 西南大学教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为深度学习及教育应用、科学与技术、智能教育、智能计算与数字人文、科学技术史与哲学等, E-mail: ethuhang@swu.edu.cn.

通信作者:廖伊雯, E-mail: 2810416827@qq.com.

引用本文:胡航, 魏心怡, 廖伊雯. 科学创造思维的脑机制研究与教学模型构建[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2026, 54(5): 72-82. (Hu Hang, Wei Xinyi, Liao Yiwen. Brain mechanisms and teaching models for scientific creative thinking[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(5): 72-82. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.10.30.0001.)

OECD 所强调的从多样化想法生成到创造性想法评估的阶段性演进^[5-6].在科学问题解决与科技产品设计中,个体首先借助科学知识分析问题,继而通过发散思维生成多元设想,再经聚合思维评估优化,最终形成具备流畅性、灵活性、独创性与可行性的成果.基于当前教育对实践能力的重视,科学创造思维主要表现为科技产品设计与科学问题解决 2 大能力维度,其本质是以科学知识为基础,通过循环迭代实现认知重构的高级思维过程.

科学创造性思维作为人脑的高级认知功能,其发展根植于特定神经机制的可塑性与协同性.当前,许多心理学家借助具有高空间分辨率的功能近红外光谱(fNIRS)与具有高时间分辨率的脑电图(EEG)技术,从不同角度对创造性思维进行了广泛研究,并取得一系列显著成果.刘春雷等研究指出,前额叶的核心功能是获取和应用“明确的关系知识”,同时负责注意力的分配、行为的规划、监控与调节^[7].黄华春等学者强调颞叶区域(包括颞中回和海马旁回)是陈述性记忆的关键脑区之一,且作为默认模式网络的重要组成部分,颞上回在抽象思维、注意力和记忆等复杂认知过程中发挥着重要作用^[8].大量实证研究表明,顶叶作为认知控制网络的关键脑区,在科学创造性思维中主要负责信息整合、记忆提取与认知控制,通过抑制无关信息并促进有效检索和重组先验知识,显著推动创造性观念的产生与优化^[9].方环海等学者的研究表明枕叶区域通过视觉信息处理、语义整合与想象表征的生成,为创造性认知提供关键的神经基础支撑^[10].同时神经影像学研究表明,在进行视觉想象时,枕叶的活动明显增加,证明视觉想象不仅是记忆的重现,也涉及到大脑对图像的动态构建过程^[11].

研究聚焦科学创造思维的脑机制原理及其教学实践转化,系统探究脑神经活动规律与思维形成的内在联系,构建基于脑机制的教学模型,为一线教学提供实证依据,并为教育强国战略下拔尖创新人才的培养提供理论支持.

2 科学创造思维的脑机制实验

脑科学为教育研究提供了基于神经生物学机制的新视角,有助于在更深层次上揭示学习过程的本质规律,并为开发具有科学依据的教学策略奠定基础^[12].然而,现有研究尚未系统揭示科学创造思维的脑机制构成及其协同运作模式,因此有必要通过进一步实验探究其具体的神经基础与动态加工过程.

2.1 实验设计

研究聚焦“科学创造思维的基本脑机制是什么?”这一问题,采用 Rasch 模型作为脑电实验的测试量表.

2.1.1 实验对象

本实验在 X 大学招募了 20~25 岁的在校大学生作为被试对象.为确保样本的同质性及脑发育水平的一致性,筛选标准如下:1)学科背景限制为理学或工学大类,且均修读过小学科学、高中通用技术、信息技术及理化生课程,具备相应的科学知识图式;2)习惯用手均为右利手,以排除大脑单侧化差异;3)实验前使用 SDS 抑郁自评量表及焦虑测试题进行筛查,排除患有神经系统疾病或精神障碍的个体.所有被试在实验前 24 h 内未摄入咖啡因或酒精,视力或矫正视力正常.实验均已获得 X 大学伦理委员会批准,被试签署知情同意书,并在实验结束后获得相应报酬.对被试关键特征的严格同质性控制,有效增强了本探索性研究中小样本数据的代表性与信度.

2.1.2 实验任务

实验选取了 2 项具有代表性的科学创造思维测试任务,分别对应“科技产品设计”与“科学问题解决”2 个维度,试题设计均基于标准化的创造力测验并进行了情境化改编,旨在分别观测“科技产品设计”与“科学问题解决”2 个维度的认知过程.

科技产品设计任务改编自基于 CPS 模式的《创造性问题解决能力》量表,重点考察被试在复杂科学情境下的方案优化与逻辑推演能力.实验时,屏幕呈现“为校园设计一款多功能环保垃圾车”的具体情境,要求被试在脑海中经历从需求分析、创意生成到评估改进的完整闭环,并在形成最终优化方案后按键结束,以此捕捉“想法改进”阶段的神经机制.科学问题解决任务则改编自《青少年科学创造力测验》,侧重评估被试的发散性思维与多维解题能力.该任务要求被试调动几何与空间想象知识,在“将一个正方形分成形状相同的四等份”的指令下,尽可能多地连续生成不同分割方案,并对每一个新颖想法的生成时刻进行按键标记,从而精准捕捉元认知调控下“想法生成”阶段的瞬时神经动态.

2.1.3 实验流程

实验采用 32 导 Quick-Cap 电极帽,以 256 Hz 采样率采集脑电信号.实验准备阶段,研究者协助被试佩戴电极帽并进行调试,确保所有电极阻抗降至可接受范围($<5\text{ k}\Omega$)且信号质量良好,同时要求被试在实验期间保持身体放松与头部固定,以最大限度减少肌电与运动伪迹的干扰.正式实验包含 2 项核心任务:在“科技产品设计”任务中,被试阅读屏幕呈现的“环保垃圾车”设计要求后进行静默构思,经历方案生成与评估优化的完整认知闭环,并在确认最终方案时按“Enter”键结束,数据分析重点截取被试产生初步想法后至按键结束前的“改进想法”阶段数据;在“科学问题解决”任务中,被试需针对“正方形分割”题目连续调动发散性思维,每当脑海中生成一个新颖方案时立即按“空格”键打标,数据分析则聚焦于按键触发后的约 2 s 时间窗,以捕捉“生成想法”阶段的瞬时神经动态.实验结束后,被试需立即摘除设备并以书面形式回溯记录刚才构建的设计方案与解题方法,以验证思维活动的真实性与数据的有效性.将参与实验的 10 个受试者的脑电数据进行分析,每个个体的个人信息与科学创造思维能力得分数据详情见表 1.

表 1 被试个体数据说明

Tab. 1 Description of individual data of subjects

样本标号	性别	科技产品设计 能力得分	科学问题解决 能力得分	年龄	习惯用手	样本标号	性别	科技产品设计 能力得分	科学问题解决 能力得分	年龄	习惯用手
1	女	4	4	24	右利	6	男	6	5	25	右利
2	女	3	2	26	右利	7	女	4	4	23	右利
3	男	2	4	25	右利	8	男	2	4	25	右利
4	男	3	5	26	右利	9	女	4	6	23	右利
5	女	5	7	24	右利	10	男	3	5	25	右利

采集的脑电数据经 MATLAB 2022a 进行预处理后,采用基于 Sigmoid 核、高斯核和多项式核的非线性格兰杰因果方法,分别对 10 段时长 2 s(500 数据点)的数据进行分析,延迟参数设置为 3、4、5,最终通过置信度 0.95 的 t 检验筛选出显著的因果关联指标.

2.2 实验结果与分析

实验依据上述流程,应用基于 Sigmoid 核、高斯核和多项式核的非线性格兰杰因果方法,对 10 名个体在上述改进想法与生成想法 2 种认知状态下所采集的各脑区脑电数据进行了系统分析.根据不同核函数对应的最佳 α 参数选取延迟 $\alpha = 3, 4, 5$ 分别进行 2 种状态的实验.

2.2.1 生成想法阶段前额叶与枕叶之间的因果关系分析

在生成想法阶段,基于通过 t 检验识别出的前额叶与枕叶脑电信号之间的因果关系,分别提取了代表前额叶(x)和枕叶(y)活动的时间序列.在延迟参数 $m = 3, 4, 5$ 下,分别使用 3 种核函数(Sigmoid、高斯、多项式)进行非线性格兰杰因果分析,并筛选出各核函数中置信度最高(p 值最小)的因果系数.使用 3 种核进行仿真得到的因果关系分析结果(附录图 S1,表 2).

表 2 生成想法状态前额叶与枕叶的 3 种核函数因果指数及其显著水平表

Tab. 2 Causal indices and significance levels of three kernel functions for prefrontal and occipital lobes during idea generation

方向	均值	方差	m 值	α 值	df	p 值	核函数
前额叶→枕叶	0.101 6	0.007 8	5	4	18	0.393 5	Sigmoid 核
枕叶→前额叶	0.071 2	0.003 1					
前额叶→枕叶	0.079 9	0.001 8	4	15	18	0.040 8	高斯核
枕叶→前额叶	0.038 3	0.001 3					
前额叶→枕叶	0.016 0	0.000 5	4	1	9	0.077 3	多项式核
枕叶→前额叶	0.001 4	0.000 0					

仿真结果表明,3 种核函数中置信度最高的结果一致显示:前额叶对枕叶的因果影响显著强于反向.具体而言,高斯核在显著性水平 0.05 上显著($p = 0.040\ 8$),多项式核在 0.1 水平上显著($p = 0.077\ 3$).因此,综

合分析表明,在科学创造思维的生成想法过程中,前额叶对枕叶的神经因果作用显著更强.

2.2.2 改进想法阶段枕叶与前额叶之间的因果关系分析

在改进想法阶段,使用与 2.2.1 相同的方法得到的因果关系分析结果如附录图 S2 所示,具体的计算结果见表 3.

表 3 改进想法状态前额叶与枕叶的 3 种核函数因果指数及其显著水平表

Tab. 3 Causal indices and significance levels of three kernel functions for prefrontal and occipital lobes during idea improvement

方向	均值	方差	m 值	a 值	df	p 值	核函数
前额叶→枕叶	0.084 1	0.002 6	3	4	18	0.557 1	Sigmoid 核
枕叶→前额叶	0.071 6	0.001 8					
前额叶→枕叶	0.045 0	0.002 0	3	15	18	0.006 6	高斯核
枕叶→前额叶	0.114 7	0.003 1					
前额叶→枕叶	0.000 3	0.000 0	3	1	9	0.140 8	多项式核
枕叶→前额叶	0.002 9	0.000 0					

仿真结果显示,Sigmoid 核函数结果不显著($p=0.557\ 1$),故不予采纳.高斯核在 0.01 水平上显著($p=0.006\ 6$),多项式核在 0.15 水平上显著($p=0.140\ 8$).2 种有效核函数的结果一致表明:在科学创造思维的改进想法过程中,枕叶对前额叶的因果影响显著强于反向.

2.2.3 生成想法阶段颞叶与顶叶、前额叶之间的因果关系分析

通过 t 检验识别出顶叶、前额叶与颞叶脑电信号之间存在因果关系.基于此,分别选取生成想法状态样本的顶叶、前额叶脑电信号与颞叶脑电信号的时间序列,使用与 2.2.1 相同的方法得到关于顶叶与颞叶脑电信号的因果关系分析结果(附录图 S3,表 4)和关于前额叶与颞叶脑电信号的因果关系分析结果(附录图 S4,表 5).

表 4 生成想法状态颞叶与顶叶的 3 种核函数因果指数及其显著水平表

Tab. 4 Causal indices and significance levels of three kernel functions for temporal and parietal lobes during idea generation

方向	均值	方差	m 值	a 值	df	p 值	核函数
顶叶→颞叶	0.120 8	0.006 7	4	4	18	0.470 8	Sigmoid 核
颞叶→顶叶	0.158 8	0.017 3					
顶叶→颞叶	0.044 1	0.002 6	4	15	18	0.232 5	高斯核
颞叶→顶叶	0.076 5	0.003 6					
顶叶→颞叶	0.000 2	0.000 0	3	1	9	0.039 5	多项式核
颞叶→顶叶	0.005 1	0.000 0					

顶叶与颞叶信号的分析结果显示,3 种核函数一致表明颞叶对顶叶的因果影响强于反向,即颞叶信号是顶叶信号的因.其中多项式核在 0.05 水平上显著($p=0.039\ 5$),高斯核置信度达 0.76,进一步支持该结论.

表 5 生成想法状态颞叶与前额叶的 3 种核函数因果指数及其显著水平表

Tab. 5 Causal indices and significance levels of three kernel functions for temporal and prefrontal lobes during idea generation

方向	均值	方差	m 值	a 值	df	p 值	核函数
前额叶→颞叶	0.075 2	0.001 8	5	4	18	0.608 8	Sigmoid 核
颞叶→前额叶	0.066 0	0.001 3					
前额叶→颞叶	0.154 1	0.021 8	5	15	18	0.653 6	高斯核
颞叶→前额叶	0.128 5	0.009 8					
前额叶→颞叶	0.001 0	0.000 0	3	1	18	0.007 0	多项式核
颞叶→前额叶	0.004 0	0.000 0					

在前额叶与颞叶信号的分析中,高斯核与 Sigmoid 核因置信度过低而被排除,多项式核在 0.01 水平上显著($p=0.007$),表明颞叶对前额叶的因果影响显著强于反向.综上,在科学创造思维的生成想法过程中,颞叶对顶叶及前额叶均表现出显著更强的因果影响.

2.3 科学创造思维的脑机制模型

研究基于脑科学、心理学与教育学等多学科理论框架,结合上述科学创造思维的认知活动分析,构建了科学创造思维脑机制的基本模型,具体如图 1 所示.其中,Pr 是指前额叶(Prefrontal lobe),T 是颞叶(Temporal lobe),P 是顶叶(Parietal lobe),O 是枕叶(Occipital lobe).①与②共同阐述了在想法生成过程中,知识重组与语义加工的认知过程($p_1=0.040\ 8<0.01$);③和④共同阐述了在想法生成过程中,元认知调控下激活视觉表征的视觉想象认知过程;⑤表示在改进想法过程中,决策能力、逻辑思维主导视觉表征再加工的想象认知过程.

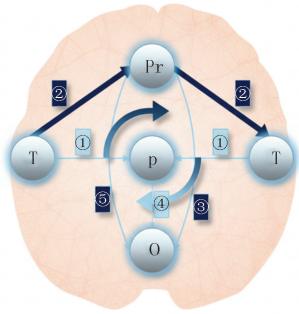


图1 科学创造思维脑机制的基本模型
Fig.1 Basic model of scientific creative thinking brain mechanism

科学创造思维的脑机制机制可从想法生成与想法改进 2 个核心阶段加以解析.在想法生成阶段,个体在元认知调控下进行初步视觉想象,依赖前额叶与顶叶协同完成认知控制下的视觉信息操作与表征,同时颞叶、顶叶及前额叶共同参与知识重组与语义加工,实现对储存信息的提取与整合.在想法改进阶段,生成阶段形成的视觉表征被传递至前额叶工作记忆区域,借助决策能力与逻辑思维等高级认知功能进行深度加工与处理,从而完成对想法的评估与优化.教学的关键在于引导学生反复经历并熟练掌握上述思维过程,以切实提升其科学创造思维水平.

3 神经认知机制的教育阐述

为实现从微观脑科学实验结果向宏观教学模型的有效转化,严格遵循“神经机制-认知功能-教学策略”的层级推演逻辑.第 2 节脑电实验结果揭示,科学创造思维并非单一维度的心理活动,而是涉及不同脑网络在时序上的动态切换与协同.因此,本节聚焦“神经机制-认知功能”的解码过程,旨在深入探究这些生理信号背后的心理学意义,并将其具体化为“元认知监控下的视觉想象”、“知识重组与语义加工”等核心认知功能.这一解码过程不仅解释了大脑如何进行创造活动,更为后续构建基于脑机制的教学模型提供了明确的心理学依据.

3.1 基于元认知监控的视觉想象机制

基于元认知监控与调节的视觉想象是一种高级认知过程,依赖于前额叶、顶叶和枕叶的功能耦合.其中,前额叶负责目标导向的注意调控与执行控制,顶叶参与空间信息整合与表征操作,枕叶则生成并再激活视觉信息.研究表明,在创造性任务中,前额叶通过自上而下机制抑制枕叶中的干扰信息,增强任务相关表征的激活,表现为前额叶 α 波功率变化显著,且枕叶 α 频段同步化反映视觉系统对干扰的有效抑制.顶叶在协调脑区信息传递和空间重构中起枢纽作用.3 脑区通过格兰杰因果网络实现有效连接,前额叶向枕叶的信号传递显著强于反向路径,表明前额叶在调节视觉处理中占主导地位.这一机制不仅支持个体在创造性任务中构建、操纵和评估复杂心理图像,也显著提升了解决科学问题的创新性与有效性.

3.2 想象与视觉表征再加工机制

在科学创造过程中,想象与视觉表征再加工依赖于前额叶与枕叶的协同机制.枕叶负责生成初级视觉表征并进行动态重构与语义整合,前额叶则通过工作记忆、执行控制及长时记忆激活,对视觉信息进行目标导向的调节与高级认知操作.神经活动研究表明,枕叶至前额叶存在显著的自下而上信息流,尤其在改进想法阶段,枕叶对前额叶的格兰杰因果影响占主导,表明视觉信息经枕叶初步加工后向上传递至前额叶进行整合与决策.前额叶腹内侧区激活相关语义框架,完成视觉表征与抽象概念的隐喻映射,前扣带回则持续评估加工结果与任务目标的一致性.该“枕叶生成-前额调控”双向机制支持支持从初级感知到高级认知的转化,也为学生科学想象力的培养提供了可操作的神经教育依据.

3.3 知识重组与语义加工机制

作为科学创造思维的核心认知神经过程,知识重组与语义加工依赖于颞叶、顶叶与前额叶的协同机制。其中,颞叶负责长时记忆提取和语义特征激活,通过模式分离实现知识去情境化表征;顶叶参与记忆检索与空间-语义整合,通过 β 频段振荡与颞叶耦合完成动态绑定;前额叶则通过工作记忆、注意调控和认知控制对信息进行语义筛选与概念重构。从神经机制来看,该过程呈现显著的自下而上信息流向:颞叶对顶叶与前额叶的格兰杰因果影响占主导,表明语义和记忆信息首先在颞叶进行初步加工,随后向上传递至顶叶和前额叶进行深度整合与调控。其核心机制在于颞叶的语义提取、顶叶的整合绑定与前额叶的调控重构之间的高效交互。该发现不仅深化了对创造性思维神经机制的理解,也为培养学生高阶科学思维的教学策略提供了认知神经科学依据。

4 基于脑机制的科学创造思维教学模型

为实现从脑科学实验到教育实践的精准转化,研究进一步确立了“认知功能-教学策略”的逻辑转化:基于前文对科学创造思维神经机制及其对应认知功能的系统阐述,本节旨在将这些关键的内部心理加工过程转化为可操作的外部教学干预点,即通过设计契合大脑“生成-改进”加工规律的教学活动,构建一个融合经典教育理论与神经科学实证依据的科学创造思维教学模型。

4.1 构建原则

在科学教育实践中,教学模型作为系统化、结构化的方法论框架,对培养学生科学创造思维具有重要指导意义。布鲁姆的教育目标分类学通过“记忆→理解→应用→分析→综合→评估”的认知层级,为课程设计与学习评估提供了递进式思维发展路径^[13];加涅的九大教学事件则从“引起注意”到“迁移”的9个步骤,系统指导教师高效组织以认知过程为中心的教学活动^[14]。建构主义教学模型强调学生在知识内化中的主动角色,推动其通过参与和重构形成深层理解^[15];信息加工模型则聚焦“编码→存储→提取”的认知机制,揭示知识处理与记忆运作的心理基础^[16]。深度学习模型以“觉知→调和→归纳→迁移”为核心机制,着力培养学生的高阶认知与思维能力,尤其有助于科学创造思维中批判性思考、知识整合与迁移应用的发展^[17]。这些典型教学模型共同构成了科学创造思维培养的理论与实践基础。

科学创造思维教学模型的构建,立足于“以学生为中心”与“以学定教”2项核心原则,系统贯彻“因材施教”的教育理念。该模型旨在充分激发学生的认知潜能,通过有机整合教学设计与神经认知规律,推动科学思维的系统发展与大脑功能的协同开发,实现“教-学-脑”三位一体的深度融合^[18]。

初高中信息科学、小学科学及高中通用技术课程标准的要求,教学设计应当始终立足于学生发展,将学生视为具有独立认知潜能的个体,通过持续引导与激励充分挖掘其创新精神和实践能力。在此背景下,教学模型的设计需要以学生的思维发展、认知过程与学习效果为中心,突出学生在课堂活动中的主体地位,从根本上突破传统以教师为主导的教学模式局限^[19]。同时,“以学定教”原则强调教学应基于学生的实际学习状态动态调整教学起点、策略与方法,实现从“以教定学”到“为学而教”的范式转变^[20]。该原则要求教师扮演学习的组织者、引导者与合作者,围绕学生“如何学”来系统性设计“如何教”,推动教与学的深度交融,最终实现以学生发展为本的教育目标^[21]。因此,科学创造思维教学模型需紧密结合学生在科学创造思维过程中的认知神经机制,构建既能适应个体差异又能促进全面发展的教学框架,为学生提供兼具支持性与挑战性的深度学习体验,为其思维发展与终身学习奠定坚实基础。

4.2 模型结构与内容

基于科学创造性脑模型的理论框架,研究进一步构建与之适配的科学创造思维教学模型。该模型严格遵循“以学生为中心”与“以学定教”的原则,强调教学设计应充分契合学生在科学创造过程中的认知神经机制,以有效促进其思维发展与大脑开发。科学创造思维模型揭示,科学创造本质上是在元认知调控下,通过多脑区协同实现的动态认知过程。通过系统化的逻辑推演对单元教学内容进行解构,研究形成了3个相互关联的教学模块,进而整合为完整的科学创造性教学模型(图2),从而在理论层面清晰阐释了其促进科学创造思维发展的内在机制。

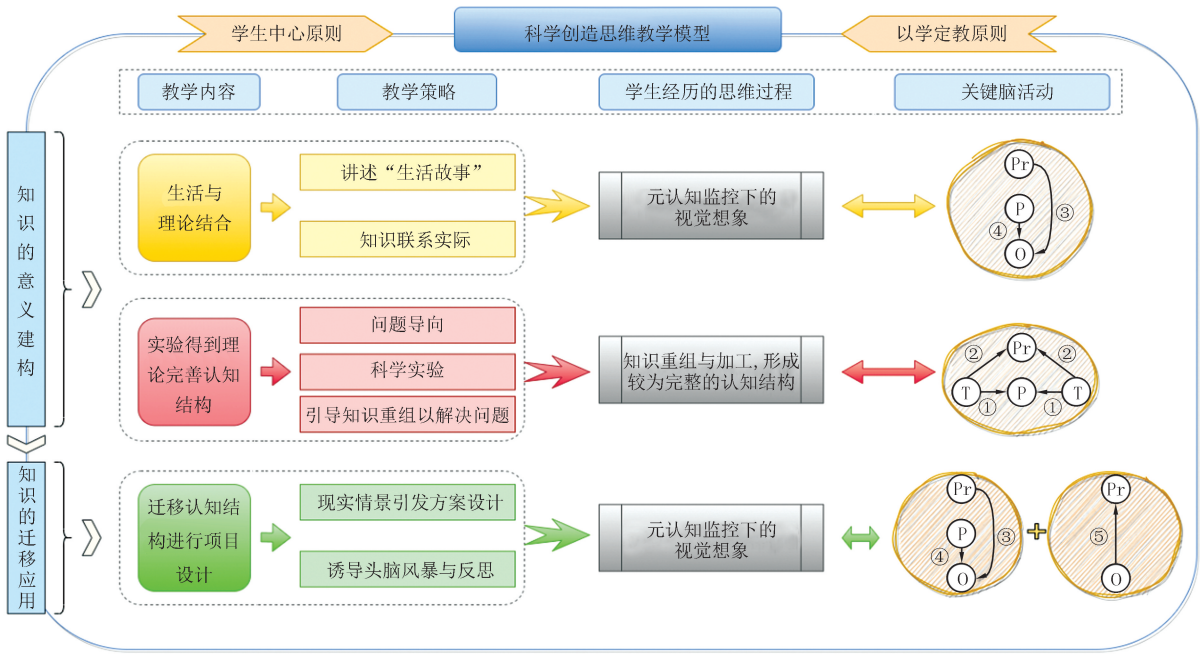


图2 科学创造思维教学模型

Fig.2 Scientific creative thinking teaching model

科学创造思维教学模型以“知识的意义建构”与“知识的迁移应用”为2大核心环节,系统构建了科学创造性思维培养的教学框架.模型围绕3个递进的教学模块展开:第1模块借助“讲述生活故事”策略,将科学知识与学生实际经验相联结,激活“元认知监控下的视觉想象”(Pr·P·O),奠定思维生成的基础;第2模块通过“问题导向科学实验”引导学生对知识进行重组与加工(Pr·T·P),推动认知结构的完善与系统化;第3模块依托“现实情境中的项目设计”,促使学生在应用与反思中实现“决策与逻辑思维主导的想法再加工”(Pr·P·O),完成认知结构的迁移、优化与创造性输出.

4.3 教学模型的创新价值

4.3.1 模块1:以真实生活故事为媒介,提升认知控制下的视觉想象能力

教学模型的第1部分以真实生活故事为认知媒介,旨在系统提升学生在科学学习中的视觉想象能力与认知控制水平.该环节依托前额叶-顶叶-枕叶的协同网络,前额叶负责目标维持与元认知调控,顶叶整合空间与语义信息,枕叶则生成和激活视觉表征,三者“元认知监控下的视觉想象”过程中形成功能耦合,共同优化认知资源的分配与想象过程的系统性^[22].通过生活故事将抽象科学与学生已有经验相联结,帮助学生构建具有情境性和意义性的心理表象,从而促进科学概念的深度理解与神经编码的一致性^[23].

具体教学流程如图3所示共包括3个环节:首先,教师通过讲述围绕科学主题、贴近学生生活且富有叙事性的故事,为学生创设可视化的问题情境,引导学生进入“元认知监控下的视觉想象”状态;其次,教师针对故事中蕴含的科学知识点提出引导性问题,要求学生通过回忆线索、查找资料或小组讨论等方式建立情境与知识之间的关联;最后,教师提取并总结学生回答中的核心概念,通过板书或可视化工具进行结构化呈现,完成从情境体验到知识归纳的认知闭环.该流程在小学科学教学实践中已得到初步应用,例如在教科版《热》单元中,教师通过“一杯热茶的冷却之旅”生活故事,引导学生想象热量传递过程,并联系温度、传导等核心概念,有效提升学生在科学现象理解中的主动想象与意义建构能力^[24].

在小学科学课堂中有效运用这一方法,教师应充分重视生活故事的媒介作用,有意识地将科学知识嵌入真实、有趣且易于共鸣的叙事框架中.教师需注重故事情境的设计与视觉引导,提出开放性提问以激发多角度想象,并及时通过元认知提问(如“你是如何想到这个方法的?”)强化学生对自我思维过程的觉察与调控^[25].这一做法不仅符合小学生的认知发展特点,能够有效调动其生活经验和想象能力,更在神经教育层面促进了学生枕叶通路科学与概念映射的一致性,为后续培养科学创造性思维奠定基础^[26].

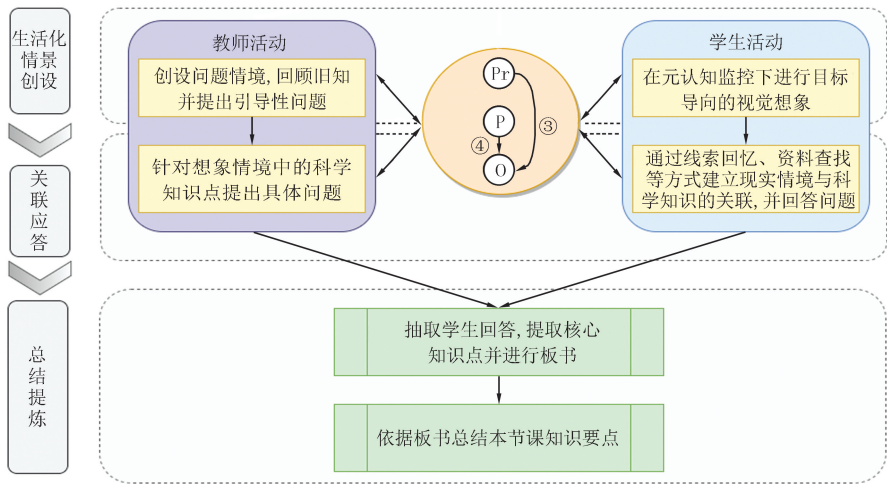


图3 模块1详细教学流程图

Fig.3 Module 1 detailed instructional flowchart

4.3.2 模块 2:以科学实验问题为引导,促进知识结构的系统性重组

教学模型的第 2 部分以科学实验问题为引导,旨在通过探究式任务促进学生对知识的系统性重组与认知结构的深度优化.该环节依托前额叶、顶叶与颞叶的协同机制,前额叶负责目标维持与执行调控,顶叶整合空间与语义信息,颞叶(尤其海马)则激活并重组长时记忆中的知识表征,三者协同促进新旧知识的非线性联结与创新性整合^[27].通过设计具有挑战性和引导性的实验问题,教师能够有效激发学生的认知冲突,推动其在探究中实现概念解构与意义重建,从而发展高阶思维与科学创造力^[28].

具体教学步骤如图 4 所示共包括 4 个环节:首先,教师引导学生回顾已有知识,并基于认知“空白”或“漏洞”提出明确的科学问题,该问题的答案需通过新旧知识重组才能得出;其次,师生共同分析问题、设计实验方案,明确数据记录与观察要点;接着,学生以小组形式开展实验探究,在教师巡回指导下记录、分析数据,并逐步构建新知识;最后,学生通过回答问题实现新认知图式的可视化表达,教师给予评价与鼓励,完成从知识重组到外显输出的认知闭环.这一流程在教科版五年级《热》单元中得到应用,例如教师以“不同材料的导热性能差异”为问题,引导学生设计对比实验,记录温度变化,并整合旧有热传导知识,系统构建材料导热性的新认知图式.

因此,教师应注重以课程标准为指导,将问题设置于学生的“最近发展区”,确保其既具挑战性又可探究.教师需引导学生从实验数据中归纳规律,并建立新旧知识间的显性联系,避免探究流于形式^[29].此外,通过小组合作、过程巡视和及时反馈,教师能够有效支持学生在“做中学”中实现认知图式的主动重构,真正发挥科学实验在培养创造性思维中的核心作用.实践表明,这一方法不仅显著提升了学生的长时记忆整合与语义加工能力,还锻炼了颞叶至顶叶与前额叶的信息传递效率,使学生在解决开放性问题时表现出更高的思维灵活性和解释深度.

4.3.3 模块 3:以项目式反思活动为途径,强化元认知监控与反思能力

教学模型的第 3 部分以项目式反思活动为途径,旨在通过元认知监控与反思性实践提升学生的科学创造性思维.该环节依托前额叶-顶叶-枕叶的协同机制,前额叶负责执行控制与决策调节,顶叶整合空间与语义信息,枕叶生成并激活视觉表征,三者协同促进元认知监控下的信息再加工与反思性重构^[30].通过设计具有挑战性和反思性的项目任务,教师能够引导学生经历从直觉表征到理性评估的认知循环,从而发展其高阶思维与科学创造力^[31].

具体教学步骤如图 5 所示包括 4 个环节:1)教师引导学生回顾已有知识,并创设贴近学生生活的情境,激发学生的兴趣和探究欲望;2)学生以小组形式开展“头脑风暴”,从多个角度进行视觉想象,并结合科学知识进行问题分析和方案构思;3)学生在“反思”环节中选择一个方案进行进一步改进,运用决策与逻辑思维对视觉表征信息进行再处理与想象,查漏补缺;4)学生使用教师提供的工具实施最终方案,并进行作品展示,教

师通过评价与鼓励激发学生的学习动力^[32].这一流程在教科版五年级《热》单元中得到应用.例如教师以“设计一个保温杯”为项目任务,引导学生结合热传导知识进行方案设计和改进,有效提升了学生的元认知监控和反思能力.

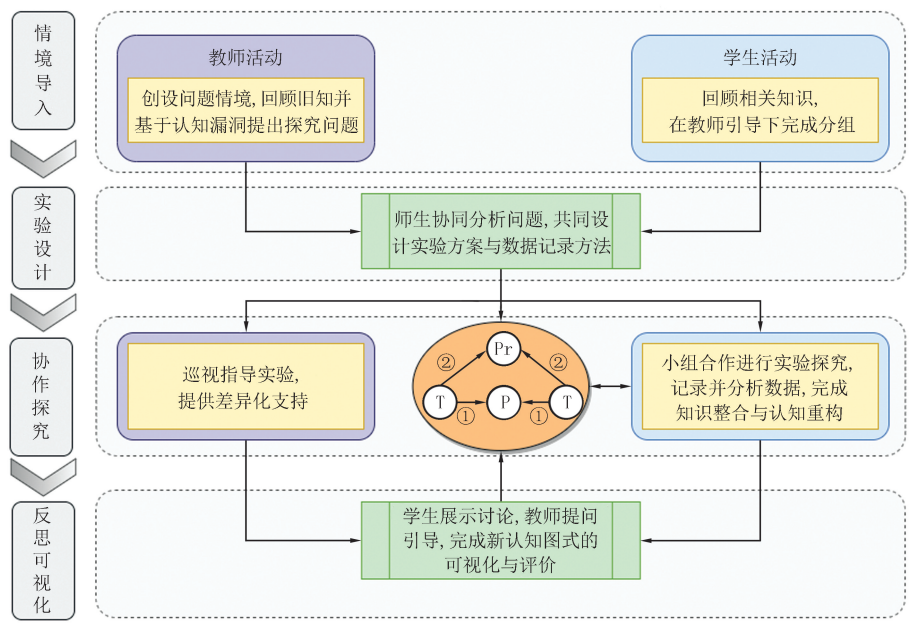


图4 模块2详细教学流程图
Fig.4 Module two detailed instructional flowchart

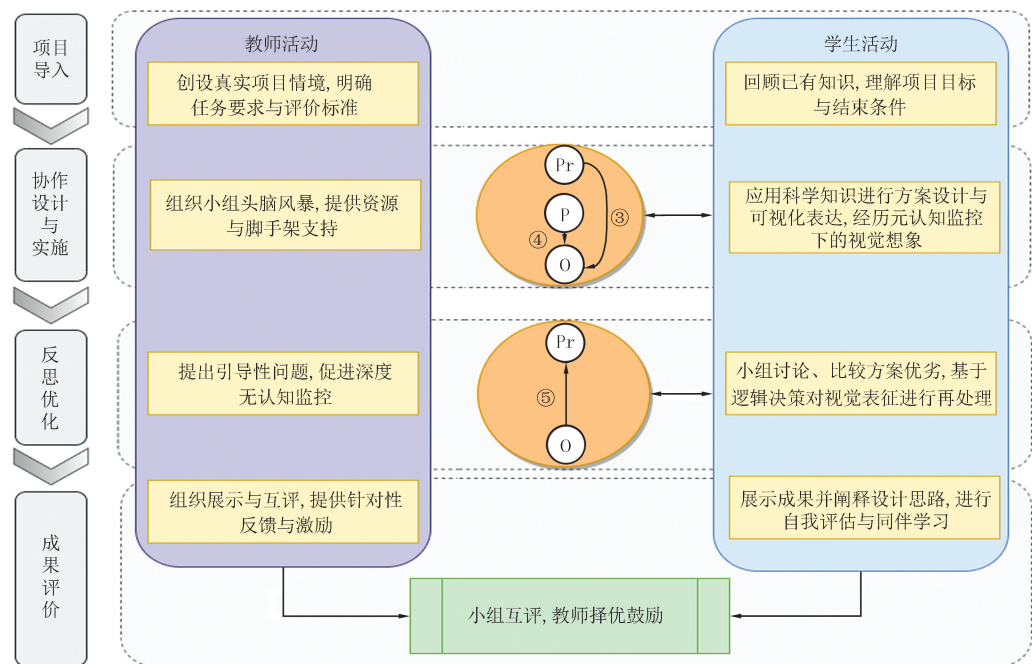


图5 模块3详细教学流程图
Fig.5 Module 3 detailed instructional flowchart

在实施过程中,教师需注重3个关键策略:1)明确项目评价标准,将“方案可行性”“创意独特性”等指标与元认知表现挂钩;2)在反思环节提供思维脚手架,如设计“方案优化自查表”,帮助学生系统梳理改进逻辑;3)巧用竞争机制,通过“最佳设计奖”“创新之星”等多元激励方式,强化学生的参与感与自信心.研究表明,此类项目式反思活动能有效激活前额叶-枕叶的协同机制,提升学生决策与反思中的信息整合效率.通过循环迭代的“设计-反思-优化”实践,学生逐步形成可持续的元认知习惯,从而在科学探究中实现思维品质的深层发展.

5 结 论

本研究基于脑科学视角,系统揭示了科学创造思维中前额叶、顶叶及颞叶等多脑区协同的神经基础,据此构建了“生成-改进”双阶段教学模型.该模型在神经生理层面有力佐证了经典的“生成-探索”认知理论,表明创造性思维本质上是知识重组与逻辑调控的动态迭代过程.这一发现为深化当前的 STEM 教育与探究式学习提供了重要依据:科学教育不应仅停留在外显的流程模仿,更应重视符合大脑加工规律的隐性思维训练,通过强化视觉想象与元认知监控,促进认知结构的深度重组.然而,当前教学转化仍面临实验环境与真实课堂适配性不足、跨学科协同机制不健全等挑战.同时,作为探索性研究,研究虽然通过严格筛选降低了组内异质性,但相对较小的样本量及缺乏常规思维对照组的设计,限制了结果的统计效力与广泛普适性.因此,未来研究需扩大样本规模并引入纵向对照设计,着力推动脑科学与教育实践的系统性融合,促进科学教育与人脑发展规律的有效对接.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.10.30.0001).

参 考 文 献

[1] 习近平向国际人工智能与教育大会致贺信[J].中国卫生信息管理杂志,2019,16(3):247.

[2] 靳昕,蔡敏.美国中小学“21 世纪技能”计划及启示[J].外国教育研究,2011,38(2):50-54.
Jin X,Cai M.The "21st century skills" project of American elementary and secondary schools and its inspiration[J].Studies in Foreign Education,2011,38(2):50-54.

[3] Torrance E P.A national climate for creativity and invention[J].Gifted Child Today Magazine,1992,15(1):10-14.

[4] 胡卫平.论科学创造力的结构[J].教育科学研究,2001(4):5-8.

[5] Guilford J P.创造性才能:它们的性质、用途与培养[M].施良方,沈剑平,唐晓杰,译.北京:人民教育出版社,2006:124.

[6] OECD.PISA 2021 Creative Thinking Framework:Third Draft[R].Paris:OECD,2019.

[7] 刘春雷,王敏,张庆林.创造性思维的脑机制[J].心理科学进展,2009,17(1):106-111.
Liu C L,Wang M,Zhang Q L.Neural mechanism of creative thinking[J].Advances in Psychological Science,2009,17(1):106-111.

[8] 黄华春,罗蜜蜜,邱卓妍,等.不同病程颞叶癫痫患者体素镜像同伦连接分析[J].实用医学杂志,2024,40(17):2401-2405.
Huang H C,Luo C M,Qiu Z Y,et al.Voxel-mirrored homotopic connectivity analysis in temporal lobe epilepsy patients with different course[J].The Journal of Practical Medicine,2024,40(17):2401-2405.

[9] 梁秀玲,李鹏,陈庆飞,等.提取学习有利于学习与记忆的认知神经基础[J].心理科学进展,2015,23(7):1151-1159.
Liang X L,Li P,Chen Q F,et al.The neural correlates of retrieval practice in learning and memory retention[J].Advances in Psychological Science,2015,23(7):1151-1159.

[10] 方环海,王梅.大脑枕叶语言功能的研究进展[J].中国康复理论与实践,2008,14(8):739-741.
Fang H H,Wang M.Advance in research of language functions in occipital region of brain(review)[J].Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice,2008,14(8):739-741.

[11] Fesce R,Gatti R.What networks in the brain system sustain imagination? [J].Frontiers in Network Physiology,2023,3:1294866.

[12] Schwartz M S,Hinesley V,Chang Z S,et al.Neuroscience knowledge enriches pedagogical choices[J].Teaching and Teacher Education,2019,83:87-98.

[13] 姜宛彤,万超,钱松岭.以问题解决为导向的微课程设计研究[J].现代远距离教育,2018(1):35-43.
Jiang W T,Wan C,Qian S L.Research on micro-lecture design based on problem solving[J].Modern Distance Education,2018(1):35-43.

[14] 彭丽,王熠,莫永华.加涅的九大教学事件及其新发展[J].教学与管理,2008(30):18-20.

[15] 陈威.建构主义学习理论综述[J].学术交流,2007(3):175-177.

[16] 刘志霞.基于脑科学的深度学习研究[D].重庆:西南大学,2019.
Liu Z X.The deep learning research based on the brain science[D].Chongqing:Southwest University,2019.

[17] 胡航,李小倩.深度学习:长效实施“双减”政策的改革路向[J].教育科学论坛,2022(31):5-7.

[18] 秦善鹏,石敬东.以学生为本理念下课堂教学方式变革的价值分析[J].现代教育,2022(12):31-34.

[19] 臧玲玲,季波.如何基于“以学生为中心”重构高等教育生态系统:欧洲的经验与启示[J].教育发展研究,2024,44(17):10-17.
Zang L L, Ji B.How to restructure the higher education ecosystem based on student-centered[J].Research in Educational Development,2024,44(17):10-17.

[20] 杨小微,胡雅静.从“以教定学”到“为学而教”中国教学走向现代化的 40 年[J].全球教育展望,2018,47(8):9-24.

Yang X W, Hu Y J. From "teaching determines learning" to "teaching for learning": modernization of teaching over the last 40 years in China[J]. *Global Education*, 2018, 47(8): 9-24.

[21] 韩民扬. 如何“以学生为主体”进行教学设计: 基于小学科学新任教师教学设计的文本分析与改进策略[J]. *中小学科学教育*, 2024, 1(3): 55-59.

[22] LI Yilu, WANG Yanqing, YU Fangwen, et al. Large-scale reconfiguration of connectivity patterns among attentional networks during context-dependent adjustment of cognitive control[J]. *Human Brain Mapping*, 2021, 42(12): 3821-3832.

[23] 叶宝生, 曹温庆. 小学科学探究学习对元认知能力培养的作用[J]. *中小学教材教学*, 2023(2): 4-8.

[24] 洪富强. 利用生活资源优化小学科学课堂教学[J]. *亚太教育*, 2023(2): 116-118.

[25] 张毅, 廖春兰, 焦小燕. 小学生元认知发展与促进的研究综述[J]. *心理学进展*, 2022, 12(12): 4051-4057.

Zhang Y, Liao C L, Jiao X Y. A review on the development and promotion of pupils' metacognition[J]. *Advances in Psychology*, 2022, 12(12): 4051-4057.

[26] 彭潘悦. 认知控制的脑机制及衰老对其脑机制的影响[J]. *心理学进展*, 2023, 13(3): 1109-1117.

[27] Zhang Y M, Hu Y Y, Ma F S, et al. Interpersonal educational neuroscience: a scoping review of the literature[J]. *Educational Research Review*, 2024, 42: 100593.

[28] 朱阿娜. 高阶思维培养: 小学科学探究式教学困境的出路[J]. *中小学教材教学*, 2020(10): 67-70.

[29] 刘芳, 张晶晶. 初中化学实验教学中探究程度与高阶思维的课堂研究[J]. *化学教育(中英文)*, 2022, 43(21): 106-112.

Liu F, Zhang J J. Study on classroom practice of chemistry experiment inquiry teaching in terms of inquiry level and high-order thinking[J]. *Chinese Journal of Chemical Education*, 2022, 43(21): 106-112.

[30] Beaty R E, Benedek M, Silvia P J, et al. Creative cognition and brain network dynamics[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2016, 20(2): 87-95.

[31] 夏雪梅, 王湖滨, 李倩云. 面向学生创造力培养的语文项目化学习准实验研究[J]. *北京教育学院学报*, 2024, 38(2): 20-27.

Xia X M, Wang H B, Li Q Y. Quasi-experimental study on the project-based learning of Chinese language for cultivating students' creativity[J]. *Journal of Beijing Institute of Education*, 2024, 38(2): 20-27.

[32] 李林, 邹子韬, 苏晓虎, 等. 指向核心素养的项目式学习课程建设与实施[J]. *现代教育*, 2019(3): 20-23.

Brain mechanisms and teaching models for scientific creative thinking

Hu Hang^{1a, b}, Wei Xinyi^{1a}, Liao Yiwen²

(1. a. College of Teacher Education; b. Center for Chinese and Creek Civilizations, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Yibin Special Education School, Yibin 644699, China)

Abstract: Scientific creative thinking is a crucial competency for adapting to the future intelligent society. Integrating neuroscience and education, this study empirically investigates the neural mechanisms underlying the stages of idea generation and idea improvement during scientific creation, utilizing 32-channel electroencephalography (EEG) combined with nonlinear Granger causality analysis. The results indicate that the idea generation stage primarily relies on bottom-up processing driven by the temporal lobe, while the idea improvement stage is characterized by bidirectional interactions between the occipital and prefrontal lobes. Based on these findings and the translational logic of "neural mechanism-cognitive function-teaching strategy", this study decodes brain cognitive functions such as visual imagery and knowledge reorganization into specific teaching interventions. Consequently, a corresponding teaching model for scientific creative thinking is constructed, providing a new pathway for optimizing teaching practices supported by neuroscientific evidence.

Keywords: scientific creative thinking; brain mechanism; teaching model

[责任编辑 杨浦 刘洋]

附 录

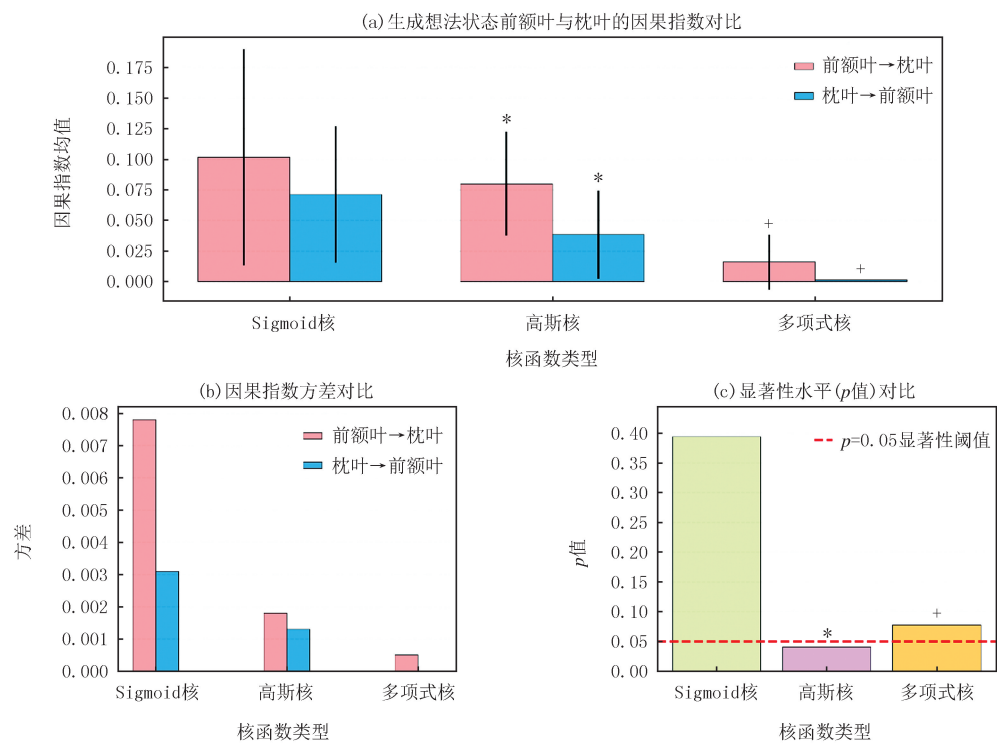
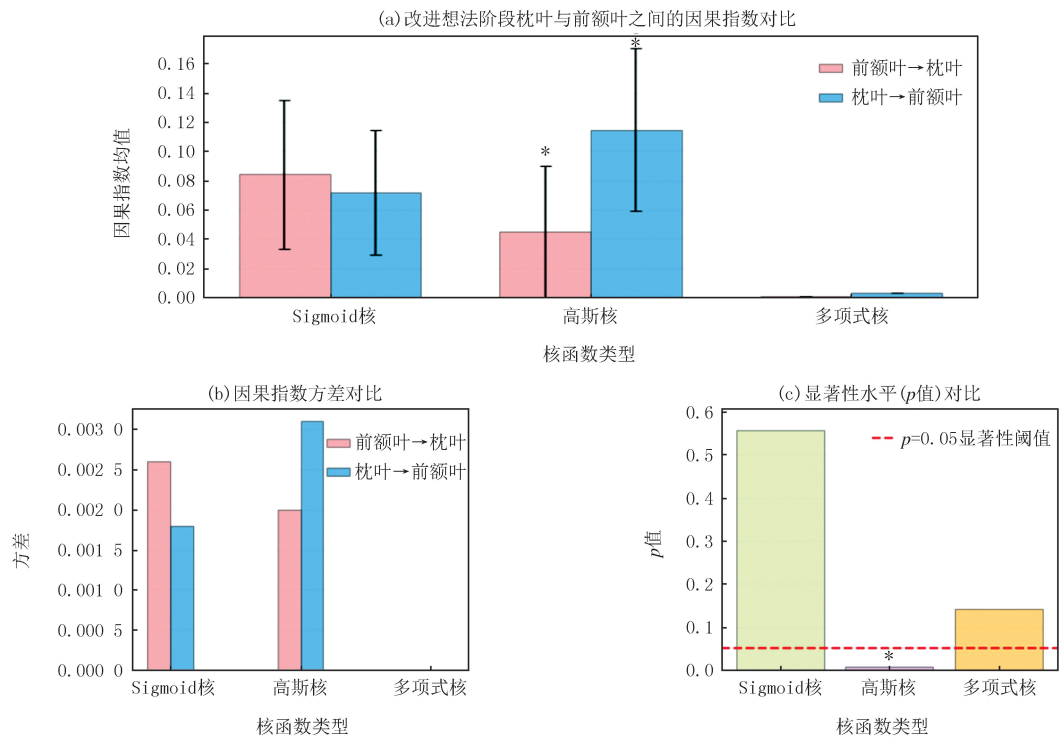


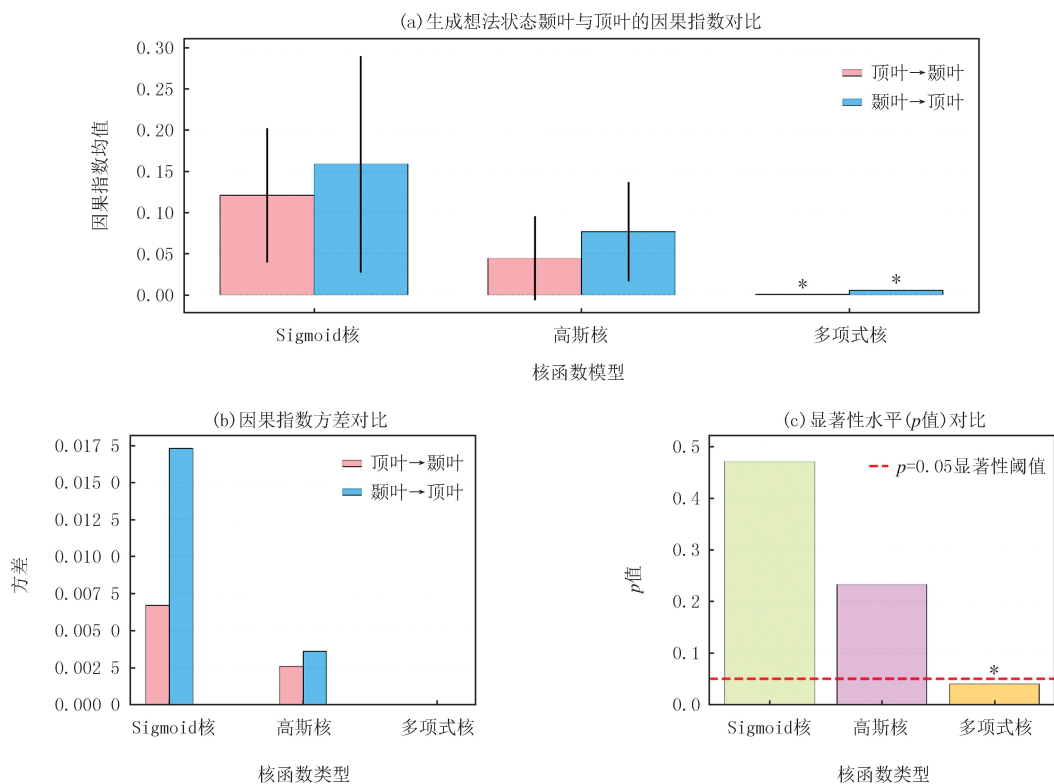
图 S1 生成想法状态前额叶与枕叶的3种核函数的格兰杰因果关系结果分析图

Fig.S1 Granger causality analysis results of three kernel functions for prefrontal and occipital lobes during idea generation



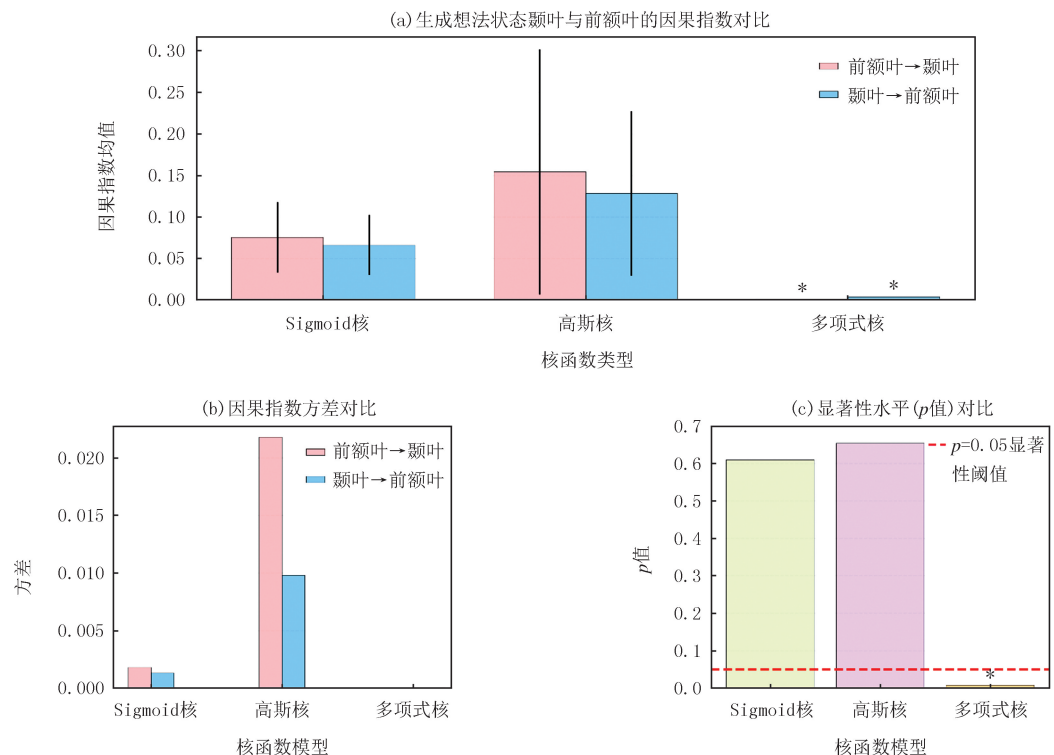
图S2 改进想法阶段枕叶与前额叶的3种核函数的格兰杰因果关系结果分析图

Fig.S2 Granger causality analysis results of three kernel functions for occipital and prefrontal lobes during idea



图S3 生成想法状态颞叶与顶叶的3种核函数的格兰杰因果关系结果分析图

Fig.3 Granger causality analysis results of three kernel functions for temporal and parietal lobes during idea generation



图S4 生成想法状态颞叶与前额叶的3种核函数的格兰杰因果关系结果分析图

Fig.S4 Granger causality analysis results of three kernel functions for temporal and prefrontal lobes during idea generation