

• 研究构想(Conceptual Framework) •

牛顿为什么炒股失败？社会性数学归纳推理中 双系统的认知神经机制*

肖 风¹ 郑秀辰¹ 肖 娜¹ 陈庆飞² 武晓菲³ 张 頔¹

(¹ 贵州师范大学心理学院, 贵州省脑功能与脑疾病防治全省重点实验室, 贵阳 550025)
(² 深圳大学心理学院, 深圳 518060) (³ 杭州师范大学经亨颐教育学院, 杭州 311121)

摘 要 多人交互情境的数学归纳推理存在有限理性, 但现有研究尚未阐明社会情境下数学归纳推理过程中快速直觉的系统 1 和慢速慎思的系统 2 是如何相互作用的。社会性数学归纳推理是指在多人交互的社会情境中, 个体进行数学归纳时, 不仅要识别数列本身的规律, 还要考虑这些规律会如何因他人的决策而发生变化或受到影响。本研究旨在探究社会性数学归纳推理中推理和心理理论双系统的神经机制, 特别是两类双系统如何相互作用以实现对社会环境的动态适应。结合行为、事件相关电位(ERP)和功能性磁共振成像(fMRI)技术, 本研究将分为三个部分: 首先, 探究非社会性数学归纳推理中双系统的证据; 其次, 全面比较社会性和非社会性数学归纳推理中双系统的神经机制, 重点分析推理过程中的双系统协同作用; 最后, 深入调查社会情境如何调节社会性数学归纳推理的神经基础, 探索社会情境对推理过程的影响及其神经机制。本研究将拓展双系统理论框架以探究复杂经济学的认知神经基础, 为理解个体在多人社会互动中的推理认知过程提供新理论视角, 并为数学教育、人工智能等领域的实践应用提供启示。

关键词 复杂经济学, 归纳推理, 有限理性, 双系统
分类号 B849

1 问题提出

“我可以预测行星的运动, 却无法预测疯狂人群的动向。”牛顿在炒股失败后悲叹。尽管牛顿能够总结出普适的物理规律, 却无法归纳复杂系统中个体的互动。那么在多人交互情境下, 个体如何做出理性推理决策?

多人交互的经济决策已成为经济学和复杂性科学的一个交叉前沿方向。为解释多人交互的经济活动, 如股市追涨杀跌、房价波动、餐馆排队等现象, 经济学家 Brian Arthur 基于“有限理性”假设, 提出的“复杂经济学”(1999, 2021)认为: 多人交互活动中, 个体间信息不完整, 需要根据与他

人的交互来不断调整行动和策略。为模拟多人交互的经济活动, Arthur (1994)提出爱尔兰(El Farol)酒吧问题: 酒吧每周四晚有音乐表演, 100 个居民中, 如果出席人数不超过 60 人, 则可享受愉快夜晚; 超过 60 人, 酒吧就会拥挤不适。计算机模拟发现, 出席人数最终在 60 人附近自组织形成动态平衡。由于酒吧问题超过一定复杂度, 演绎推理无法解决该问题; 酒吧问题体现了归纳推理的有限理性: 每周出席人数实际为随机数列, 个体会使用数学归纳推理, 即根据过去几周出席人数, 生成各种假设, 根据最可信的假设采取行动。如果假设有效, 就继续采用; 如果假设无效, 则更新假设或采用简单假设作为替代。

复杂经济学研究主要采用计算机模拟的方式, 能够比较准确地描述整体趋势, 但无法真实反映个体层面的心理加工。在多人交互情境下, 个体如何通过社会性数学归纳推理来生成行为的假

收稿日期: 2024-11-26

* 国家自然科学基金地区项目(32460208)。

通信作者: 肖风, E-mail: xiaofeng19850328@gmail.com

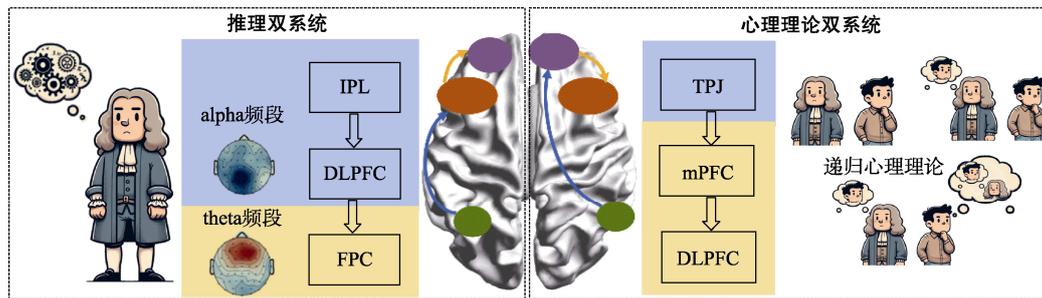


图 1 酒吧问题出席人数数列预测的推理和心理理论双系统的理论构想图。左侧为推理双系统的可能神经机制, 右侧为心理理论双系统的可能神经机制。蓝色背景和箭头表示系统 1 的可能神经活动模式, 黄色背景和箭头表示系统 2 的可能神经活动模式。IPL: 顶下叶; DLPFC: 背外侧前额叶; FPC: 额极皮层; TPJ: 颞顶联合区; mPFC: 内侧前额叶。彩图见电子版。

设? 社会性数学归纳推理指在多人交互的社会情境下, 个体不仅需要对数列规律进行归纳, 还需要考虑这些规律如何受到他人决策的调节。这种推理过程中, 基于规则的慢速慎思(系统 2)和基于经验的快速直觉(系统 1)如何相互协作? 在理解和推测他人心理状态时, 快速自动化的心理理论加工(系统 1)和复杂且需要更多认知资源的加工(系统 2)又是如何配合的?

目前对于社会性数学归纳推理研究还处于初步阶段, 其认知机制和神经基础尚不清楚。因此, 揭示社会性数学归纳推理的双系统相互作用规律, 可以为探究复杂经济学的微观机制提供新视角, 为精准预测群体行为、提高经济预测和决策质量提供理论基础和依据。此外, Trinh 等人(2024)采用系统 1 生成直觉想法, 再由系统 2 进行慎思推理, 极大提高了人工智能的几何推理能力, 说明双系统理论的巨大潜力。本研究将拓展双系统理论在社会性数学归纳推理领域的应用, 进而促进人类智能和人工智能归纳推理能力的提升。因此, 本研究将为优化经济决策、推动数学教育和发展人工智能等实践领域提供新理论和新方法。

2 国内外研究现状及分析

为什么牛顿炒股失败? 有观点认为他未能总结出股市规律, 也有观点认为他受到群体性投资狂热的影响, 最终决策失误。这反映了社会性数学归纳推理的独特挑战: 不仅需要发现规律, 还要处理他人的反馈和意图等社会性信息。这种社会性信息介入的复杂性认知加工可以通过双系统理论来解释(Evans, 2003; Kahneman, 2011; Sloman,

1996): 系统 1 是人类和动物共有的快速、领域特殊、内隐的认知系统, 包括本能、直觉、情绪和启发式加工, 无需认知资源且无意识; 系统 2 是人类特有的基于规则的慎思过程, 是慢速、领域一般、外显的序列加工, 与工作记忆和智力相关且有意识参与。即使在非社会情境下擅长数学归纳推理的高智力个体, 在处理社会性数学归纳推理时, 也可能因为系统 1 的直觉与系统 2 的慎思发生冲突, 导致决策失误。尽管经济理性可以通过智力来有效预测(Felix et al., 2022), 但社会性数学归纳推理的独特性质以及它与非社会性数学归纳推理的区别, 仍然缺乏深入的研究。

2.1 酒吧问题的研究现状

酒吧问题是研究个体在多人交互情境中进行决策和预测时所面临的协作与竞争并存的经典实验范式。现有研究通过计算机模拟探讨了影响个体在酒吧问题中推理和决策的相关心理加工和因素, 包括以下 7 项内容。(1)归纳推理: 根据历史出席数据生成预测假设(Arthur, 1994; Chen et al., 2005; Edmonds, 1999; Franke, 2003; Rand & Stonedahl, 2007); (2)主体异质性: 不同个体采取不同决策策略, 加剧了问题复杂性(Edmonds, 1999); (3)记忆容量: 记忆容量越大, 预测越稳定(Baccan et al., 2014; Kumar & Gonzalez, 2017); (4)损失规避: 规避风险导致保守决策(Zambrano, 2004); (5)理性还需要明确自身的心理需求(Cross et al., 2004); (6)合作关系: 合作越少, 信息交流越少, 非理性行为越可能优于理性决策(Radziszewska et al., 2014); (7)社会网络和偏好促进相互学习和演化产生新的策略并达到平衡, 从而有助于资源

优化利用和分配公平(Chen & Gostoli, 2017)。

这些发现揭示了个体在社会情境下如何使用数学归纳推理,以及社会反馈如何影响推理过程。与非社会性数学归纳推理相比,社会情境下的推理需要同时处理数列规律和社会信息。但计算机模拟无法等同于真实个体交互,难以生成丰富的行为数据(Leady, 2007),以往研究也较少从认知和神经机制层面考察这种差异。因此有必要通过实证研究,区分社会性和非社会性数学归纳推理的心理过程,为完善复杂经济学理论提供微观证据。

2.2 非社会性数学归纳推理中双系统的证据及其神经基础

Kahneman (2011)的研究揭示了系统1与系统2的认知差异,并指出这两种系统有时会发生冲突,导致推理失误。在数学归纳推理中,尤其是在复杂的社会情境下,系统1和系统2之间的冲突可能更加显著,因为推理不仅需要处理数学规则,还要整合社会反馈。然而,尽管双系统理论已广泛应用于多个领域,关于其在不同类型数学归纳推理中的具体作用仍缺乏充分的证据。

在非社会性数学归纳推理研究中(Xiao et al., 2014, 2019, 2020, 2022),当面对复杂的数列规则时,个体往往倾向于依赖简单规则进行预期,即表现出系统1的直觉性加工特点。然而,实际的数列规则更为复杂,简单规则往往不足以准确预测数列的变化。此时,个体需要进行更多的认知控制和工作记忆加工,这时系统2的慎思过程便会介入,从而导致系统1与系统2之间的冲突。此外,研究中不同脑电成分的变化反映了知觉启发式、模式识别、数学事实提取等多种加工策略的并行使用,这些策略主要属于系统1;而更复杂的规则处理,如关系整合、推理验证等,则依赖系统2的加工能力。因此,这些脑电成分的差异性支持了数学归纳推理同时涉及这两个系统的观点。

依据Evans (2003, 2008)的分类标准,双系统在个体差异、功能属性、演化发展及意识状态方面存在显著差异(艾炎,胡竹菁,2018;刘永芳,2022;孙铁等,2020)。据此分析现有的非社会性数学归纳推理的研究如下。

(1)个体差异:归纳推理过程中,脑区激活涉及额-顶网络和颞叶,这些脑区与智力、工作记忆和语言能力相关(Crescentini et al., 2011; Holzman

et al., 1983; Jia et al., 2011; Li et al., 2023; Tavoni et al., 2022; Xiao et al., 2014; Zhou et al., 2017)。由于智力、工作记忆和语言能力具有显著的个体差异,这些脑区的活动也反映了个体在认知资源和处理能力上的差异。双系统理论认为,系统2依赖于这些认知资源,且与个体的智力和工作记忆能力密切相关。因此,归纳推理中的脑区激活不仅反映了系统2的作用和个体差异,也支持了系统2在归纳推理中的重要作用。

(2)功能特征:Wason 2-4-6任务中的证真偏差反映了系统1的作用(Gale & Ball, 2009);类别归纳初期依赖系统1,诱发alpha频段;后期转向系统2,诱发theta频段(Williams et al., 2019, 2023)。背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)反映假设形成,可能反映系统1;晚负成分(late negative component, LNC)和额极皮层(frontopolar cortex, FPC)反映整合信息以形成新异假设(Donosio et al., 2014),可能反映系统2(Crescentini et al., 2011; Jia et al., 2011; Li et al., 2023; Xiao et al., 2014, 2020, 2022; Zhou et al., 2017)。

(3)演化发展:恒河猴研究支持系统1可提取抽象结构,显示具备基本归纳推理能力,体现系统1的普遍性(Merritt et al., 2011);但只有人类能够快速基于关系结构发现规则并激活下前额叶和颞上回,说明系统2为人类特有(Jin et al., 2022; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2022)。

(4)意识状态:归纳推理通常需要意识参与加工,即使遗忘症患者无法显性回忆已习得的规则,他们仍能通过内隐记忆表现出对这些规则的快速应用(Delazer et al., 1999);启动效应研究表明,简单任务主要激活左侧背外侧前额叶皮层(DLPFC),与系统1相关;而复杂任务则主要激活左侧额极皮层(FPC),与系统2相关(钟宁等,2009)。

总之,数学归纳推理涉及系统1和系统2的动态互补,LNC、theta频段和FPC可能反映了归纳推理中系统2,DLPFC和alpha频段可能反映了系统1。但缺乏直接研究明确展示这两个系统在社会性和非社会性数学归纳推理任务中分别是如何相互作用的。因此,后续研究需要比较这两类推理中系统1和系统2的动态互动差异,这不仅能够揭示不同认知系统如何被调动和协调,也为理解人类在复杂社会环境下的认知过程提供新的视角。

2.3 社会性归纳推理中双系统的证据及其神经基础

语义归纳推理已发现归纳推理的社会性效应,发现社会成员身份、教育线索、社会性定型思维、刻板印象等会影响归纳推理(Birnbaum et al., 2010; Butler & Tomasello, 2016; Heyman & Gelman, 2000; Pronovost & Scott, 2021)。自我认同也会引发归纳偏差,并投射到内群体而非外群体,且受到文化背景调节(DiDonato, et al., 2011; Ji et al., 2000; Rhodes et al., 2012)。这些发现表明,社会性数学归纳推理可能也受到类似因素的影响,表现出与非社会性数学归纳推理的显著差异,但目前尚未有研究系统探讨这一问题。

尽管如此,归纳推理中的假设检验阶段已有大量关于社会性效应的研究。根据双系统理论,抽象逻辑规则(或进化不熟悉情境,如“如果 p, 那么 q”)的华生选择任务主要依赖系统1的直觉判断,表现出证真偏差(Evans, 2008);而在具体社会情境下(或进化熟悉情境,如“如果一个人喝啤酒,那么他必定年满 19 岁”),推理不仅依赖系统 1,也需要系统 2 或一般智力参与(Kaufman et al., 2011)。因此,与无关内容的演绎推理类似,数学归纳推理的系统 2 在具体熟悉情境下也可能起重要作用。

然而,社会交换理论提出了不同的观点,支持系统 1 中存在欺骗者检测模块,而否定系统 2 的存在(Cosmides et al., 2010)。研究发现,仅在检测到违反社会交换规则的欺骗者时,个体的推理表现会提高;如果无法获益或没有意图欺骗,推理成绩显著降低(Fiddick et al., 2017)。社会交换任务激活了左侧 FPC、右侧额叶、颞前回和颞后回(Canessa et al., 2005; Ermer et al., 2006; Reis et al., 2007),与心理理论加工相关。

结合心理理论的双系统模型(Apperly & Butterfill, 2009),可以更深入地解释这些发现。心理理论同样存在快速、自动化的系统 1,以及更复杂、需要更多认知资源的系统 2。系统 1 的核心脑区为后侧颞顶联合区(temporoparietal junction, TPJ),负责快速、自动化的心理状态推断;系统 2 的核心脑区涉及内侧前额叶皮层(medial prefrontal cortex, mPFC),负责更复杂的心理状态推理(Apperly et al., 2004)。社会交换理论中快速、自动化的欺骗者检测可能对应于心理理论的系统 1。

在社会性数学归纳推理中,如酒吧问题,个

体需要推断他人意图,进行递归心理理论的社会推理。这可能影响生成数学规则的假设:不仅推测他人选择,自己的选择也受递归加工影响(Rakoczy, 2022)。递归心理理论中, mPFC 编码策略不确定性, DLPFC 编码递归策略(Yoshida et al., 2010)。这种复杂的递归加工可能主要涉及心理理论的系统 2,需要更多的认知资源和灵活性。

总之,社会性数学归纳推理不同于传统数学归纳推理,它要求个体不仅要发现数列规律,还需要处理社会反馈和推测他人意图。归纳推理和心理理论的加工都包含系统 1 和系统 2 的成分,因此,将心理理论的双系统模型应用于社会性数学推理的研究中,可能为理解其特殊性提供新视角。具体而言,双系统模型有助于揭示在不同社会情境中,系统 1 和系统 2 如何在归纳推理过程中交替或协同作用,影响个体对数学规律和社会信息的处理。未来的研究应进一步探讨这两个系统在社会性数学归纳推理中的具体作用及其相互作用机制,并分析它们与前额叶皮层子区域(如 DLPFC、FPC 和 mPFC)活动之间的关系。

3 研究构想

本研究旨在深入探讨推理和心理理论的双系统机制及其相互协作在社会性数学归纳推理中的作用。通过整合推理双系统和心理理论双系统的视角,为复杂经济学的微观基础提供新的认知神经科学洞见。研究将采用综合技术手段,包括行为实验、脑电(ERP)和功能磁共振成像(fMRI)技术,系统地考察非社会性和社会性数学归纳推理过程及其神经基础。具体包括三个子目标。

第一,验证非社会性数学归纳推理的双系统机制及其协作:通过操纵有无冲突规则和认知资源负荷,验证系统 1 和系统 2 的存在及其协同作用。明确系统 1 的神经指标是否为 alpha 频段和背外侧前额叶(DLPFC),负责生成一般假设和快速直觉判断;系统 2 的神经指标是否为 theta 频段和前额极皮层(FPC),负责生成新异假设和深入分析。特别关注两个系统通过额-顶网络的相互协同作用,探究其如何动态调节认知资源分配。这将为双系统理论提供创新的直接证据,推动其在复杂推理领域的应用。

第二,比较非社会情境与社会情境下数学归纳推理过程的异同:采用遗传算法模拟酒吧问题

中的数列, 比较数学归纳推理任务和酒吧问题任务, 探索社会情境如何影响数学归纳推理中双系统的协同作用。通过多体素模式分析(multi-voxel pattern analysis, MVPA)和功能连接分析, 重点考察 DLPFC 和 FPC 在两种情境下的激活模式和动态连接。同时引入心理理论的双系统模型, 结合网络分析方法, 探讨快速自动化的系统 1(TPJ)和更复杂的系统 2(mPFC)在社会性数学归纳推理中的作用及其与数学推理网络的互动关系。

第三, 考察不同社会情境如何调节社会性数学归纳推理的神经机制: 采用多因素实验设计和神经成像分析方法, 系统探究不同类型社会情境(如进化熟悉/不熟悉、收益/损失情境)对数学归纳推理的影响。通过 MVPA 和表征相似性分析(representational similarity analysis, RSA), 识别数学推理和心理理论的特异性神经表征; 结合功能连接分析和因果分析, 考察前额叶各子区域(DLPFC 和 FPC)与心理理论相关脑区(TPJ 和 mPFC)的动态交互模式; 并通过时间进程分析, 揭示不同认知过程的时序特征。

在整个研究过程中, 我们将重点关注社会性数学归纳推理的认知过程和神经机制, 包括阐明推理双系统的协同作用机制及其神经基础, 以及探讨心理理论的双系统模型在社会性数学归纳推理中的应用。阐明不同社会情境下, 推理双系统与心理理论双系统如何协同工作, 以支持复杂的社会性数学归纳推理, 为复杂经济学的微观基础提供新的认知神经科学视角, 特别是在整合推理

和心理理论双系统模型方面。总体的研究框架及技术路线如图 2 所示。

3.1 研究一: 数学归纳推理中的双系统证据

本研究聚焦于非社会情境下, 数学归纳推理中的系统 1 和系统 2 的互动机制。我们旨在构建数学归纳推理的认知和神经机制, 验证数学归纳推理中系统 1 和系统 2 的存在; 探究面对任务冲突和有限认知资源时, 快速直觉的系统 1 和慢速慎思的系统 2 如何协同工作; 以及分析前额叶在协调双系统互动过程中的作用, 增进对归纳推理复杂过程的理解。

为实现上述目标, 研究借鉴 De Neys 等人(2006, 2008, 2010)对演绎推理的双系统研究, 设计了两个主要实验。实验 1 采用单因素被试内设计, 操纵数列有无冲突。我们将呈现一系列数字, 要求被试预测下一个数字。通过比较有冲突和无冲突数列的处理过程, 我们可以检验个体是否使用不同的系统进行加工。实验 2 采用双因素被试内设计, 操纵数列有无冲突和认知负荷高低。我们将采用双任务范式, 在数列判断任务前增加视觉工作记忆任务, 以占用被试的认知资源。通过比较不同认知负荷下有冲突和无冲突数列的处理过程, 我们可以探究认知资源限制如何影响双系统的调用。

为验证数学归纳推理中系统 1 和系统 2 的具体表现, 采用 alpha 频段和 DLPFC 激活作为系统 1 的指标, theta 频段和 FPC 激活作为系统 2 的指标。我们提出假设(如图 1 左侧所示): 1. 在数学归

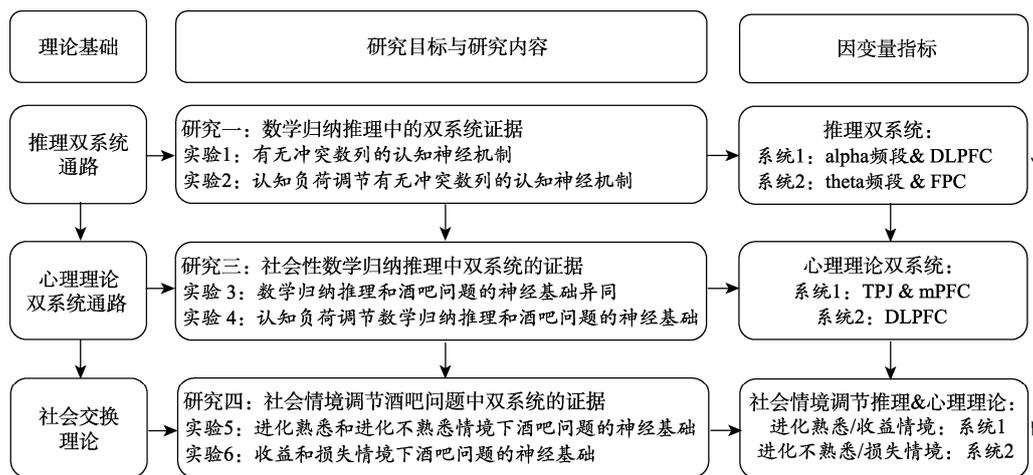


图 2 总体的研究框架及技术路线

纳推理中,系统1和系统2确实存在,并且在不同任务条件下有不同的表现。具体而言,DLPFC基于过去信息形成对未来的一般性假设(系统1),并诱发alpha频段;FPC需要处理额外的不确定信息,生成新异假设(系统2),并诱发theta频段。2.在认知资源受限的、有冲突和双任务的情况下,被试更倾向于使用系统1进行推理。

通过这项研究,我们期望从行为和神经层面为数学归纳推理中的双系统理论提供新证据,为后续的社会情境研究奠定基础,并深化对前额叶子区域功能分工及其动态协作模式的理解。

3.2 研究二: 社会性调节数学归纳推理中双系统的证据

本研究旨在比较社会情境与非社会情境下,数学归纳推理中系统1和系统2的交互模式,同时探讨心理理论的双系统模型如何在这一过程中发挥作用。与非社会性数学归纳推理相比,酒吧问题明确加入了社会因素,要求个体不仅归纳数列规律,还需要理解和预测他人行为。这种情境下,推理的答案往往更复杂、更模糊,因而更需要依赖心理理论。我们将通过多维度的神经指标,探究社会因素如何改变这两个系统间的动态平衡,并影响数学归纳规则的学习和应用。本研究将探究:(1)通过MVPA分析,识别数学归纳推理和心理理论的特异性神经表征。(2)利用功能连接分析,考察心理理论的双系统(TPJ和mPFC)与数学推理系统(DLPFC和FPC)的动态交互模式。(3)通过网络分析,探索社会情境对双系统调节的具体机制,揭示数学归纳推理和递归心理理论在神经网络层面的协同工作方式。

我们将采用两个主要实验来探讨上述问题。实验3采用被试内设计,比较数学归纳推理和酒吧问题两种任务类型。我们呈现一系列数字,要求被试进行规则判断或出席判断,并预测下一个数字。通过多体素模式分析、功能连接分析和网络分析等方法,探究社会情境如何影响数学归纳推理和心理理论双系统的运作。实验4采用2×2的被试内设计,操纵任务类型(数学归纳推理 vs. 酒吧问题)和双任务类型(认知负荷 vs. 社会认知负荷)。认知双任务包括数字判断任务,社会认知双任务包括不同层次的心理理论任务(一阶、二阶和递归心理理论)。通过比较不同类型认知负荷下的表现,探究认知资源限制如何特异性地影响社会

情境中数学归纳推理和心理理论双系统的调用。

基于以往研究和心理理论的双系统模型,我们提出以下假设(如图1右侧所示)。1.通过MVPA分析,预期在酒吧问题中发现数学归纳推理和心理理论的特异性神经表征:数学归纳推理系统1表现为alpha频段增强和DLPFC激活增加;社会情境可能减少数学归纳推理系统2的参与,表现为theta频段、LNC减弱和FPC激活减少;2.功能连接分析将揭示DLPFC、FPC、TPJ和mPFC间的动态整合模式:在酒吧问题中,FPC可能通过与DLPFC的动态耦合实现高阶推理,而TPJ和mPFC的连接强度可能反映心理理论加工的深度;3.在双任务情况下,不同类型的认知负荷可能导致不同的网络重组模式:认知双任务可能增强DLPFC的中心性,而社会认知双任务可能增强TPJ的中心性,同时降低FPC和mPFC的参与度。

通过这项对比研究,我们期望通过多维度的神经指标,系统揭示社会因素如何调节复杂推理,分离归纳推理与社会推理的神经基础,探索数学归纳推理与心理理论的双系统如何在社会性数学归纳任务中相互作用,丰富和发展双系统理论并探索其神经基础。这种研究方法将社会因素引入数学归纳推理的双系统研究中,同时考虑了心理理论的双系统模型,有望为理解人类在复杂社会环境中的推理过程提供更全面和深入的视角。

3.3 研究三: 社会情境类型调节酒吧问题中双系统的证据

本研究旨在系统比较不同类型社会情境对数学归纳推理的影响,并解决双系统理论、社会交换理论以及心理理论双系统理论在社会性数学归纳推理领域的争议。社会交换理论反对双系统理论,认为只有社会交换情境才能激活相关社会认知模块,提高推理表现,不存在系统2的参与。为了全面考察这一问题,我们采用多因素设计结合先进的神经成像分析方法,深入探究社会情境的多维度影响及其神经机制。我们计划参考华生选择任务的研究(Cosmides et al., 2010; Kaufman et al., 2011),比较进化熟悉和进化不熟悉情境,以及成本和收益情境下的数学归纳推理表现。同时,我们将整合心理理论的双系统理论,探讨心理理论系统1加工和系统2加工如何在不同社会情境下影响数学归纳推理。

为实现这些目标,我们设计了两组实验,每

组包含行为研究和 fMRI 研究。实验 5 为进化熟悉和不熟悉情境下酒吧问题的研究: 实验 5A 采用被试间设计, 采用多人联机方式, 比较进化熟悉情境(经典酒吧问题)和进化不熟悉情境(改编版本)下的行为表现; 实验 5B 采用被试内设计, 使用 fMRI 技术探究两种情境下前额叶区域(DLPFC、FPC)以及心理理论相关脑区(TPJ、mPFC)的激活和连接模式。实验 6 为收益和损失情境下酒吧问题的研究: 实验 6A 采用被试间设计, 采用多人联机方式, 比较收益情境(经典酒吧问题)和损失情境(垃圾收集问题)下的行为表现; 实验 6B 采用被试内设计, 使用 fMRI 技术探究两种情境下前额叶区域的激活和连接模式。在这些实验中, 我们将测量以下因变量: 行为指标包括出席/选择判断的正确率和反应时, 人数预测的正确率和反应时, 不确定性评估。神经指标包括 DLPFC、FPC、TPJ 和 mPFC 的激活模式和功能连接。通过 MVPA 识别不同任务条件下的特异性神经表征, 利用 RSA 比较不同条件下的神经表征模式, 结合功能连接分析考察不同脑区网络的动态交互, 并通过因果分析探究脑区间的信息流动方向。

基于以上研究设计, 我们提出以下 3 个主要假设。(1)通过 MVPA 和 RSA 分析, 预期发现数学推理和心理理论具有特异性的神经表征模式, 且这些模式会随社会情境系统性变化: 在进化熟悉情境和收益情境中, 个体倾向使用情感和经验作决策, 心理理论相关的神经表征将占主导; 在进化不熟悉情境和成本情境中, 数学推理相关的神经表征更为突出。(2)通过功能连接和因果分析, 预期观察到 DLPFC-FPC 网络与 TPJ-mPFC 网络之间存在动态交互, 且这种交互模式会随社会情境改变: 在进化熟悉情境和收益情境中, 系统 2 的参与可能较少, 但仍然存在, 表现为 FPC 和 mPFC 的活动相对较弱但仍可检测; 在进化不熟悉情境和成本情境中, 系统 2 的参与更明显, 表现为 FPC 和 mPFC 的活动显著增强。(3)通过时间进程分析, 预期发现数学推理和心理理论加工具有不同的时序特征, 且不同系统的激活存在先后顺序: 在进化熟悉情境和收益情境中, 心理理论系统可能优先激活; 而进化不熟悉和成本情境中, 数学推理系统可能主导早期加工。

通过这项研究, 我们期望深入理解社会环境如何通过影响认知过程的神经机制来调节社会性

数学归纳推理。这将有助于解决关于系统 2(包括数学归纳推理和心理理论)是否参与社会性归纳推理的争议, 并为双系统理论、社会交换理论和心理理论双系统理论之间的讨论提供新的证据。同时, 通过多维度的实验操纵和更丰富的神经指标, 我们能够更准确地揭示不同社会情境如何影响系统 1 和系统 2 在归纳推理中的作用, 以及数学认知和社会认知的神经网络如何在复杂的社会性数学归纳任务中实现动态整合。

总之, 本研究通过多因素实验设计和先进的神经成像分析方法, 整合数学归纳推理的双系统理论和心理理论的双系统模型, 旨在探讨个体如何利用数学归纳推理完成多人交互的预测, 解析社会环境对数学归纳推理的影响, 从认知和神经层面深入理解归纳推理的双系统机制, 并为复杂经济学提供微观层面的解释。

4 理论建构

复杂经济学指出经济系统并非一个完美静态的体系, 而是一个随着人们的行动、计划和信念不断变化和发展的动态有机系统。在多人交互活动中, 由于个体之间信息不完整, 参与者需要通过持续的互动来不断更新自身的行动和策略以适应动态变化的社会情境。因此, 社会性数学归纳推理成为这种社会情境中的核心认知加工, 体现了复杂经济学中“有限理性”的基本假设: 个体通过不断生成、更新和检验归纳假设以指导行动。双系统理论作为一种典型的有限理性理论框架, 强调人类认知中快速直觉(系统 1)和慢速慎思(系统 2)的相互作用, 能够很好地解释个体在推理过程中由于系统冲突或资源限制而出现的非理性决策。此外, 社会性推理不仅涉及数学规律的归纳推理, 还需要推测他人心理状态, 这就涉及心理理论的加工。心理理论同样可以通过双系统理论来解释有限认知资源对社会推理加工的影响。因此, 本研究从双系统理论出发, 旨在探讨社会性数学归纳推理中的双系统机制, 具体包括推理双系统和心理理论双系统两条通路。推理双系统涉及系统 1(快速自动化的直觉处理)和系统 2(基于规则的慢速慎思), 而心理理论双系统则同样包括系统 1(自动化的社会推理)和系统 2(需要更多认知资源的复杂社会推理)。本研究尝试构建推理双系统和心理理论双系统在社会性数学归纳推理中

的相互作用机制, 并探讨其与大脑相关区域(如前额叶皮层子区域 DLPFC、FPC、mPFC 等)活动之间的关系, 从而进一步揭示其认知神经机制(见图 1)。

(1)在认知双系统中, 数学归纳推理中的系统 1 是基于直觉、自动化的认知系统, 它快速处理信息并生成初步假设, 由前额叶背外侧皮层(DLPFC)负责, 其特征表现为 alpha 频段的脑电活动; 系统 2 是较慢且依赖于认知资源的系统, 负责深度分析和审慎推理, 由前额极皮层(FPC)负责, 表现为 theta 频段的脑电活动(Crescentini et al., 2011; Donoso et al., 2014; Jia et al., 2011; Li et al., 2023; Tavoni et al., 2022; Xiao et al., 2014; 钟宁等, 2009; Zhou et al., 2017)。在归纳推理中, 系统 2 不仅修正和完善系统 1 生成的初步假设, 还会在遇到冲突或新信息时, 重新评估并生成更为准确的推理结果。在认知资源充足的情况下, 系统 2 能够充分发挥作用, 处理复杂的推理任务; 而在认知资源受限时, 个体更倾向于依赖系统 1, 尤其是在面临冲突情境时。DLPFC 和 FPC 在数学归纳推理过程中动态协作, 共同推动个体在不同情境下的推理过程。DLPFC 主要负责生成基于已知信息的假设, 而 FPC 则在遇到冲突或新信息时进行调控和调整。为验证这一理论框架, 本研究通过比较有冲突的数列, 以及额外的双任务, 来系统探讨归纳推理中系统 1 与系统 2 的作用机制。这一研究将拓展双系统理论在数学归纳推理领域的应用, 为数学推理训练提供科学依据, 并为提升人工智能的归纳推理能力提供启示。

(2)社会性数学归纳推理中, 个体不仅需要进行数学规则的推理, 还需要推断他人的意图和可能的行为。社会交换理论指出, 社会交换情境比进化不熟悉情境表现更好, 也比损失情境表现更好, 因为欺骗者检测是一种快速的、自动的认知模块, 可以明显提高推理表现(Cosmides et al., 2010)。在心理理论双系统通路中, 欺骗者检测可能对应于心理理论的系统 1, 用于快速判断他人的意图和行为, 可能主要依赖于颞顶联合区(TPJ); 系统 2 涉及更复杂的心理状态推理, 甚至递归的心理理论加工, 即个体不仅要推测他人的选择, 还要考虑到他人对自己选择的反应, 依赖于内侧前额叶皮层(mPFC)和背外侧前额叶(DLPFC)的协同工作。鉴于此, 本研究首先比较酒吧问题和数学归纳推理, 以此确定心理理论在社会性数学归

纳推理的作用; 其次, 参考社会交换理论的研究(Cosmides et al., 2010; Kaufman et al., 2011), 比较酒吧问题与改编的进化不熟悉情境和损失情境, 以此探究心理理论的双系统在酒吧问题中的作用。这一理论框架不仅为数学归纳推理中的社会性效应提供了新的解释视角, 也为未来研究双系统在复杂认知任务中的广泛应用奠定了理论基础。

(3)深入探讨推理和心理理论的双系统在社会性数学归纳推理中的具体作用及其相互作用机制, 特别是它们与前额叶皮层(如 DLPFC、FPC 和 mPFC)活动之间的关系, 将有助于更全面地理解社会性数学归纳推理的复杂性。本研究将丰富复杂经济学决策等跨学科领域的理论基础, 为优化经济决策提供新视角和方法, 并有望应用于经济决策等领域, 提高人类面对复杂经济环境决策的理性和效率, 引领人工智能中多智能体模拟的发展。综上, 本研究的创新之处在于将前沿理论与方法相结合, 聚焦于社会情境对归纳推理中双系统互动的调节作用这一核心问题, 不仅为数学归纳推理领域提供了新的理论视角和研究思路, 也为相关跨学科领域的理论与实践作出重要贡献。

参考文献

- 艾炎, 胡竹菁. (2018). 推理判断中偏差反应的加工机制: 冲突探查失败, 还是抑制失败? *心理科学*, 41(4), 869-875.
- 刘永芳. (2022). 有限理性的本质辨析与价值之争. *心理学报*, 54(11), 1293-1309.
- 孙铁, 袁上清, 李艺, 肖风. (2020). 推理偏差: 冲突察觉还是冲突抑制的失败? *心理学探新*, 40(1), 221-227.
- 钟宁, 梁佩鹏, 秦裕林, 吕胜富, 杨延辉, 李坤成. (2009). 数据驱动的科学发现的神经机制: 一项 fMRI 研究. *中国科学: C 辑*, 39(3), 271-278.
- Apperly, I. A., & Butterfill, S. A. (2009). Do humans have two systems to track beliefs and belief-like states? *Psychological Review*, 116(4), 953-970.
- Apperly, I. A., Samson, D., Chiavarino, C., & Humphreys, G. W. (2004). Frontal and temporo-parietal lobe contributions to theory of mind: Neuropsychological evidence from a false-belief task with reduced language and executive demands. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(10), 1773-1784.
- Arthur, W. B. (1994). Inductive reasoning and bounded rationality (The El Farol problem). *The American Economic Review*, 84(2), 406-411.
- Arthur, W. B. (1999). Complexity and the economy. *Science*, 284(5411), 107-109.
- Arthur, W. B. (2021). Foundations of complexity economics.

- Nature Review Physics*, 3(2), 136–145.
- Baccan, D., Macedo, L., & Sbruzzi, E. (2014, October). Is the El Farol more efficient when cognitive rational agents have a larger memory size? In *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (pp. 39–44). IEEE.
- Birnbaum, D., Deeb, I., Segall, G., Ben-Eliyahu, A., & Diesendruck, G. (2010). The development of social essentialism: The case of Israeli children's inferences about Jews and Arabs. *Child Development*, 81(3), 757–777.
- Butler, L. P., & Tomasello, M. (2016). Two- and 3-year-olds integrate linguistic and pedagogical cues in guiding inductive generalization and exploration. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 64–78.
- Canessa, N., Gorini, A., Cappa, S. F., Piattelli - Palmarini, M., Danna, M., Fazio, F., & Perani, D. (2005). The effect of social content on deductive reasoning: An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 26(1), 30–43.
- Chen, S. H., Duffy, J., & Yeh, C. H. (2005). Equilibrium selection via adaptation: Using genetic programming to model learning in a coordination game. In S. Jørgensen, M. Quincampoix, & T. L. Vincent (Eds.), *Advances in dynamic games: Applications to economics, finance, optimization, and stochastic control* (Vol. 7, pp. 571–598). Birkhäuser Boston.
- Chen, S. H., & Gostoli, U. (2017). Coordination in the El Farol Bar problem: The role of social preferences and social networks. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 12, 59–93.
- Cosmides, L., Barrett, H. C., & Tooby, J. (2010). Adaptive specializations, social exchange, and the evolution of human intelligence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(S2), 9007–9014.
- Crescentini, C., Seyed-Allaei, S., De Pisapia, N., Jovicich, J., Amati, D., & Shallice, T. (2011). Mechanisms of rule acquisition and rule following in inductive reasoning. *Journal of Neuroscience*, 31(21), 7763–7774.
- Cross, R., Grinfeld, M., Lamba, H., & Pittock, A. (2004). Rationality, frustration minimization, hysteresis, and the El Farol problem. In P. Bourguine & J.-P. Nadal (Eds.), *Cognitive economics: An interdisciplinary approach* (pp. 245–274). Springer.
- Delazer, M., Girelli, L., & Benke, T. (1999). Arithmetic reasoning and implicit memory: A neuropsychological study on amnesia. *Cortex*, 35(5), 615–627.
- De Neys, W. (2006). Dual processing in reasoning: Two systems but one reasoner. *Psychological Science*, 17(5), 428–433.
- De Neys, W., & Glumicic, T. (2008). Conflict monitoring in dual process theories of thinking. *Cognition*, 106(3), 1248–1299.
- De Neys, W., Moyens, E., & Vansteenwegen, D. (2010). Feeling we're biased: Autonomic arousal and reasoning conflict. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 10(2), 208–216.
- DiDonato, T. E., Ullrich, J., & Krueger, J. I. (2011). Social perception as induction and inference: An integrative model of intergroup differentiation, ingroup favoritism, and differential accuracy. *Journal of Personality and Social Psychology*, 100(1), 66–83.
- Donoso, M., Collins, A. G., & Koechlin, E. (2014). Foundations of human reasoning in the prefrontal cortex. *Science*, 344(6191), 1481–1486.
- Edmonds, B. (1999). Modelling bounded rationality in agent-based simulations using the evolution of mental models. In T. Brenner (Ed.), *Computational techniques for modelling learning in economics* (pp. 305–332). Springer US.
- Ermer, E., Guerin, S. A., Cosmides, L., Tooby, J., & Miller, M. B. (2006). Theory of mind broad and narrow: Reasoning about social exchange engages ToM areas, precautionary reasoning does not. *Social Neuroscience*, 1(3–4), 196–219.
- Evans, J. S. B. (2003). In two minds: Dual-process accounts of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 454–459.
- Evans, J. S. B. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 255–278.
- Felix, J. N., Luca, M. L., Nils, L., & Tobias, K. (2022). On the reliability of individual economic rationality measurements. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(31), e2202070119.
- Fiddick, L., Brase, G. L., Cosmides, L., & Tooby, J. (2017). Rethinking relevance: Repetition priming reveals the psychological reality of adaptive specializations for reasoning. *Evolution and Human Behavior*, 38(3), 366–375.
- Franke, R. (2003). Reinforcement learning in the El Farol model. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 51(3), 367–388.
- Gale, M., & Ball, L. J. (2009). Exploring the determinants of dual goal facilitation in a rule discovery task. *Thinking & Reasoning*, 15(3), 294–315.
- Heyman, G. D., & Gelman, S. A. (2000). Preschool children's use of trait labels to make inductive inferences. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(1), 1–19.
- Holzman, T. G., Pellegrino, J. W., & Glaser, R. (1983). Cognitive variables in series completion. *Journal of Educational Psychology*, 75(4), 603–618.
- Ji, L. J., Peng, K., & Nisbett, R. E. (2000). Culture, control, and perception of relationships in the environment. *Journal of Personality and Social Psychology*, 78(5), 943–955.
- Jia, X., Liang, P., Lu, J., Yang, Y., Zhong, N., & Li, K. (2011). Common and dissociable neural correlates associated with component processes of inductive reasoning. *NeuroImage*, 56(4), 2292–2299.
- Jin, Y., Jensen, G., Gottlieb, J., & Ferrera, V. (2022). Superstitious learning of abstract order from random reinforcement. *Proceedings of the National Academy of*

- Sciences of the United States of America*, 119(35), e2202789119.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Macmillan.
- Kaufman, S. B., DeYoung, C. G., Reis, D. L., & Gray, J. R. (2011). General intelligence predicts reasoning ability even for evolutionarily familiar content. *Intelligence*, 39(5), 311–322.
- Kumar, S., & Gonzalez, C. (2017). Heterogeneity of memory decay and collective learning in the El Farol Bar Problem. In *2017 International Conference on Social Computing, Behavioral-Cultural Modeling, & Prediction and Behavior Representation in Modeling and Simulation (SBP-BRiMS)* (pp. 231–238). Washington, DC, USA: IEEE Computer Society.
- Leady, J. R. (2007, August 21). If nobody is going there anymore because it's too crowded, then who is going? *Experimental Evidence of Learning and Imitation in the El Farol Coordination Game*. Paper presented at the First International Congress of Behavioral Medicine, Uppsala, Sweden.
- Li, M., Lu, Y., & Zhou, X. (2023). The involvement of the semantic neural network in rule identification of mathematical processing. *Cortex*, 164, 11–20.
- Merritt, D. J., Maclean, E. L., Crawford, J. C., & Brannon, E. M. (2011). Numerical rule-learning in ring-tailed lemurs (lemur catta). *Frontiers in Psychology*, 2, 8493–8502.
- Pronovost, M. A., & Scott, R. M. (2021). 20-month-olds use social categories to make inductive inferences about agents' preferences. *Journal of Cognition and Development*, 22(2), 328–342.
- Radziszewska, W., Kowalczyk, R., & Nahorski, Z. (2014). El Farol bar problem, potluck problem and electric energy balancing-on the importance of communication. In *2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems* (pp. 1515–1523). IEEE.
- Rakoczy, H. (2022). Foundations of theory of mind and its development in early childhood. *Nature Reviews Psychology*, 1, 223–235.
- Rand, W., & Stonedahl, F. (2007). *The El Farol bar problem and computational effort: Why people fail to use bars efficiently*. Northwestern University.
- Reis, D. L., Brackett, M. A., Shamos, N. A., Kiehl, K. A., Salovey, P., & Gray, J. R. (2007). Emotional intelligence predicts individual differences in social exchange reasoning. *NeuroImage*, 35(3), 1385–1391.
- Rhodes, M., Leslie, S. J., & Tworek, C. M. (2012). Cultural transmission of social essentialism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(34), 13526–13531.
- Sloman, S. A. (1996). The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological Bulletin*, 119(1), 3–22.
- Tavoni, G., Doi, T., Pizzica, C., Balasubramanian, V., & Gold, J. I. (2022). Human inference reflects a normative balance of complexity and accuracy. *Nature Human Behaviour*, 6(8), 1153–1168.
- Trinh, T. H., Wu, Y., Le, Q. V., He, H., & Thang, L. (2024). Solving olympiad geometry without human demonstrations. *Nature*, 625(7995), 476–482.
- Wang, L., Uhrig, L., Jarraya, B., & Dehaene, S. (2015). Representation of numerical and sequential patterns in macaque and human brains. *Current Biology*, 25(15), 1966–1974.
- Williams, C. C., Hassall, C. D., & Krigolson, O. E. (2023). Stabilizing expectations when shifting from analytical to intuitive reasoning: The role of prediction errors in reasoning. *Cortex*, 161, 145–153.
- Williams, C. C., Kappen, M., Hassall, C. D., Wright, B., & Krigolson, O. E. (2019). Thinking theta and alpha: Mechanisms of intuitive and analytical reasoning. *NeuroImage*, 189, 574–580.
- Xiao, F., Li, P., Long, C. Q., Lei, Y., & Li, H. (2014). Relational complexity modulates activity in the prefrontal cortex during numerical inductive reasoning: An fMRI study. *Biological Psychology*, 101, 61–68.
- Xiao, F., Sun, T., Cai, X. -L., & Chen, Q. -F. (2020). Task relevance effect on number/shape conflict detection in the number-matching task: An ERP study. *Acta Psychologica*, 208, 103126.
- Xiao, F., Sun, T., Qi, S., & Chen, Q. (2019). Common and distinct brain responses to detecting top-down and bottom-up conflicts underlying numerical inductive reasoning. *Psychophysiology*, 56(12), e13455.
- Xiao, F., Wang, Z. D., Yuan, S. Q., Liang, K., & Chen, Q. (2022). Relational integration predicted numerical inductive reasoning: ERP Evidence from the N400 and LNC. *Psychophysiology*, 59(9), e14046.
- Yoshida, W., Seymour, B., Friston, K. J., & Dolan, R. J. (2010). Neural mechanisms of belief inference during cooperative games. *Journal of Neuroscience*, 30(32), 10744–10751.
- Zambrano, E. (2004). The interplay between analytics and computation in the study of congestion externalities: The case of the El Farol problem. *Journal of Public Economic Theory*, 6(2), 375–395.
- Zhang, H., Zhen, Y., Yu, S., Long, T., Zhang, B., Jiang, X., ... Wang, L. (2022). Working memory for spatial sequences: Developmental and evolutionary factors in encoding ordinal and relational structures. *Journal of Neuroscience*, 42(5), 850–864.
- Zhou, X., Li, M., Li, L., Zhang, Y., Cui, J., Liu, J., & Chen, C. (2017). The semantic system is involved in mathematical problem solving. *NeuroImage*, 166, 360–370.

Why did Newton fail at stock trading: The cognitive neural mechanisms of dual systems in social numerical inductive reasoning

XIAO Feng¹, ZHENG Xiuchen¹, XIAO Na¹, CHEN Qingfei²,
WU Xiaofei³, ZHANG Di¹

(¹ School of Psychology, Key Laboratory of Brain Function and Brain Disease Prevention and Treatment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China) (² School of Psychology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China) (³ Jing Hengyi School of Education, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Numerical inductive reasoning in multi-agent interactive contexts reflects bounded rationality. However, it is still unclear how fast intuitive System 1 and slow deliberative System 2 interact under social contexts. Social numerical inductive reasoning refers to situations where individuals must not only induce numerical patterns but also consider how these patterns are modulated by others' decisions in multi-agent interactive social contexts. This project aims to explore the cognitive neural mechanisms of dual systems in numerical inductive reasoning and theory of mind underlying social numerical inductive reasoning, specifically how the two systems interact to adapt to the social environment. By combining behavioral experiments, event-related potentials (ERPs), and functional magnetic resonance imaging (fMRI) techniques, this project will be divided into three parts: firstly, investigating the evidence of the dual systems in non-social numerical inductive reasoning to establish a foundation for understanding the cognitive mechanisms in social tasks; secondly, comprehensively comparing neural mechanisms of dual systems in numerical inductive reasoning between social and non-social contexts, with emphasis on analyzing the collaborative functioning of dual systems during reasoning; and lastly, examining the neural mechanisms in social numerical inductive reasoning under different types of social contexts, exploring the influence of social contexts on reasoning processes and their neural mechanisms. This project will expand the application of dual system theory to explore the cognitive neural mechanism of complexity economy, providing new theoretical perspectives for understanding cognition in multi-agent interactive social contexts, inspiring mathematical education, artificial intelligence, and other practical applications.

Keywords: complexity economy; inductive reasoning; bounded rationality; dual system