

科学教育情境中好奇心向探索性学习行为转化的神经机制研究

Research on the Neural Mechanisms Underlying the Transformation of Curiosity into Exploratory Learning Behaviors in Science Education Contexts

郑盈盈^{1*}, 董伟²

1,2 天津大学教育学院

*zyy_25@tju.edu.cn

【摘要】本研究基于预测误差-评估-好奇-探索的神经认知框架,探讨科学教育情境下中学生面对知识缺口时的好奇心评估过程及其对探索行为的影响。研究旨在回答:(1)面对科学知识缺口时,学习者不确定性感知与好奇心强度的变化规律;(2)好奇心强度在不同时间成本条件下是否及如何促发展探索性学习决策;(3)前额叶皮层神经活动是否在好奇心与探索决策间起中介作用。本研究在理论上深化对好奇心与学习机制的理解,实践上为科学教育中探究情境的设计与评估提供可操作依据。

【关键词】好奇心;探索性学习行为;功能性近红外;科学教育

Abstract: This study is grounded in the neurocognitive framework of prediction error, appraisal, curiosity, exploration(PACE), investigating how middle school students evaluate scientific knowledge gaps in science education contexts and how this evaluative process influences subsequent exploratory learning behaviors. Specifically, the study addresses three research questions: (1)How do learners' uncertainty perception and curiosity intensity change when encountering scientific knowledge gaps? (2) Whether and under what time cost conditions does curiosity intensity trigger subsequent exploratory learning decisions? (3) Does prefrontal cortical activity mediate the relationship between curiosity and exploratory learning decisions as a value-based evaluation mechanism? Theoretically, this research deepens the understanding of the mechanisms underlying curiosity and learning. Practically, it provides actionable insights for the design and assessment of inquiry-based learning environments in science education.

Keywords: curiosity; exploratory learning behaviors; fNIRS; science education

1. 引言

科学教学应引导学生投入到知识建构和评估过程中,推动科学学习转向在科学实践中学习(Berland et al., 2016)。学生主动参与科学知识建构有助于激发和维持学生的好奇心(Ali et al., 2025);科学探究心理意愿对其科学素养发展具有重要作用(Chi et al., 2025)。然而,现有研究更多关注知识掌握、概念理解和知识整合等(Kidron, 2025; Zhou & Moon, 2025),较少关注学习者面临知识缺口时是否及如何将知识的好奇心转化为实际的探索性学习行为。好奇心被广泛视为驱动学习者探索性行为的内在动力(Grossnickle, 2016)。大量研究表明,好奇心能够促进信息寻求(Korniluk et al., 2025)、增强学习投入(Van Schijndel & Jansen, 2025),对知识记忆与理解产生积极影响(Fandakova & Gruber, 2021)。然而,在真实学习情境中,好奇心并不一定转化为探索性行为(Gruber & Ranganath, 2019)。当学习者在面对知识缺口时,往往同时感知到不确定性、潜在失败风险或时间与精力成本,从而选择行为回避并非主动探索(Lau et al., 2020)。这说明仅用信息寻求或者学习结果作为学习指标,难以判断实际学习是否可能发生。理解好奇心产生后的评估与决策机制对于理解人类学习和探索至关重要(Poli et al., 2024)。

认知性好奇心是获得知识与信息的需求和渴望(Grossnickle, 2016), 是探究行为发生的关键。现有关于认知好奇心的研究主要采用冷知识问题范式(Kang et al., 2008), 通过操控信息缺口诱发认知性好奇心, 并考察其对学习和记忆的影响。该范式为揭示好奇心的动机价值与神经基础提供了重要证据, 但其局限在于: 一方面, 冷知识范式大多脱离具体学科情境, 学习者难以判断某项活动对学习目标的有用性, 与科学学习中真实的知识建构过程的相关性不大(Poli et al., 2024); 另一方面, 相关研究往往以主观好奇评分或学习结果为指标, 较少关注好奇心是否以及在何种条件下转化为实际的探索性学习行为。

基于此, 本研究尝试在科学教育情境中引入冷知识研究范式, 通过构建科学知识问题情境, 诱发学习者对科学好奇心, 并进一步分析好奇心评估过程如何影响后续探索性学习决策, 从过程视角揭示好奇心由动机状态向探索性学习行为转化的关键机制, 为更好地促进好奇心向探索性学习行为转化提供科学证据。

2. 理论背景与问题提出

2.1. PACE 理论框架

Gruber 和 Ranganath (2019)从神经认知层面提出了 PACE 框架, 用来解释好奇心的产生机制及其促进学习与记忆的作用。该框架认为, 好奇心的唤醒从预测误差开始, 但预测误差本身并不会自动引发好奇心, 需要进入评估阶段经过一系列信息的潜在价值及风险评估(Silvia, 2005)。大脑前额叶皮层的活动反映了学习者对信息价值与探索成本的整合计算(Gruber & Ranganath, 2019)。当个体认为信息具备价值且可获取时, 会进入探索阶段, 进一步寻求新的信息。在该框架中, 评估是连接知识空白和知识探索的关键环节, 但是该阶段在学习情境中的具体作用机制仍缺乏直接的实证检验。尤其是在真实的科学知识情境下, 好奇心是否以及如何转化为实际的探索性学习行为尚不清楚。基于此, 本研究以 PACE 理论框架为分析视角, 聚焦评估和探索关键转化环节, 旨在考察学习者在面对科学知识缺口时, 好奇心评估过程如何影响其后续探索性学习决策。

2.2. 好奇心评估的神经机制

PACE 框架中指出, 好奇心评估阶段, 由前额叶皮层负责评估与海马体及前扣带回皮层相关的预测误差信息, 并调控由预测误差诱发的好奇心或焦虑情绪的作用路径(Gruber & Ranganath, 2019)。当好奇心激活增强时, 前额叶皮层的表现也会增强(Gruber et al., 2014)。具体来说, 当面临是否探索信息或者选择放弃信息等需要更多决策评估时, 外侧前额叶皮层(Lateral PFC)的神经活动会显著增强, LPFC 参与了探索行为的发起决策(Gruber & Fandakova, 2021; Gruber & Ranganath, 2019); 当面临加工不确定性和评估信息时, 眶额叶皮层(orbitofrontal cortex, OFC)会显著激活(Korniluk et al., 2025)。在学习情境中, 相较于其他深部脑区, 前额叶皮层更适合在自然任务条件下进行监测。因此, 本研究假设前额叶皮层在好奇心驱动的探索决策中发挥关键作用, 其神经活动可能反映学习者对信息价值与探索成本的整合评估过程。

2.3. 探索成本与探索行为决策

好奇心驱动的探索是指, 探索行为出于求知的动机驱动, 而非依赖外在奖赏(Poli et al., 2022)。该过程将知识获取作为一个内在奖励, 通过奖励学习过程, 强化人们信息寻求行为(Murayama, 2022)。已有研究发现, 一方面, 好奇心与探索欲与正相关, 好奇心越高, 学习者的探索意愿越强, 越渴望深度的探索相关话题(Van Schijndel & Jansen, 2025), 但参与者的探索行为受到学习进展与感知新颖性的共同引导, 会规避极端不确定的状态(Korniluk et al., 2025)。另一方面, 好奇心激发后, 个体会去探索、提问和操作有趣的物体(Kidd & Hayden, 2015), 个体甚至愿意付出一定时间或资源成本(Bennett et al., 2016; Lau et al., 2020), 但高成本可能抑制探索行为。这表明好奇心向探索行为转化过程中, 探索成本会影响探索行为的决策。

由于时间成本具有较高的生态效度，能够真实反映课堂与课外学习中学习者在持续探究与放弃探索之间的权衡。因此，本研究引入时间成本作为情境变量，考察在不同成本条件下，好奇心评估是否以及如何转化为后续的探索性学习行为。

2.4. 问题提出

已有的研究表明认知好奇心在信息寻求和学习过程中发挥着重要作用，并初步探索了好奇心与探索行为之间的关系。但是现有研究多停留在好奇心水平与学习结果之间的相关分析，较少从过程视角探讨好奇心评估阶段如何影响后续探索性学习决策，也缺乏对探索成本调节作用的直接检验。因此，本研究基于 PACE 理论框架，聚焦科学教育情境中，采用认知神经科学方法，监控学习者面临知识缺口时的好奇心评估过程，通过行为数据和前额叶皮层神经活动指标，系统性考察好奇心向探索性学习行为转化的过程机制。具体研究问题如下：

(1)学生在面对科学知识缺口时，其答案不确定性感知与好奇心强度呈现什么样的特征？

(2)学生在好奇心评估阶段所表现出的好奇心强度，是否以及在何种时间成本条件下，能够促发后续的探索性学习决策？

(3)评估阶段前额叶皮层的神经活动是否作为价值评估机制，在好奇心与探索性学习决策之间发挥中介作用？

3. 研究方法

3.1. 实验目的

本研究采用以探索成本为操作变量的两阶段实验设计。第一阶段通过冷知识范式诱发科学知识缺口，重点考察学习者对信息不确定性与主观信息价值的评估，以刻画科学好奇心主观评估过程；第二阶段则在好奇心已形成的基础上，引入探索成本，考察学习者是否将该动机状态转化为实际的探索性学习行为。

3.2. 实验设计

3.2.1. 实验任务与材料

研究首先编制科学好奇心材料库，以精准地操控好奇心诱发，并开发好奇心诱发-探索性行为两阶段实验任务范式。第一阶段：好奇心诱发阶段。基于经典冷知识研究范式题库(Gruber et al, 2014)对试题进行改编，构建符合科学教育情境的科学知识题库(如物理、工程、科技等相关基础科学问题)。每个试次依次呈现：(1)科学知识问题，被试需作答；(2)被试对当前问题引发的好奇心强度进行主观评分，题目：你对该问题的答案有多好奇？(1=非常不好奇，7=非常好奇)；(3)被试对答案不确定性感知进行主观评分，题目：你对该问题的答案有多确定？(1=非常不确定，7 非常确定)。第二阶段：探索性学习决策阶段。通过操控探索所需付出的时间成本水平(高/低)，构建不同的探索决策情境。每个试次依次呈现：(1)探索意愿选择，题目：你是否愿意花费 30 分钟的时间对这些问题进一步探索？(是/否)，被试需思考后选择放弃或进入探索；(2)最小行为探索，若被试选择探索，则呈现一段 150-200 字结构化补充科学知识材料，被试可以选择随时结束。

3.2.1. 测量指标与工具

第一阶段测量指标：(1)好奇心强度；(2)答案不确定性感知；(3)反应时；神经指标：同步采集功能性近红外脑成像数据，重点关注前额叶皮层氧合血红蛋白(oxygenated hemoglobin, HbO)与脱氧血红蛋白变化(deoxygenated hemoglobin, HbR)。第二阶段：(1)是否选择探索(探索/放弃)；(2)探索决策反应时；(3)实际探索持续时间。

3.3. 实验设备与生理数据采集

本实验使用的功能性近红外脑成像设备是深圳英智科技有限公司生产的(型号 NIRS Revo)。该设备通过发射特定波长的近红外光并测量其在脑组织中的吸收变化，反映大脑皮层

HbO 和 HbR 的浓度变化。其对近红外光(波长 785 和 830)的采样率为 12.5Hz。使用的是 4×4 的光极板, 包含 8 个发射光源(sources)和 8 个探测器(detectors), 光极之间的间隔为 3 厘米, 共构成 24 个通道。鉴于前额叶皮层被认为是好奇心评估与探索行为调节的关键脑区(Gruber & Fandakova, 2021; Gruber & Ranganath, 2019), 其功能与本研究理论框架高度契合, 依据国际脑电图的 10-20 系统, 以 Fpz 点为中线参考, 确保光极板覆盖双侧前额叶皮层区域。通过虚拟定位的方法来确定记录通道与测量点在大脑皮层上对应的位置(Singh et al., 2005; Tsuzuki et al., 2007)。

4. 研究阶段

本研究目前处于实验材料设计及伦理审查阶段, 正在参照冷知识研究范式构建科学知识情境下的实验材料试题库, 计划形成约 40 个试次, 并对先验知识水平与探索成本进行系统操控。

5. 下一步研究工作

后续拟邀请科学教育领域专家、一线教师及学生对实验材料难度与情境适切性进行评估, 并采用近红外设备进行预实验, 评估刺激材料的数量和有效性、近红外数据的信号与质量。在完善实验设计后, 开展正式实验, 对实验数据进行采集与分析, 并据此开展论文的撰写。

参考文献

- Ali, F., Wang, Y., Wang, S. J.-W., & Zhu, G. (2025). Triggers of curiosity in social constructivist classroom discourse. *Npj Science of Learning*, 10(1), 33. <https://doi.org/10.1038/s41539-025-00330-5>
- Bennett, D., Bode, S., Brydevall, M., Warren, H., & Murawski, C. (2016). Intrinsic valuation of information in decision making under uncertainty. *PLOS Computational Biology*, 12(7), e1005020. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005020>
- Berland, L. K., Schwarz, C. V., Krist, C., Kenyon, L., Lo, A. S., & Reiser, B. J. (2016). Epistemologies in practice: Making scientific practices meaningful for students. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(7), 1082-1112. <https://doi.org/10.1002/tea.21257>
- Chi, M., He, P., Li, G., & Zheng, C. (2025). Development and validation of an instrument to investigate secondary school students' desire to engage in scientific inquiry. *International Journal of Science Education*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/09500693.2025.2546460>
- Fandakova, Y., & Gruber, M. J. (2021). States of curiosity and interest enhance memory differently in adolescents and in children. *Developmental Science*, 24(1), e13005. <https://doi.org/10.1111/desc.13005>
- Grossnickle, E. M. (2016). Disentangling Curiosity: Dimensionality, Definitions, and Distinctions from Interest in Educational Contexts. *Educational Psychology Review*, 28(1), 23-60. <https://doi.org/10.1007/s10648-014-9294-y>
- Gruber, M. J., & Fandakova, Y. (2021). Curiosity in childhood and adolescence—What can we learn from the brain. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 39, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2021.03.031>
- Gruber, M. J., Gelman, B. D., & Ranganath, C. (2014). States of curiosity modulate hippocampus-dependent learning via the dopaminergic circuit. *Neuron*, 84(2), 486-496. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.08.060>