

共赢促进合作的认知计算机制： 互惠中积极期望与社会奖赏的作用*

吴小燕¹ 付洪宇¹ 张腾飞¹ 鲍东琪² 胡捷³
朱睿达⁴ 封春亮⁵ 古若雷^{6,7} 刘超¹

(¹ 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室暨 IDG/麦戈文脑科学研究院, 北京 100875)

(² 苏黎世大学经济学系神经经济学中心, 苏黎世 8006, 瑞士)

(³ 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)

(⁴ 中山大学心理学系, 广州 510006) (⁵ 华南师范大学心理学院, 广州, 510631)

(⁶ 中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101) (⁷ 中国科学院大学心理学系, 北京 100049)

摘要 在社会互动中, 人们常表现出有条件的合作行为, 即只有在预期他人也合作时人们才愿意合作。当前该过程的认知机制尚不明确。本文采用多回合版本的囚徒困境范式, 两项实验均表明个体的合作行为随合作者合作行为的提高而提高。认知计算模型显示个体同时采用了一阶信念(只根据他人过去的行为)与二阶信念(既根据他人过去的行为, 也考虑自己的行为对他人产生的影响)去更新他们对合作者的合作概率的期望。结果显示个体的有条件合作行为的提升由积极期望(即合作成功使得个体对合作者建立了积极的期望)与社会奖赏(由合作本身带来的额外奖励)共同驱动。这些结果揭示了有条件的合作行为的计算认知学习机制, 阐明了积极期望和社会奖赏对合作的促进作用, 能为社会中各领域合作的成功推动提供了重要的科学证据与参考价值。

关键词 条件合作, 社会奖赏, 积极期望, 认知计算建模, 信念更新

分类号 B842

1 前言

合作(Cooperation)是促进人类社会发展的基石(Fehr & Fischbacher, 2003)。合作并非凭空发生, 而是依赖于合作中的互惠和收益(Fischbacher et al., 2001)。当个体在合作中付出却没有回报时, 其行为无法得到强化, 因而合作关系无法持久(Baker & Rachlin, 2001)。合作本质上需要参与各方牺牲自我利益, 以达到群体最优。因此, 人们在面临合作时也期待对方有所付出以实现互惠互利(De Cremer & Van Lange, 2001)。大量的研究表明个体通常在他人合作或预期他人会合作的情况下才会愿意合作, 这称为有条件的合作(Conditional cooperation, 简称

条件合作)(Fehr & Schurtenberger, 2018)。但至今为止, 条件合作的认知计算机制尚不清楚。根据既往研究, 有两个重要的因素驱动着个体进行条件合作, 分别是合作期望(即个体对他人合作的期望)与社会奖赏(Social reward, 即合作成功带来的喜悦与主观积极体验)(Pal & Hilbe, 2022)。

有效的合作决策需要准确地预知合作者的合作意愿, 那么人们如何能够知道他人的合作意愿呢? 最重要的信息来源于先前的互动(van Baar et al., 2019)。在多次互动的情景中, 个体会对合作者的后续行为建立起一个动态的预期, 随着多次互动的反馈继而更新这种预期。简而言之, 如果个体对合作者抱有积极的期待, 即认为合作者有较大可能选择

收稿日期: 2023-10-14

* 国家自然科学基金(32271092; 32130045)和国家社会科学基金重大项目(19ZDA363)。

通信作者: 刘超, E-mail: liuchao@bnu.edu.cn

合作, 这种情况下如果个体也选择合作就能够为双方带来更大的收益, 因此个体的合作概率也会提高(Gächter, 2007)。在公共博弈品游戏¹中, 研究多次发现个体在游戏重复多个回合后, 会逐渐通过合作者的合作水平来调整自己的合作水平(Fischbacher et al., 2001)。这一过程得到了许多研究确认, 但直到最近几年才有研究者应用认知计算建模试图揭示合作的动态学习过程。Fareri 等人(2012, 2015)采用了强化学习的基础模型来研究个体在信任游戏²中的动态学习过程。该模型假定个体根据每次互动的结果与预期的差异(即预期误差, Prediction error), 通过学习率(Learning rate)来更新下一回合的预期(即预期更新, Expectation updating)。这里学习率的大小影响了个体将预期误差用于更新下一回合的预期的速度。该模型的特点是人们只是在被动地根据对手过去的行为建立未来合作可能性的预期。尽管该研究发现了带有学习假设的模型要比没有学习假设的模型更好地解释被试的行为, 也为动态预期更新的过程提供了认知机制上的证据(Fareri et al., 2012; Fareri et al., 2015)。但不足之处在于该研究中仅采用了一种学习模型, 并未与其他模型比较。

心理学认为心智化(Mentalizing)是支持人们社会互动的重要心理功能(Astington & Jenkins, 1995)。上述提到的单从他人的行为表现来推导其心理和意图的心理过程被称为“一阶信念”, 是人们较为基础的心智化功能(Rusch et al., 2020)。相比于一阶信念, “二阶信念”是更加高级和复杂的心智化功能。二阶信念指的是双方在互动过程中, 个体不仅会从合作者的行为表现来推测其合作意愿, 也会考虑到自己过去的行为如何影响对方从而影响对手接下来的行为(Wu et al., 2020)。研究发现个体在

实时博弈的监工游戏³中同时采用一阶和二阶信念去更新他们对竞争对手行为的预期(Hampton et al., 2008)。该研究中所应用的影响模型(Influence Model)假设个体不仅可以根据对手以往的表现来推断其想法(一阶信念), 还包括个体同时考虑自己的行动如何影响对手的信念从而影响对手接下来的行为(二阶信念)。随后有脑成像研究发现, 在监工游戏互动中, 个体的一阶信念和二阶信念可能由不同的神经机制所调控(Hill et al., 2017)。尽管二阶信念在社会互动中如此重要, 然而在多次合作情景中的作用尚不明确。合作相关的实验范式与上述研究中监工游戏范式的不同点在于, 合作范式中存在合作双方最优解, 即每个人放弃自己的最优选择可以成就双方总和最优解。那么个体在多次合作情景中是否也采用了二阶信念去推测合作者的行为呢? 目前尚未有研究考察。这可能是用于研究合作行为的经典范式囚徒困境有稳定的纳什均衡点⁴(Kreps et al., 1982)。当双方决策达到纳什均衡点时将不再有信息更新, 此时个体无需通过预期误差去更新对合作者的期望, 因此也不适用于探索其行为决策的动态发展过程。因而, 本研究的目的之一是构建一个能够观察到个体在动态学习中不断调整合作行为的实验环境, 以便我们采用计算建模探索人们在合作过程中的动态预期更新, 并深入揭示合作的计算认知机制。为了更加深入探究合作过程中个体对他人预期的动态学习过程, 本研究将比较不同的模型, 以探索个体是否在多次合作中同时采用一阶和二阶信念去更新他们对合作者的合作意愿的期望。

社会互动会带来愉悦的体验, 这种体验被称为社会奖赏, 在促进个体参与社会行为方面起到重要

¹ 公共博弈品游戏(Public Goods Game)是行为经济学用于测量合作行为的一个经典实验范式。游戏中通常有多名参与者同时进行, 每个人有若干初始金额。游戏规则是每个人能够选择投入一定比例的个人金额到公共池中, 投入到公共池中的金币会翻倍(通常是 1.6 倍)然后平均地分给每位参与者。在此游戏中, 每个人投入的金额的多寡作为合作行为的测量。

² 信任游戏(Trust Game)是一种经典的行为经济学实验, 用于测量参与者之间的信任和合作行为。在这个游戏中, 通常有两名参与者, 一名扮演投资者(Trustor)和一名受托者(Trustee)。投资者拥有一定数量的初始资金。投资者可以选择将一部分或全部自己的资金交给受托者, 然后受托者可以自由决定如何处理收到的资金。投资者的投资金额被用于测量信任水平。

³ 该研究中的监工游戏有两名参与者同时进行一个互动游戏, 其中一方为老板(employer)一方为员工(employee), 老板有两个选择监工或不监工, 员工也有两个选择工作或偷懒。因监工需要一定的成本, 所以对于老板来说他最佳决策是当员工工作时他便不监工, 而当员工偷懒时他便监工。而对员工的最优策略则是当老板监工时他便工作, 而老板不监工时他便偷懒。该研究范式与囚徒困境合作范式的最大不同之处在于并不存在一个双方总和上的最优方案, 即合作。

⁴ 纳什均衡是博弈论中的一个解决方案概念, 用于描述多人博弈中的一种稳定状态, 其中每个参与者都做出了最佳的策略选择, 考虑到其他参与者的策略。在这种状态下, 没有参与者有动机单独改变他们的策略, 因为任何单一的策略改变都不会使他们的结果更好。

的作用(Tamir & Hughes, 2018)。促成条件合作的另一个可能因素是社会奖赏(Stallen et al., 2013), 即合作成功本身能够带来奖赏价值, 从而强化人们的合作行为(唐辉等, 2022)。脑成像研究表明, 在获得相同金钱奖励的条件下, 双方合作会引发腹侧与背侧纹状体更强烈的激活。腹侧与背侧纹状体是奖赏加工的重要大脑区域, 这表明人们在合作中获得收益会产生更强的奖赏反应(Rilling et al., 2002)。事件相关电位研究也报告了类似的发现(白丽英 等, 2014)。Rilling 等人(2002)认为这种由合作成功所带来的社会奖赏对于维持合作非常重要。但是如果在互动中个体能够精确预测合作者的行为, 这已经有足够的信息能够帮助个体做出决策(Nowak & Sigmund, 1993)。那么还需要额外的社会奖赏来促进条件合作吗? 对于这个问题我们尚未知道答案。目前尚未有研究采用认知计算建模系统地检验这两者在多次合作中的作用。因此, 本研究的另一个目的是通过系统地构建和比较不同的认知模型, 探索人们在多次合作过程中条件合作行为产生的认知计算机制, 检验合作期望和社会奖赏这两者对条件合作行为的作用。

本研究所采用的范式改编自经典的囚徒困境范式⁵。与原经典范式最大的不同之处是多次互动的设置。被试在任务中与另一个合作者进行多次博弈, 每次面临选择或背叛两个选项。为了使被试在游戏中必须不断学习和调整决策, 我们操纵了合作者的行为, 其选择行为由实验程序提前设定。同时, 为增强实验情境的真实性, 在低概率合作部分引入了变动的概率周期。本研究包含两个实验: 实验1构建了不同假设的模型以探索条件合作的认知计算机制; 实验2则在实验1的基础上, 进一步分离了合作者合作行为的变动性和概率, 以便我们考察这两者对个体合作行为的影响及其内在的认知计算机制。为了考察这种效应是否特异于社会合作情况, 我们在两个实验中还设置了非社会条件。在非社会

条件中, 被试被告知与他们的合作者不是真人而是电脑程序。非社会条件与合作条件除了指导语外其他设置完全一致。本研究的第一个假设是, 被试的合作行为会随合作者行为的变化而变化, 当合作者表现出高概率合作时被试也会更倾向于选择合作。本研究的第二个假设进一步提出, 个体可能同时采用了一阶和二阶信念去更新他们对合作者行为的期望。为了回答这一问题, 我们将 Hampton 等人(2008)所提出的影响模型根据我们的实验任务进行调整, 通过系统地构建和比较模型和比较来回答这一问题。本研究的第三个假设在假设一的基础上提出, 个体因合作者的高合作倾向所表现出更多的合作行为, 可能主要有两个方面的因素所驱动。其一是积极期望, 即合作者的高概率合作使得被试对合作者建立了积极的期望。其二是社会奖赏, 即合作者的高合作概率使得被试从合作成功中感受到更多奖赏价值。也有可能两者共同作用以促进合作行为。

2 实验 1: 合作者合作意愿对条件合作的影响

2.1 方法

2.1.1 被试

实验1中共招募了135名年龄在18至30岁之间的健康成人被试(平均年龄: 21.69 ± 2.96 岁, 79名女性), 均为北京师范大学在读学生。所有被试的视力或矫正视力正常, 无精神疾病病史。所有被试在正式实验开始前签署知情同意书。本研究获得北京师范大学心理学部研究伦理委员会的批准(批准号: CNL_A_0001_009), 遵守《赫尔辛基宣言》的相关规定。对样本量选取参考了采用类似的学习任务和研究方法的研究(Fang et al., 2024; Henco et al., 2020; Mukherjee et al., 2020), 同时兼顾样本获取的便利性, 实验前未使用任何软件工具进行计算样本量。

2.1.2 实验任务

本研究采用改编版的囚徒困境范式, 被试在游戏中与一名合作者进行多次互动, 每轮决策面临“合作”或“背叛”两个选项。为消除社会赞许影响, 实验指导语避免了使用“合作”、“背叛”等词汇, 改用几何形状(三角形、正方形)来表示选项对应的奖励(图1a)。被试被告知合作者也在同时面临选择, 根据双方决策, 会有四种结果, 对应不同的奖励(表1)。具体来说, 双方均合作时则各得4代币, 被

⁵ 囚徒困境(Prisoner's Dilemma)来源于博弈论中的一个问题。用于研究合作和竞争之间的冲突情境。在这个问题中, 有两名被捕的犯人分开审讯, 每名犯人都面临着合作或背叛的选择。本文中提及的囚徒困境范式指的是行为经济学用于研究合作行为的一个经典研究范式。游戏中有两名参与者, 他们各自有两种选择, 即合作或背叛。具体来说, 两人都选择合作能够达到双方利益最大化, 而两人都选择背叛则双方利益最低, 两人选择不同则选择背叛的一方达到个人利益最大化而选择合作的地方个人损失最大化。

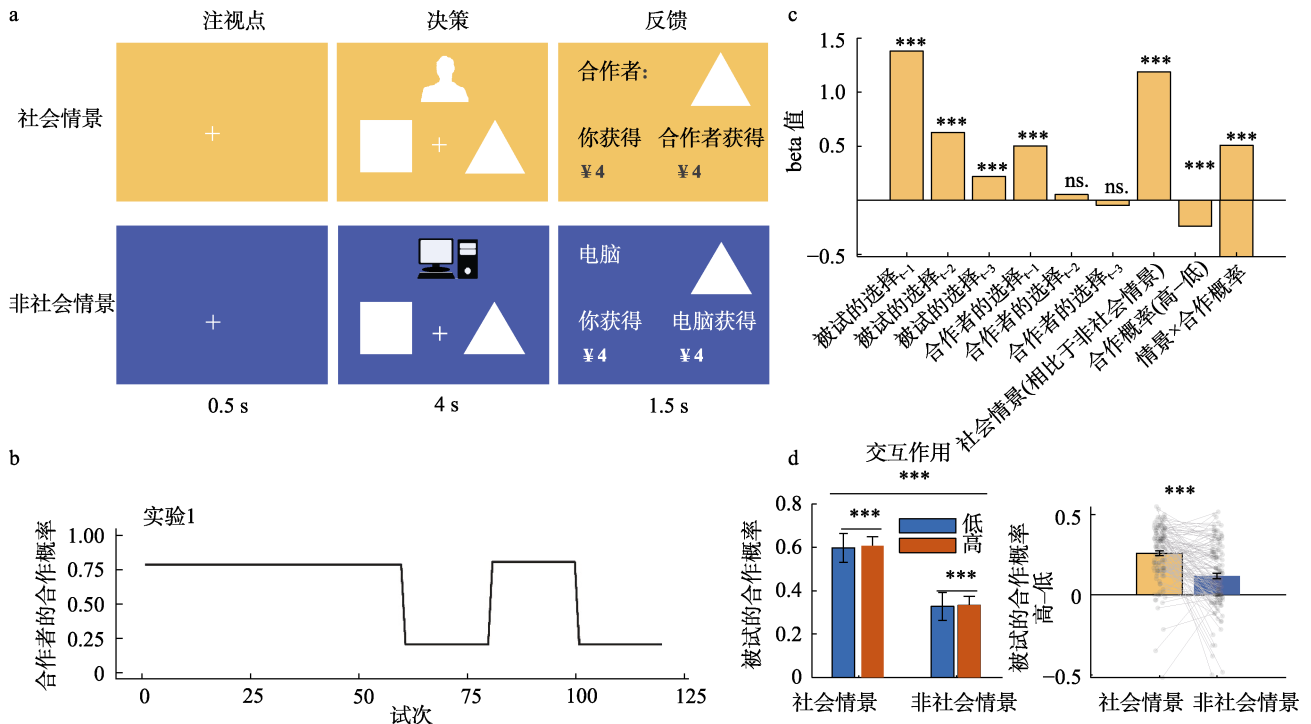


图 1 实验范式与实验 1 行为数据分析结果。a. 单个试次展示。上图和下图分别展示社会和非社会条件下的单个试次展示。b. 实验 1 合作者的合作概率设置。c-d. 实验 1 行为数据分析结果。c. 横坐标为自变量, 纵坐标为各个自变量解释被试行为决策的效应量(beta 值)。d. 左图展示情景×概率的交互作用; 右图展示在社会条件(高概率减去低概率)和非社会条件(高概率减去低概率)中被试合作概率差值。右图的跨过条形图上的每根线条表示每位被试的数据。***表示 $p < 0.001$; ns. 表示统计上未显著, 即 p 值 > 0.05 。

表 1 收益矩阵

		合作者	
		合作	背叛
被试	合作	4, 4	0, 6
	背叛	6, 0	2, 2

试合作而合作者背叛, 被试得 0 代币, 合作者得 6 代币, 反之亦然; 双方均背叛时则各得 2 代币。被试在任务前需通过测验以确认理解任务。被试的报酬部分取决于任务中获得的金币, 在任务结束后随机选取 10% 的试次作为计算报酬依据, 被试在任务前了解这一奖励规则。

2.1.3 实验流程

本研究在行为实验室内进行, 同一时间段会有多人抵达实验室参加实验。被试抵达实验室后, 先填写筛选问卷并阅读指导语。被试在正式实验前进行了 6 轮练习试验以帮助被试熟悉任务。练习试次不涉及实际互动。实验设有社会与非社会条件, 每个条件下均包含高概率与低概率合作两部分, 高低概率各 60 试次。高概率合作保持 78% 的合作概率, 低概率合作以 20 试次为周期, 第一个周期合作概率为 20%, 而后两个周期的合作率分别以 80% 与

20% 为交替(图 1b)。高低合作概率条件的顺序平衡分配。社会条件下, 被试被告知与匿名被试在同一实验室内进行互动, 并用抽签程序增强真实性感知; 在非社会条件下, 被试被告知与他互动的是电脑而非真人。实际上合作者的行为均为电脑程序预设。社会条件与非社会条件的设置参考了先前研究(Sanfeiy et al., 2003)。为消除顺序效应与社会期望偏差, 社会与非社会条件的顺序平衡且实验任务被称为“互动游戏”。实验结束后, 被试被隐晦地询问是否相信在社会条件下与真人进行互动。其中, 84% 被试相信社会条件的真实性。将怀疑真实性的被试数据排除后再次分析发现, 统计结果未受到影响, 故 135 名被试数据均纳入分析。实验程序通过 E-prime 2.0 执行。实验结束后, 被试填写了社会价值取向的问卷(Murphy et al., 2011), 该问卷用于测量个体的亲社会倾向性, 分数越高(低)表示个体越利他(自私)。该指标有助于验证认知计算模型中有关亲社会假设的成分的心理意义。

2.1.4 行为数据分析

我们采用广义线性混合模型 (Generalized Linear Mixed Model, GLMM) 分析影响被试选择(二

分类变量)的变量。自变量包括情景(scenario)、合作概率(cooperation probability)及二者交互作用,情景分为社会(social)与非社会(nonsocial)条件,合作概率区分为高(high probability)与低(low probability)。此外,纳入了被试及合作者在前三次试验的选择(subject's choice t-1, t-2, t-3; partner's choice t-1, t-2, t-3)以探讨先前选择对当前决策的影响。控制变量包括性别(gender)、年龄(age)及条件顺序(order)。模型随机效应涵盖被试截距与自变量斜率。对交互作用的事后分析基于广义线性混合模型的结果。模型中的连续变量在拟合前进行标准化(z-score 转换),报告的 β 值为标准化系数。所有事后比较的 p 值均经过 Bonferroni 多重比较校正。

2.1.5 认知计算模型的构建

本研究结合本文研究问题和相关的经典理论,共构建了 6 个基于不同理论假设的模型(详见补充材料第一部分)。模型 1 作为基线模型,假设被试的合作概率固定。模型 2 (奖励学习模型)认为被试基于奖励反馈调整选择,忽略收益矩阵、预期价值和对手行为。模型 3 (理性决策模型)基于个人收益最大化原则,假设被试倾向于选择背叛以获得更大收益,除非存在决策误差。模型 4 (社会奖赏学习模型)在理性模型基础上引入社会奖赏,假设被试在合作预期下获得额外的社会奖赏。模型 5 (社会奖赏+一阶学习模型)假设被试根据合作者的行为反馈预测下一回合合作概率。模型 6 (社会奖赏+二阶学习模型)在模型 5 的基础上,考虑被试在更新信念时纳入合作者历史行为及其对合作者行为的影响。模型比较结果显示模型 6 优于其他模型(见图 2a 和网络版附表 1),能够很好地预测被试的合作行为(图 2c 和网络版附图 1)。在模型 6,合作与背叛的主观价值计算如下:

$$U_{c(t)} = p_t(4 + \omega) \quad (1)$$

$$U_{d(t)} = 4p_t + 2 \quad (2)$$

其中, $U_c(t)$ 表示在试验 t 中合作的主观价值(utility), $U_d(t)$ 表示在试验 t 中背叛的主观价值。根据表 1,合作和背叛的预期收益分别是 $4p_t$ 和 $4p_t + 2$ 。 ω 在这里代表社会奖赏。社会奖赏越高表示双方合作的情况下能够提升合作的主观价值。在此模型上我们假设被试采用影响模型(Hampton et al., 2008)去更新他们对合作者未来的合作行为的期望,影响模型包含了一阶和二阶信念更新。 p_t 表示被试对合作者在第 t 个回合时的合作概率的预期:

$$p_{t+1} = p_t + \alpha(P_t - p_t) + \kappa(Q_t - q'_t) \quad (3)$$

P_t 表示合作者第 t 个试次中的行为决定,如果合作 $P_t = 1$,如果背叛 $P_t = 0$ 。 $(P_t - p_t)$ 合作者的实际决策与被试对合作者的预期之间的差异,即一阶信念的预期误差。 $\alpha \in [0, 1]$ 是用于更新一阶信念的预期误差的权重,称为一阶学习率。 Q_t 代表被试在第 t 个试次中的行动决定,如果合作 $Q_t = 1$,如果背叛 $Q_t = 0$ 。 $(Q_t - q'_t)$ 表示二阶信念预期误差。 $\kappa \in [0, 1]$ 是更新二阶信念预期误差的学习率。 q'_t 表示被试在第 t 个试次中从合作者的角度推测自己的合作概率。 q'_t 由公式 4 推导所得(详见网络版附加计算建模部分)。 p_1 对于所有被试都设置为 0.5,假定所有人在互动开始之前对合作者没有期望偏差,即合作的概率是 50%。

$$q'_t = \frac{2}{\omega} - \frac{\ln\left(\frac{1}{p_t} - 1\right)}{\beta\omega} \quad (4)$$

我们的模型采用 Softmax 来计算被试的合作概率:

$$q_t = \frac{1}{1 + e^{\beta(U_{d(t)} - U_{c(t)})}} \quad (5)$$

β 表示逆温系数,衡量参与者决策的一致性,较低的 β 值意味着更高的选择变异。合作概率(q'_t)代表参与者在试次 t 的合作倾向。我们利用 MATLAB (R2021a 版本)中的 fmincon 函数估计每位参与者的自由参数,采用极大似然估计方法(Maximum Likelihood Estimation, MLE)拟合行为数据。为避免估计陷入局部最小值,初始参数随机选取,重复估计过程 500 次后选取最优的估算值。模型假定参与者在不同条件下使用不同的参数值,即高概率与低概率条件下的自由参数各不相同。对于每位被试的行为,我们通过以下公式对 L 进行最大化:

$$L = \sum_{t=1}^T -\log(c_1 \dots c_T | \alpha_{low}, \alpha_{high}, \kappa_{low}, \kappa_{high}, \omega_{low}, \omega_{high}, \beta) \quad (6)$$

其中, T 是试验的总数,即 120。 c_t 表示被试的选择。当被试选择合作时, $c_t = q_t$,当被试选择背叛时, $c_t = 1 - q_t$ 。参考前人报告(Wilson & Collins, 2019),所有自由参数的范围均在模型拟合之前,通过模拟和参数恢复分析所确定。其参数恢复的结果请见网络版附图 2。模型中自由参数的统计值请见网络版附表 2。在本模型中,预期(p_t)和社会奖赏(ω)是我们重点关注的变量。模型显示被试在实验过程中动态地更新他们对合作者的预期(网络版附

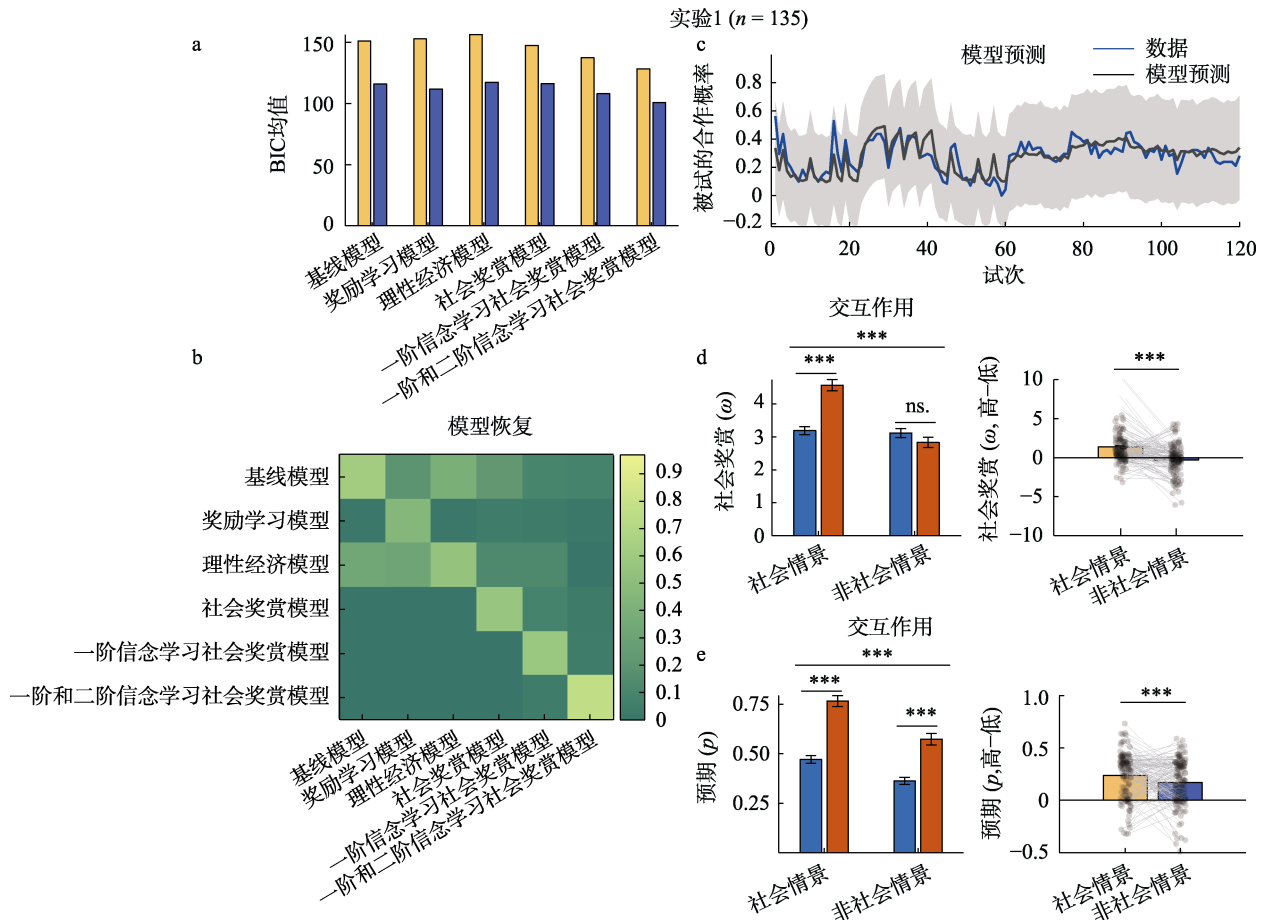


图 2 实验 1 模型比较与模型变量分析结果。a. 模型比较。横坐标为各个模型(详见方法部分), 纵坐标为 Bayesian Information Criterion (BIC)值, 其计算公式为 $BIC = k \cdot \ln(n) - 2 \ln(L)$ 。在社会条件(黄色条形)和非社会条件(蓝色条形), 被试的行为均由模型 6 解释得最好, protected exceedance probability (PEP, Rigoux et al., 2014) 显示模型 6 相比于其他所有模型在群体上可能是最优模型的概率大于 98%。b. 模型恢复(model recovery)。模型 6 所产生的数据由模型 6 最好地解释得概率为 0.79。c. 被试数据与最优模型预测的吻合度。横坐标为试次数, 纵坐标为被试的平均合作概率。蓝色实线表示被试的真实选择, 黑色实线表示最优模型的预测均值, 阴影部分为模型预测的合作率的 95% 的置信区间。这里仅展示单个子条件(非社会条件下合作者的行为从变动到稳定的情况下)的数据, 所有条件的模型预测吻合度比对图请见网络版附图 1。d-e. 从最优模型中得到的社会奖赏(ω , social reward)和预期(p , expectation)的参数值的分析统计结果。***表示 $p < 0.001$ 。

图 3)。在本模型的框架下, 预期或社会奖赏的提高都会影响个体的心里计算机制而提高合作的主观价值计算, 从而提高个体的合作行为(详见网络版附加第一部分的模型预测与验证和附图 4)。

在本研究中, 模型选择依据贝叶斯信息量准则 (BIC) (Schwarz, 1978) 进行, 优先考虑模型的简洁性及对参数数量的严格惩罚, 以 BIC 值较低为拟合优度的指标。此外, 计算保护性超限概率 (PEP) (Rigoux et al., 2014) 以评估各模型在群体水平上成为最优模型的可能性。BIC 和 PEP 的结合使用, 旨在精确选择最适合描述数据的模型, 确保模型选择的科学性和严谨性, PEP 的计算基于 BIC。

2.1.6 最优模型的分析

基于研究假设, 我们重点探讨模型中社会奖赏 (ω) 和预期 (p) 的作用, 故采用线性混合模型 (Linear Mixed Model, LMM) 进行了进一步的统计分析。对于社会奖赏, 线性混合模型考虑的自变量包括情景、合作概率及其交互作用。对于预期, 分析采用了相同的自变量。此外, 为探究被试及其合作者先前选择对当前选择的潜在影响, 我们分析了被试及合作者在前三个试次的选择情况, 这包括被试的前三次选择和合作者的前三次选择。上述两个线性混合模型中, 性别、年龄、条件顺序同样作为控制变量被纳入分析。模型的随机效应部分包括每个被试的截距 (intercept) 和所有自变量的斜率。

2.2 结果

2.2.1 行为数据的分析结果

以被试选择为因变量的 GLMM 表明(网络版附表 3, 图 1c): 情境的主效应显著, 被试在社会条件下比非社会条件下更倾向于选择合作, $\beta = 1.19$, 95% CI = [1.00, 1.37], $p < 0.001$ 。合作概率的主效应显著, 被试在高概率条件下比低概率条件下更倾向于选择合作, $\beta = 0.24$, 95% CI = [-0.36, -0.12], $p < 0.001$ 。合作概率与情境的交互作用显著, $\beta = 0.52$, 95% CI = [-0.64, -0.40], $p < 0.001$ 。事后分析表明在社会条件($t(134) = -16.93$, 95% CI = [-0.28, 0.22], $p_{校正} < 0.001$)和非社会条件($t(134) = -6.94$, 95% CI = [-0.15, -0.09], $p_{校正} < 0.001$)下, 被试在低概率条件的合作行为要显著低于高概率条件(图 1d)。基于此, 将高概率条件减去低概率条件后再进行 t 检验。结果表明(图 1d), 社会条件下被试在高概率条件与低概率条件之间合作倾向的差异显著大于非社会条件($t(134) = 5.63$, 95% CI = [0.09, 0.19], $p_{校正} < 0.001$)。此外, 被试的前一个试次($\beta = 1.38$, 95% CI = [1.31, 1.44], $p < 0.001$)、前第二个试次($\beta = 0.63$, 95% CI = [0.56, 0.69], $p < 0.001$)、前第三个试次($\beta = 0.22$, 95% CI = [0.16, 0.29], $p < 0.001$)的选择均显著提升被试的合作行为。合作者的前一个试次的选择显著提升被试的合作行为($\beta = 0.50$, 95% CI = [0.44, 0.57], $p < 0.001$)。性别($\beta = -0.15$, 95% CI = [-0.31, 0.02], $p = 0.076$)、年龄($\beta = -0.03$, 95% CI = [-0.07, 0.01], $p = 0.128$)、条件顺序($\beta = -0.002$, 95% CI = [-0.16, 0.16], $p = 0.983$)、合作者的前第二个试次($\beta = 0.05$, 95% CI = [-0.01, 0.12], $p = 0.090$)与前第三个试次($\beta = -0.05$, 95% CI = [-0.11, 0.01], $p = 0.136$)对被试的选择影响不显著。

2.2.2 认知模型的分析结果

以社会奖赏为因变量的 LMM 表明(网络版附表 4): 情境的主效应显著, 被试在社会条件下比非社会条件下感知到更多的社会奖赏, $\beta = 1.70$, 95% CI = [1.37, 2.03], $p < 0.001$ 。合作概率的主效应不显著, 被试在高概率与低概率条件下感知到的社会奖赏没有差异, $\beta = 0.28$, 95% CI = [-0.05, 0.62], $p = 0.100$ 。合作概率与情境的交互作用显著, $\beta = -1.67$, 95% CI = [-2.10, -1.24], $p < 0.001$ 。事后分析显示, 在社会条件下, 被试在低概率条件下比高概率条件下感知到更低的社会奖赏, $t(134) = -7.30$, 95% CI = [-1.75, -1.00], $p_{校正} < 0.001$ 。而在非社会条件下, 被试在低概率与高概率条件下感知到的社会奖赏

没有显著差异, $t(134) = 1.77$, 95% CI = [-0.03, 0.61], $p = 0.08$ (图 2d)。基于此, 将高概率条件减去低概率条件下的社会奖赏后再进行 t 检验。结果表明(图 2d), 社会条件下被试在高概率条件与低概率条件之间感知社会奖赏的差异显著大于非社会条件, $t(134) = 6.84$, 95% CI = [1.18, 2.15], $p_{校正} < 0.001$ 。此外, 性别($\beta = -0.28$, 95% CI = [-0.61, 0.04], $p = 0.088$)、年龄($\beta = -0.04$, 95% CI = [-0.11, 0.02], $p = 0.226$)、条件顺序($\beta = 0.06$, 95% CI = [-0.22, 0.35], $p = 0.668$)对被试感知社会奖赏没有影响。皮尔逊相关分析显示在社会条件($r = 0.19$, $p = 0.034$)和非社会条件($r = 0.28$, $p < 0.001$)下, 亲社会人格与与社会奖赏皆为显著正相关(详见网络版附图 5a)。

以预期为因变量的 LMM 表明(网络版附表 5): 情境的主效应显著, 被试在社会条件下比非社会条件下具有更高的预期, $\beta = 0.20$, 95% CI = [0.16, 0.24], $p < 0.001$ 。合作概率的主效应显著, 被试在高概率条件下比低概率具有更高的预期, $\beta = -0.03$, 95% CI = [-0.06, -0.01], $p = 0.015$ 。合作概率与情境的交互作用显著, $\beta = -0.17$, 95% CI = [-0.18, -0.16], $p < 0.001$ 。事后分析表明(图 2e), 在社会条件($t(134) = -12.38$, 95% CI = [-0.23, -0.17], $p_{校正} < 0.001$)与非社会条件($t(134) = -9.30$, 95% CI = [-0.18, -0.12], $p_{校正} < 0.001$)中, 被试在高概率条件下比低概率条件下的期望更高。基于此, 将高概率条件减去低概率条件下的期望后再进行 t 检验。结果表明(图 2e), 社会条件下被试在高概率条件与低概率条件之间社会期望的差异显著大于非社会条件, $t(134) = 2.53$, 95% CI = [0.01, 0.12], $p = 0.013$ 。此外, 被试的前一个试次($\beta = 0.07$, 95% CI = [0.07, 0.08], $p < 0.001$)、前第二个试次($\beta = 0.04$, 95% CI = [0.04, 0.05], $p < 0.001$)、前第三个试次($\beta = 0.03$, 95% CI = [0.02, 0.04], $p < 0.001$)的决策均显著提升被试的预期。合作者的前一个试次($\beta = 0.22$, 95% CI = [0.22, 0.23], $p < 0.001$)、前第二个试次($\beta = 0.06$, 95% CI = [0.05, 0.06], $p < 0.001$)、前第三个试次($\beta = 0.04$, 95% CI = [0.03, 0.04], $p < 0.001$)的决策均显著提升被试的预期。性别($\beta = -0.002$, 95% CI = [-0.05, 0.04], $p = 0.919$)、年龄($\beta = -0.001$, 95% CI = [-0.01, 0.004], $p = 0.619$)、条件顺序($\beta = -0.002$, 95% CI = [-0.02, 0.06], $p = 0.365$)对被试的预期的影响不显著。

2.3 小结

实验 1 结果验证了假设一: 合作者表现高合作

概率时,个体更频繁选择合作,重复了前人的条件合作现象(Fischbacher et al., 2001)。在认知建模方面,初步结果复现了 Fareri 等(2012, 2015)的发现,表明包含社会奖赏的模型比无社会奖赏模型更好地解释被试的行为。此外,模型分析支持假设二,即整合一阶及二阶信念的模型优于仅包含一阶信念的模型。对最优模型 6 的参数分析揭示,个体在高概率合作情境下合作行为的增多可归因于更强的积极期望和社会奖赏感知。这种效应不仅局限于社会条件,非社会条件下也观察到了相似的效应,但情境相关的交互作用表明,在社会条件下这一效应显著强于非社会条件。

我们在实验 1 的低概率条件中设置了合作者的合作概率变动周期以增加被试在实验互动的真实性。为排除合作者的合作概率变动可能带来的混淆,在实验 2 中,我们将合作者的合作概率和合作变动性设置为两个独立的自变量。这有利于我们澄清在实验 1 所观察到的合作者的高概率提升了被试的合作行为这一效应,是否因为合作者的合作变动性的影响。

3 实验 2: 排除合作者行为变动性的影响

3.1 方法

3.1.1 被试

实验 2 的计划样本为至少 82 人,该样本量在实验前基于 G*Power 进行计算的。基于我们所关注的三个自变量之间交互作用:情景 $\times$ 合作概率 $\times$ 变动性(volatility),设定了 F 检验,重复测量-被试间与被试内交互作用,一类错误概率(α)为 0.05、预期效应大小(Cohen's f)为 0.20、95%统计检验力($1 - \beta$)以及重复测量之间的相关性为 0.26 (基于实验 1),从而确定了最小样本大小为 82。招募被试时考虑到可能有会被试中途退出,实际样本为 104 人。所有被试均为北京师范大学在读学生。其中高概率组有 52 人(平均年龄 20.94 ± 2.47 岁,女性 26 人),低概率组有 52 人(平均年龄 20.22 ± 2.22 岁,女性 34 人)。所有被试的视力或矫正视力正常,且无任何精神疾病病史。在正式实验开始前,实验者获得了所有被试的知情同意书。本研究获得了当地研究伦理委员会的批准(批准号: CNL_A_0001_009),并遵守《赫尔辛基宣言》的相关规定。

3.1.2 实验任务与实验流程

在实验 1 的基础上,实验 2 的被试被随机分配

两组(高概率组与低概率组)。每组都要面对两种情境:社会条件与非社会条件。社会条件和非社会条件的设置与实验 1 一致。每个情境中包含两个条件,合作者合作概率的稳定和变动两个组块。每个组块皆有 90 个试次。在高概率组中,合作者的合作概率在稳定组块中恒定为 78%,而在变动组块中的合作概率随时间在 40%与 95%之间上下波动,平均概率为 78%。在低概率组中,合作者的合作概率在稳定组块中恒定为 23%,在变动组块中的合作概率随时间而在 5%与 60%之间上下波动,平均概率为 23% (图 3a)。即在高概率和低概率两组被试中,稳定组块和变动组块的平均概率是相同的。实验 2 的实验指导语和实验流程与实验 1 一致。实验程序采用 E-prime 2.0 实现。

3.1.3 行为数据分析

实验 2 采用 GLMM 分析被试的选择(二分类变量)受到哪些因素影响。模型的自变量包括情景、合作概率、变动性。同时,我们考察情境与合作概率、合作概率与变动性、变动性与情境的两因素交互作用以及情境、合作概率、变动性的三因素交互作用。情境的 2 个水平分别为社会条件和非社会条件,合作概率的 2 个水平分别为高概率条件(high probability)和低概率条件(low probability),变动性的两个水平分别为稳定条件(stable)与变动条件(volatile)。与实验 1 一致,我们还考察了被试先前的三个试次的选择,合作者先前的三个试次的选择可能对被试当前选择的影响,以及将性别、年龄、条件顺序作为控制变量纳入分析。随机效应包括每个被试的截距和各个自变量相应的斜率。与实验 1 一致,模型中的连续变量在拟合之前进行了标准化(z 分数转换),报告的 β 值为标准化系数。所有事后比较的 p 值都经过了 Bonferroni 多重比较校正。

3.1.4 认知建模

模型构建部分与实验 1 一致。实验 2 的结果同样也显示模型 6 相比于其他模型能够更好地拟合被试的行为(模型比较结果请见图 3c 和网络版附表 6,模型预测结果请见网络版附图 6),被试在实验过程中动态地更新他们对合作者的预期(网络版附图 7)。基于实验 2 的设计,因变量为社会奖赏的线性混合模型的自变量包括情景、合作概率、变动性,并探讨了情景与合作概率、合作概率与变动性、变动性与情景的双因素交互作用,以及三者的三因素交互作用。因变量为预期的 LMM 的自变量包括情景、合作概率、变动性,并探讨了情景与合作概率、合

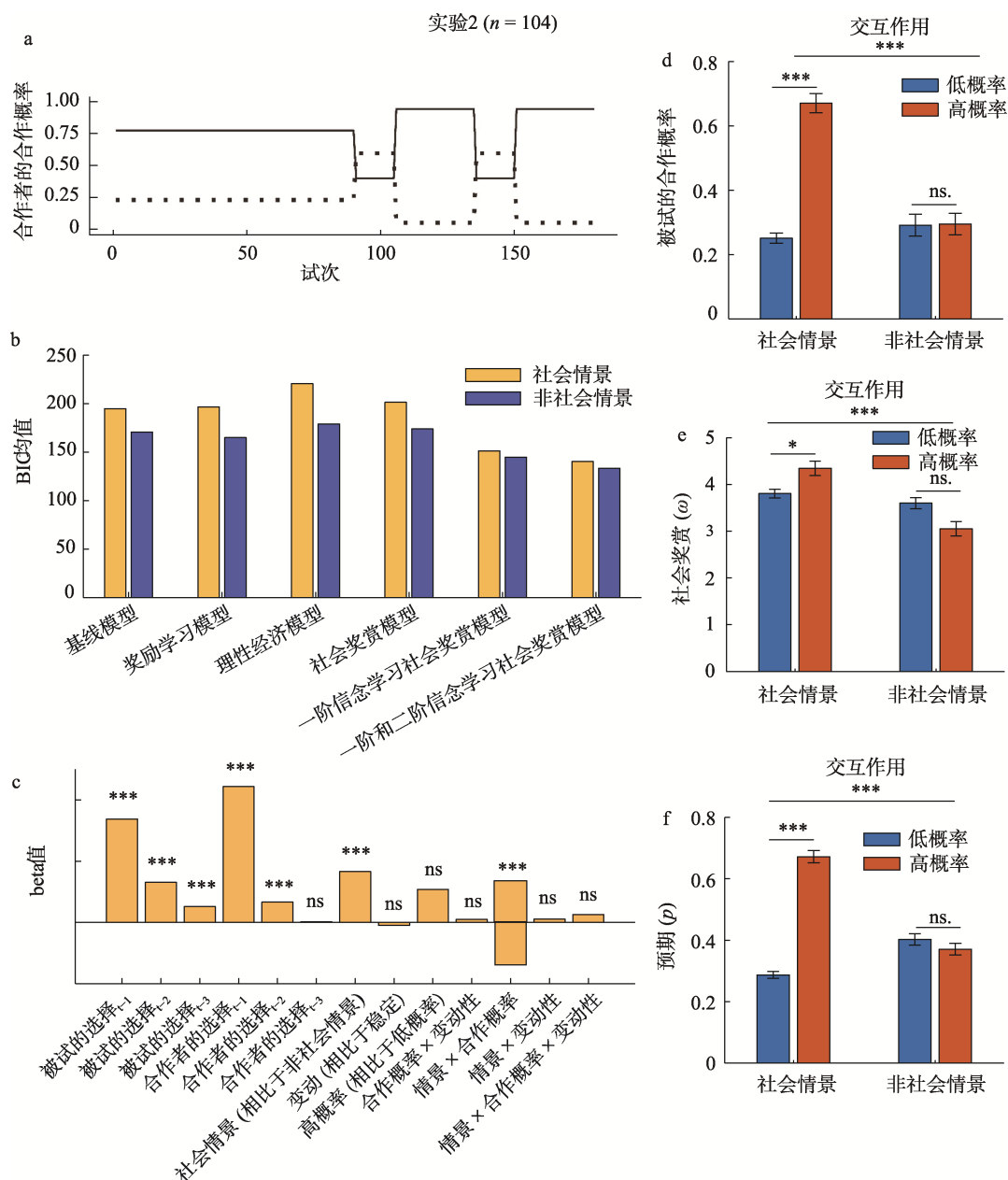


图3 实验2行为数据与模型变量分析结果。a. 实验2合作者的合作概率设置。b. 实验2被试的行为决策分析结果。c. 模型比较。d. 被试合作概率的统计分析结果。e & f 分别展示社会奖赏和预期的统计分析结果。***表示 $p < 0.001$ 。

作概率与变动性、变动性与情景的双因素交互作用, 以及三者的三因素交互作用。此外, 我们还考察了被试先前三个试次的选择, 合作者先前三个试次的选择可能对被试当前选择的影响。在上述两个线性混合模型中, 我们均将性别、年龄、条件顺序作为控制变量纳入分析。随机效应包括每个被试的截距和各个自变量相应的斜率。

3.2 结果

3.2.1 行为数据分析结果

以被试选择为因变量的 GLMM 表明(网络版附表 7, 图 3b): 情境的主效应显著, 被试在社会条件

下比非社会条件下更倾向于选择合作, $\beta = 1.20$, 95% CI = [0.91, 1.50], $p < 0.001$ 。合作概率的主效应显著, 被试在高概率条件下比低概率条件下更倾向于选择合作, $\beta = 0.53$, 95% CI = [0.12, 0.93], $p = 0.011$ 。变动性的主效应不显著, 被试在稳定与变动条件下的选择结果没有差异, $\beta = -0.12$, 95% CI = [-0.28, 0.05], $p = 0.174$ 。合作概率与情境的交互作用显著, $\beta = 0.89$, 95% CI = [-0.130, -0.47], $p < 0.001$ 。事后分析表明, 在社会条件下低概率组的合作行为要显著低于高概率组, $t(51) = -12.80$, 95% CI = [-0.48, -0.35], $p_{校正} < 0.001$ 。而在非社会条件

下, 低概率组和高概率组之间的差异不显著, $t(51) = -0.09$, 95% CI = $[-0.09, 0.08]$, $p = 0.925$ (图 3d)。合作概率与变动性的交互作用不显著, $\beta = 0.16$, 95% CI = $[-0.08, 0.39]$, $p = 0.192$ 。

变动性与情境的交互作用显著, $\beta = 0.22$, 95% CI = $[0.04, 0.39]$, $p = 0.017$ 。事后分析显示在社会条件($t(103) = -1.34$, 95% CI = $[-0.04, 0.01]$, $p_{\text{未校正}} = 0.182$)与非社会条件($t(103) = 0.183$, 95% CI = $[-0.03, 0.03]$, $p_{\text{未校正}} = 0.855$)中, 被试在稳定组块和变动组块的行为均没有显著差异。情境、变动性与合作概率的三因素交互作用不显著, $\beta = -0.17$, 95% CI = $[-0.42, 0.08]$, $p = 0.187$ 。此外, 被试的前一个试次($\beta = 1.69$, 95% CI = $[1.61, 1.76]$, $p < 0.001$)、前第二个试次($\beta = 0.65$, 95% CI = $[0.58, 0.73]$, $p < 0.001$)、前第三个试次($\beta = 0.26$, 95% CI = $[0.19, 0.33]$, $p < 0.001$)的选择均显著提升被试的合作行为。合作者的前一个试次($\beta = 2.22$, 95% CI = $[2.15, 2.29]$, $p < 0.001$)与前第二个试次($\beta = 0.33$, 95% CI = $[0.26, 0.40]$, $p < 0.001$)的选择也显著提升被试的合作行为。被试年龄主效应显著, $\beta = -0.05$, 95% CI = $[-0.09, -0.01]$, $p = 0.010$ 。性别($\beta = -0.12$, 95% CI = $[-0.33, 0.09]$, $p = 0.253$)、条件顺序($\beta = 0.07$, 95% CI = $[-0.14, 0.28]$, $p = 0.498$)、合作者前第三个试次($\beta = 0.01$, 95% CI = $[-0.07, 0.08]$, $p = 0.819$)对被试的行为影响不显著。

3.2.2 认知建模分析结果

以社会奖赏为因变量的 LMM 表明(网络版附表 8): 情境的主效应显著, 被试在社会条件下比非社会条件下感知到更多的社会奖赏, $\beta = 1.20$, 95% CI = $[0.81, 1.59]$, $p < 0.001$ 。合作概率的主效应不显著, 被试在高概率与低概率条件下感知到的社会奖赏没有差异, $\beta = 0.45$, 95% CI = $[-0.02, 0.91]$, $p = 0.058$ 。变动性的主效应不显著, 被试在稳定与变动条件下感知到的社会奖赏没有差异, $\beta = -0.03$, 95% CI = $[-0.39, 0.33]$, $p = 0.884$ 。合作概率与情境的交互作用显著, $\beta = -1.08$, 95% CI = $[-1.62, -0.53]$, $p < 0.001$ 。事后分析显示在社会条件下, 低概率组的社会奖赏要显著小于高概率组, $t(51) = -2.41$, 95% CI = $[-0.99, -0.09]$, $p_{\text{校正}} = 0.038$; 而在非社会条件下, 低概率组和高概率组的社会奖赏没有显著差异($t(51) = 2.22$, 95% CI = $[0.05, 1.05]$, $p_{\text{校正}} = 0.062$)中, 被试在高概率合作中比低概率合作中均感知到更多的社会奖赏(图 3e)。合作概率与变动性的交互作用不显著, $\beta = 0.16$, 95% CI = $[-0.34, 0.67]$, $p =$

0.528。情境与变动性的交互作用不显著, $\beta = 0.11$, 95% CI = $[-0.34, 0.57]$, $p = 0.621$ 。情境、变动性与合作概率的三因素交互作用不显著, $\beta = -0.05$, 95% CI = $[-0.70, 0.59]$, $p = 0.873$ 。个体的亲社会人格与社会奖赏参数显著正相关, 社会条件: $r = 0.24$, $p = 0.013$, 非社会条件: $r = 0.36$, $p < 0.001$, 详见网络版附图 5b)。

以预期为因变量的线性混合模型结果表明(网络版附表 9): 情境的主效应显著, 被试在社会条件下比非社会条件下具有更高的预期, $\beta = 0.16$, 95% CI = $[0.11, 0.20]$, $p < 0.001$ 。合作概率的主效应不显著, 被试在高概率与低概率条件下的预期没有显著差异, $\beta = 0.02$, 95% CI = $[-0.04, 0.07]$, $p = 0.550$ 。变动性的主效应不显著, 被试在变动与稳定条件下的预期没有显著差异, $\beta = -0.02$, 95% CI = $[-0.04, 0.01]$, $p = 0.218$ 。合作概率与情境的交互作用显著, $\beta = -0.16$, 95% CI = $[-0.22, -0.10]$, $p < 0.001$ 。事后分析显示, 社会条件($t(51) = -17.42$, 95% CI = $[-0.44, -0.35]$, $p < 0.001$)下高概率组的预期要显著大于低概率组, 而非社会条件($t(51) = 0.73$, 95% CI = $[-0.05, 0.10]$, $p = 0.467$)高低概率两组人的预期没有显著差异(图 3f)。合作概率与变动性的交互作用不显著, $\beta = -0.002$, 95% CI = $[-0.04, 0.04]$, $p = 0.936$ 。变动性与情境的交互作用不显著, $\beta = 0.01$, 95% CI = $[-0.002, 0.03]$, $p = 0.102$ 。变动性、合作概率与情境的三因素交互作用不显著, $\beta = -0.02$, 95% CI = $[-0.04, 0.003]$, $p = 0.104$ 。此外, 被试的前一个试次($\beta = 0.06$, 95% CI = $[0.05, 0.07]$, $p < 0.001$)、前第二个试次($\beta = 0.03$, 95% CI = $[0.02, 0.04]$, $p < 0.001$)、前第三个试次($\beta = 0.03$, 95% CI = $[0.02, 0.03]$, $p < 0.001$)的选择均显著提高被试的预期。合作者的前一个试次($\beta = 0.34$, 95% CI = $[0.33, 0.34]$, $p < 0.001$)、前第二个试次($\beta = 0.09$, 95% CI = $[0.09, 0.10]$, $p < 0.001$)、前第三个试次($\beta = 0.04$, 95% CI = $[0.04, 0.05]$, $p < 0.001$)的选择均显著提高的预期。

3.3 小结

实验 2 重复了实验 1 观察到的效应, 并排除了合作者行为变动性的影响。结果显示个体合作行为随着合作者合作概率的增加而提高, 不受合作者合作变动性的影响。同时, 我们再次发现包含社会奖赏的模型优于无社会奖赏的模型。此外, 实验 2 再次发现包含一阶和二阶信念的模型优于其他模型。合作者的高合作概率行为提升了被试的积极预期

和社会奖赏,从而促进了被试的合作行为。这些结果证实了合作者的合作概率(而非行为的变动性)是提升合作的关键因素,并阐明了其内在的认知计算机制。

4 讨论

本研究通过两个实验探究了多次合作情境中合作者的高合作概率促进个体合作行为的认知计算机制。模型比较发现,包含社会奖赏假设的模型(模型 4)优于仅考虑金钱收益假设的模型(模型 3),验证了合作的成功能够给人们带来额外的奖赏价值这一说法(Rilling et al., 2002)。此外,包含学习假设的模型(模型 5 和模型 6)优于不包含学习假设的模型(模型 4)。同时比较多个包含学习的模型发现含一阶和二阶信念的模型(模型 6)优于只包含一阶信念的模型(模型 5)。研究结果显示个体的合作行为随着合作者的提升而提升,这由个体对合作者构建的积极期望以及合作本身带来的额外奖赏所共同驱动。

研究结果验证了假设一,即个体的合作行为会受到合作者合作行为的影响。相对于合作者低合作概率的情况,当合作者展现高合作概率时,被试的合作行为显著增加。这一效应在社会条件下并非特异,即使在非社会情境下,高合作者合作概率也能促进被试的合作行为。然而,情景与合作概率的交互作用显示,在社会条件下,这一效应更为显著。实验 2 通过独立操纵合作者的合作概率和变动性,更清晰地揭示了合作者合作概率对条件合作的关键影响。并发现这一效应只有在社会条件下成立。也就是说,与真人互动时,合作者提高合作概率时,被试也相应提高合作概率;反之亦然。这一结果与以往研究的发现一致(Baker & Rachlin, 2001; De Cremer & Van Lange, 2001; Fischbacher et al., 2001; Gächter et al., 2022; Sorgi & van't Wout, 2016),共同表明个体的合作行为是有条件的,只有在他人也表现出愿意合作时,个体才愿意合作。

研究结果验证了假设二,即个体在更新对合作者行为期望时同时考虑了一阶和二阶信念。该结果在社会和非社会条件下均得到确认,并表明个体在选择合作时将自身过去的选择考虑在内。我们推测这可能是因为个体认为先前的合作选择会给对方传递积极信号,从而鼓励对方也选择合作。认知计算模型的结果进一步支持了这一解释。比较不同模型后发现,包含一阶和二阶信念的模型最能准确地

描述被试的行为。在解释最优模型的结果之前,我们的结果也重复了先前研究关于合作过程中个体采用强化学习迭代更新他们对合作者期望的发现(Fareri et al., 2012; Fareri et al., 2015),即包含强化学习迭代函数的模型要比不包含学习假设的模型更好地拟合被试的行为。我们拓展的二阶信念学习模型提供了更深入理解,为解释多次合作过程中的认知过程提供了重要线索。这一研究的贡献之一是构建了更加完善的模型,深入探索了多次合作中的认知计算机制。

研究结果验证了假设三,即合作者的高概率合作所引起的积极期望与社会奖赏共同促进了条件合作。相比于合作者表现出低合作概率的情况下,合作者的高合作概率会提高被试对合作者后续合作行为的预期,我们将其称为积极期望。出于对合作者的积极期待,被试也会更加有可能选择合作从而提高共同合作的可能性。此外,在两个实验中我们均发现包含社会奖赏假设的模型要比不包含社会奖赏假设的模型更好地拟合被试的行为。这表明了合作能够给个体带来除金钱收益外的积极体验,并且这种体验对保持和促进继续互惠非常重要。结果显示相比于合作者表现出低合作概率时,合作者的高合作概率会提升被试的社会奖赏。这种提高的社会奖赏也可以理解为互惠成功带来的激励作用,进而促进个体随后更有可能选择合作。

此外,与以往有关合作的研究结果一致(Rilling et al., 2002),个体在社会情境下的合作概率显著高于非社会情境,表明了个体对与真人进行互利互惠的偏好。人际互动提供了更多的社会认同和情感联系,满足了个体的社会心理需求。认知计算模型的结果显示,个体对与真人互动的偏好受到积极期望和社会奖赏的共同驱动。这表明,个体对合作者是真人的信念会增强对积极期望和社会奖赏的感知,从而促进合作。但是,当合作者表现出低合作概率时,这种效应会减弱,表明人们会以对待机器的方式对待不愿意合作的人。尽管在人机合作中合作概率显著低于人际合作,但个体仍有一定概率选择与机器合作。认知计算模型提供了相应解释,即在非社会情境下,合作仍会获得社会奖赏,促使个体进行合作。这进一步强调了社会奖赏在个体合作中的重要性。然而,并非所有社会互动情境下个体都会同时考虑一阶和二阶信念。某项关于多名被试社交互动的研究发现,此类模型未能更好地解释被试的行为(Park et al., 2019)。这可能是因为被

试未在每轮互动后收到合作者的信息反馈,也未能评估自己的决策如何影响他人。此外,互动次数也可能影响个体更新对方行为的策略。相比之下,本研究通过真实互动和持续的反馈提供了更多的信息,因此包含一阶和二阶信念的模型更能解释被试的行为。

本研究深入探究了高合作概率合作者促进团结合作的认知机制,为了解个体在多次合作情境中的认知和学习过程提供了新的视角。在实践方面,本研究强调了共赢促进合作的重要性,对于社会组织、团队合作和合作性决策的优化具有重要意义。具体来说,本研究为组织管理、团队协作和合作项目的设计提供了指导,有助于更好地理解 and 引导合作行为,从而实现更高效的合作和协同工作。然而,本研究的不足之处在于合作者的行为设置并未根据个体的选择进行调整。未来的研究可以采用更复杂的模型来实时生成合作者的行为,例如考虑一阶和二阶信念的模型,以增强被试和合作者的互动体验,并提高研究的生态效度。

致谢: 感谢黎樱、高露、徐杨晓雪和蒋文元帮忙招募被试与采集实验数据。感谢 Marius Moisa 博士的讨论和启发。

参 考 文 献

- Astington, J. W., & Jenkins, J. M. (1995). Theory of mind development and social understanding. *Cognition and Emotion*, 9(2-3), 151-165. <https://doi.org/10.1080/02699939508409006>
- Bai, L., Yuan, B., Zhang, W., Zhang, Z., Lan, J., & Yiwen, W. (2014). Interpersonal cooperation and conflict influenced outcome evaluation in social decision-making. *Acta Psychologica Sinica*, 46(11), 1760. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2014.01760>
- [白丽英, 袁博, 张蔚, 张振, 兰姣, 王益文. (2014). 人际合作与冲突影响博弈决策的结果评价. *心理学报*, 46(11), 1760-1771. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2014.01760>]
- Baker, F., & Rachlin, H. (2001). Probability of reciprocation in repeated prisoner's dilemma games. *Journal of Behavioral Decision Making*, 14(1), 51-67. [https://doi.org/10.1002/1099-0771\(200101\)14:1<51::AID-BDM365>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/1099-0771(200101)14:1<51::AID-BDM365>3.0.CO;2-K)
- De Cremer, D., & Van Lange, P. A. (2001). Why prosocials exhibit greater cooperation than proselves: The roles of social responsibility and reciprocity. *European Journal of Personality*, 15(S1), S5-S18. <https://doi.org/10.1002/per.418>
- Fang, Z., Zhao, M., Xu, T., Li, Y., Xie, H., Quan, P., Geng, H., & Zhang, R.-Y. (2024). Individuals with anxiety and depression use atypical decision strategies in an uncertain world. *eLife*, 13, RP93887. <https://doi.org/10.7554/eLife.93887.1>
- Fareri, D. S., Chang, L. J., & Delgado, M. R. (2012). Effects of direct social experience on trust decisions and neural reward circuitry. *Frontiers in Neuroscience*, 6, 148. <https://doi.org/10.3389/fnins.2012.00148>
- Fareri, D. S., Chang, L. J., & Delgado, M. R. (2015). Computational substrates of social value in interpersonal collaboration. *Journal of Neuroscience*, 35(21), 8170-8180. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.4775-14.2015>
- Fehr, E., & Fischbacher, U. (2003). The nature of human altruism. *Nature*, 425(6960), 785-791. <https://doi.org/10.1038/nature02043>
- Fehr, E., & Schurtenberger, I. (2018). Normative foundations of human cooperation. *Nature Human Behaviour*, 2(7), 458-468. <https://doi.org/10.1038/s41562-018-0385-5>
- Fischbacher, U., Gächter, S., & Fehr, E. (2001). Are people conditionally cooperative? Evidence from a public goods experiment. *Economics Letters*, 71(3), 397-404. <https://doi.org/10.2139/ssrn.203288>
- Gächter, S. (2007). Conditional cooperation: Behavioral regularities from the lab and the field and their policy implications. In B. S. Frey & A. Stutzer (Eds.), *Economics and psychology: A promising new cross-disciplinary field* (pp. 19-50). MIT Press.
- Gächter, S., Lee, K., & Sefton, M. (2022). *The variability of conditional cooperation in sequential prisoner's dilemmas*. The Centre for Decision Research and Experimental Economics, School of Economics, University of Nottingham.
- Hampton, A. N., Bossaerts, P., & O'Doherty, J. P. (2008). Neural correlates of mentalizing-related computations during strategic interactions in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(18), 6741-6746. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711099105>
- Henco, L., Brandi, M.-L., Lahnakoski, J. M., Diaconescu, A. O., Mathys, C., & Schilbach, L. (2020). Bayesian modelling captures inter-individual differences in social belief computations in the putamen and insula. *Cortex*, 131, 221-236. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.02.024>
- Hill, C. A., Suzuki, S., Polania, R., Moisa, M., O'Doherty, J. P., & Ruff, C. C. (2017). A causal account of the brain network computations underlying strategic social behavior. *Nature Neuroscience*, 20(8), 1142-1149. <https://doi.org/10.1038/nn.4602>
- Kreps, D. M., Milgrom, P., Roberts, J., & Wilson, R. (1982). Rational cooperation in the finitely repeated prisoners' dilemma. *Journal of Economic Theory*, 27(2), 245-252. [https://doi.org/10.1016/0022-0531\(82\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0022-0531(82)90029-1)
- Mukherjee, D., Filipowicz, A. L., Vo, K., Satterthwaite, T. D., & Kable, J. W. (2020). Reward and punishment reversal-learning in major depressive disorder. *Journal of Abnormal Psychology*, 129(8), 810-823. <https://doi.org/10.1037/abn0000641>
- Murphy, R. O., Ackermann, K. A., & Handgraaf, M. (2011). Measuring social value orientation. *Judgment and Decision Making*, 6(8), 771-781. <https://doi.org/10.1017/S193029750-0004204>
- Nowak, M., & Sigmund, K. (1993). A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the Prisoner's Dilemma game. *Nature*, 364(6432), 56-58. <https://doi.org/10.1038/364056a0>
- Pal, S., & Hilbe, C. (2022). Reputation effects drive the joint evolution of cooperation and social rewarding. *Nature Communications*, 13, 5928. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33551-y>
- Park, S. A., Sestito, M., Boorman, E. D., & Dreher, J.-C. (2019). Neural computations underlying strategic social decision-making in groups. *Nature Communications*, 10, 5287. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12937-5>
- Rigoux, L., Stephan, K. E., Friston, K. J., & Daunizeau, J.

- (2014). Bayesian model selection for group studies—revisited. *Neuroimage*, 84, 971–985. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.065>
- Rilling, J. K., Gutman, D. A., Zeh, T. R., Pagnoni, G., Berns, G. S., & Kilts, C. D. (2002). A neural basis for social cooperation. *Neuron*, 35(2), 395–405. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(02\)00755-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(02)00755-9)
- Rusch, T., Steixner-Kumar, S., Doshi, P., Spezio, M., & Gläscher, J. (2020). Theory of mind and decision science: Towards a typology of tasks and computational models. *Neuropsychologia*, 146, 107488. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107488>
- Sanfey, A. G., Rilling, J. K., Aronson, J. A., Nystrom, L. E., & Cohen, J. D. (2003). The neural basis of economic decision-making in the ultimatum game. *Science*, 300(5626), 1755–1758. <https://doi.org/10.1126/science.1082976>
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics*, 6(2), 461–464.
- Sorgi, K. M., & van't Wout, M. (2016). The influence of cooperation and defection on social decision making in depression: A study of the iterated Prisoner's Dilemma Game. *Psychiatry Research*, 246, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2016.10.025>
- Stallen, M., Smidts, A., & Sanfey, A. G. (2013). Peer influence: neural mechanisms underlying in-group conformity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 50. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00050>
- Tamir, D. I., & Hughes, B. L. (2018). Social rewards: from basic social building blocks to complex social behavior. *Perspectives on Psychological Science*, 13(6), 700–717. <https://doi.org/10.1177/1745691618776263>
- Tang, H., Li, X., Wei, Y., Li, X., Chen, L., & Zhang, Y. (2022). The impact of partner choice on cooperative behavior and its mechanisms. *Advances in Psychological Science*, 30(10), 2356. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2022.02356>
- [唐辉, 李鑫宇, 魏一帆, 李晓彩, 陈柳燕, 张曜. (2022). 伙伴选择对合作行为的影响作用与机制. *心理科学进展*, 30(10), 2356–2371. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2022.02356>]
- van Baar, J. M., Chang, L. J., & Sanfey, A. G. (2019). The computational and neural substrates of moral strategies in social decision-making. *Nature Communications*, 10, 1483. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09161-6>
- Wilson, R., & Collins, A. (2019). Ten simple rules for the computational modeling of behavioral data. *eLife*, 8, e49547. <https://doi.org/10.7554/eLife.49547>
- Wu, H., Liu, X., Hagan, C. C., & Mobbs, D. (2020). Mentalizing during social InterAction: A four component model. *Cortex*, 126, 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.12.031>

A cognitive computational mechanism for mutual cooperation: The roles of positive expectation and social reward

WU Xiaoyan¹, FU Hongyu¹, ZHANG Tengfei¹, BAO Dongqi², HU Jie³,
ZHU Ruida⁴, FENG Chunliang⁵, GU Ruolei^{6,7}, LIU Chao¹

(¹State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(²Zurich Center for Neuroeconomics, Department of Economics, University of Zurich, Zurich, 8006, Switzerland)

(³Shanghai Key Laboratory of Mental Health and Psychological Crisis Intervention, School of Psychology and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

(⁴Department of Psychology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

(⁵School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

(⁶CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Beijing 100101, China)

(⁷Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

People usually exhibit conditional cooperative behavior during cooperation; that is, they cooperate only when they expect others will cooperate as well. The cognitive computations and the dynamic processes underlying such conditional cooperation in repeated interactions remain underexplored. To this end, this study investigates the cognitive mechanisms behind conditional cooperation, focusing on two hidden mental variables: positive expectation (participants' expected cooperation willingness of the partner) and the perception of social reward (additional reward derived from reciprocity).

Using a repeated aversion of Prisoner's Dilemma Game (PDG), we conducted two experiments ($n = 134$ in Experiment 1 and $n = 104$ in Experiment 2) in this study. Nonsocial context (playing PDG with a computer program) was created to test if the effects are specific to social context (playing PDG with a supposed human partner). By manipulating partners' cooperation probabilities and response variability, we explored how positive expectation and social reward evolve during cooperation and to affect participants' behavioral outputs. We systematically developed six models to model participants' decision process during PDG. These models range

from baseline model with random choice assumption (Model 1) to more complex formulations incorporating reward-based learning (Model 2), rational choice theory (Model 3), social reward (Model 4), and the integration of different learning rules (Models 5 to 6).

The results of two experiments consistently demonstrated that participants dynamically adjust their cooperation decisions in response to their partners' behaviors. After separating the effects that may be brought by the partner's cooperation probability from those of response volatility, we found that participants' cooperation increases with their partner's increased cooperative behaviors, rather than with the partner's response volatility, an effect specific to social context. Model comparisons showed that participants' behaviors in both social and nonsocial contexts were best described by a model assuming social rewards and incorporating a learning algorithm that includes both first-order beliefs (based solely on others' past behavior) and second-order beliefs (considering both others' past behavior and the influence of their own behavior on others) to update their expectations of their partners' cooperation. The results indicated that increasing conditional cooperation is driven by both participants' positive expectation and social reward, effects that were specific to a social context.

This study elucidated the cognitive computational dynamics of conditional cooperation, highlighted the roles of positive expectation and social reward, and showed that people applied a complex model with both first-order and second-order beliefs to update their expectations of their partner's willingness to cooperate. These contributions underscore the importance of understanding the mental processes that encourage mutual cooperation. Future studies might explore the neural correlates of these mechanisms or apply these insights to more complex scenarios, bridging the gap between laboratory research findings and real-world collaboration.

Keywords conditional cooperation, social reward, positive expectation, cognitive computational modeling, belief update

补充材料

第一部分: 补充方法

模型比较

模型 1: 基线模型。该模型假设被试在任务中作出的合作选择是一个固定的概率。对于每个被试, 通过以下函数计算对数似然:

$$L = \sum_{i=1}^n \log(p) \quad (1)$$

这里的 p 是一个自由参数, 表示被试的合作率, 可以在不同受试者之间有所不同。

模型 2: 奖励学习模型。该模型假设人们通过收益奖励来强化他们当前的行为。被试分别比较选择合作和背叛两个选择的预期值, 期望值会在每个试次通过奖励反馈进行更新:

$$V_{c,t+1} = V_{c,t} + \alpha(R_t - V_{c,t}) \quad (2)$$

$$V_{d,t+1} = V_{d,t} + \alpha(R_t - V_{d,t}) \quad (3)$$

其中 $V_{c,t}$ 和 $V_{d,t}$ 分别表示在时刻 t 时合作和背叛的期望值。我们将初始期望值设置为收益矩阵(见正文表 1)的均值, 即 3。决策由以下方式建模:

$$q = \frac{1}{1 + e^{\beta(V_d - V_c)}} \quad (4)$$

其中 q 是选择合作的概率。 β 是一个反温度参数, β 的值越低, 选择越分散和变化($\beta \in [0, 10]$)。对于每个被试, 通过最大化以下函数来计算对数似然:

$$L = \sum_{i=1}^n \log(\theta) \quad (5)$$

其中 θ 表示自由参数, t 表示当前试验, n 是总试验次数。

模型 3: 理性经济模型。该模型假设被试的选择获得的经济收益。效用函数定义如下:

$$U_{c,t} = 4p_t \quad (6)$$

$$U_{d,t} = 4p_t + 2 \quad (7)$$

其中 U_c 表示合作的效用, U_d 表示背叛的效用。 p 表示合作的期望概率, 固定为 0.5。因此, U_d 总是比 U_c 有更多的货币奖励。

被试的选择由 Softmax 函数建模:

$$q_t = \frac{1}{1 + e^{\beta(U_{d(t)} - U_{c(t)})}} \quad (8)$$

在这里, q 表示选择合作的概率。通过计算方程(5)来最大化对数似然以估计参数。

模型 4: 社会奖赏模型。社会奖励模型假设被试对合作的重视程度不仅取决于合作所带来的金钱奖励, 还取决于来自互惠性的社会奖赏。我们预测人们可能会因为与合作者的积极互惠而获得社会奖赏, 由参数 ω 表示:

$$U_{c,t} = p_t(4 + \omega) \quad (9)$$

$$U_{d,t} = 4p_t + 2 \quad (10)$$

其中 ω 代表社会奖赏。 p 是合作者的预期合作概率, 固定为试验中的 0.5, 假设被试不会更新对合作者选择的信念。

模型 5: 带有一阶信念学习的社会奖赏模型。先前的研究发现人们在社会互动中基于预测误差以强化学习的方式更新他们的信念(2, 3)。该模型假设人们通过基本的强化学习规则来更新他们对合作者行动的期望:

$$p_{t+1} = p_t + \alpha(P_t - p_t) \quad (11)$$

其中 p 表示合作者的合作概率的期望。 P_t 是合作者在 t 时刻的行动。 $P_t = 1$ 表示合作, $P_t = 0$ 表示背叛。 α 代表一阶信念更新的学习率($\alpha \in [0, 1]$)。 $(P_t - p_t)$ 是试验间的预测误差, 即合作者的合作行为与被试对合作者的期望之间的差异。被试的选择由方程(8)建模。使用方程(5)对每个受试者在 120 次试验中进行 MLE 估计。

模型 6: 带有一阶和二阶信念学习的社会奖赏模型。该模型在模型 5 的基础上, 假设被试对合作者的合作概率的预期更新过程不仅受到合作者自身行为反馈的影响, 同时也考虑自身的决策对对手的预期产生影响, 从而影响对手的合作概率。其更新公式如下:

$$p_{t+1} = p_t + \alpha(P_t - p_t) + \kappa(Q_t - q'_t) \quad (12)$$

P_t 表示合作者第 t 个试次中的行为决定, 如果合作 $P_t = 1$, 如果背叛 $P_t = 0$ 。 $(P_t - p_t)$ 表示合作者的实际决策与被试对合作者的预期之间的差异, 即一阶信念的预期误差。 $\alpha \in [0, 1]$ 是用于更新一阶信念的预期误差的权重, 称为一阶学习率。 Q_t 代表被试在第 t 个试次中的行动决定, 如果合作 $Q_t = 1$, 如果背叛 $Q_t = 0$ 。 $(Q_t - q'_t)$ 表示二阶信念预期误差。 $\kappa \in [0, 1]$ 是更新二阶信念预期误差的学习率。 q'_t 表示被试在第 t 个试次中从合作者的角度推测自己的合作概率。即被试试图从合作者的视角去推测他们关于我的合作概率的推测。社会决策研究通常将其称之为“二阶信念”(Hill et al., 2017)。其形式由被试的合作概率方程(8)推导所得:

首先, 将 U_d 和 U_c 代入公式后得到:

$$q_t = \frac{1}{1 + e^{\beta(4p_t + 2 - p_t(4 + \omega))}} \quad (13)$$

根据这一公式, 我们得到 p_t 关于 q_t 的关系式:

$$p_t = \frac{2\beta - \ln\left(\frac{1 - q_t}{q_t}\right)}{\beta\omega} \quad (14)$$

由此, 我们假定对手也应用同样的模型, 即相同的主观价值函数, 那么该公式也适用于对手用来推测被试自己的合作概率。由此我们得到:

$$q'_i = \frac{2}{\omega} - \frac{\ln\left(\frac{1}{p_i} - 1\right)}{\beta\omega} \quad (15)$$

我们分别对社会和非社会情景下的被试行为进行了拟合。在相同情景下,我们针对不同实验条件拟合了自由参数,假设被试在不同条件下采用不同参数进行认知计算和决策。实验 1 中,我们分别在高合作概率和低合作概率条件下拟合了自由参数。实验 2 中,同样分别对社会和非社会情景下的行为进行了拟合,并在同一情景下的变动和稳定条件下拟合了自由参数。逆温系数在同一情景的所有条件下保持不变,代表个体对价值差异的敏感性或决策随机程度。我们认为在相同情景的不同子条件下,这些参数不应发生剧烈变化。另外,我们发现,在不同实验条件下使用相同参数值的模型与分别拟合自由参数的模型相比,表现更佳。

模型恢复

模型恢复分析旨在评估最优模型与其他候选模型在区分能力和预测准确性方面的表现。分析包括以下步骤:首先,利用各模型参数生成模拟数据。然后,所有模型在生成的模拟数据上进行拟合,竞争解释数据能力。采用 BIC 评估每个模型的拟合优度,并验证其是否能准确识别出“真实”模型。该过程重复 100 次,将每次提供最佳解释的模型标记为 1,否则为 0。通过计算标记为 1 的次数占总次数的比例,得出模型恢复的概率。分析结果显示,模型 6 在提供最佳解释方面表现优异,其概率为 0.79 (见图 2b)。

参数恢复

我们进行了参数恢复分析,以评估模型 6 的过度拟合情况和参数的可靠性(见附图 2)。该分析旨在评估认知模型参数估计的准确性和可靠性。我们首先基于被试的行为数据拟合模型,将得到的参数视为真值。然后,利用这些真值预测被试行为,在模型和实验设计条件下生成虚拟数据。重新拟合虚拟数据后,通过计算真值与恢复值的相关系数来评估参数恢复效果。高相关性表明所用模型和参数估计方法能可靠地反映被试的认知过程,确保模型预测的准确性。结果显示,所有参数真值与恢复值的皮尔逊相关系数均超过 0.7,证明模型能有效区分参数,无冗余或过度拟合。

模型预测与验证

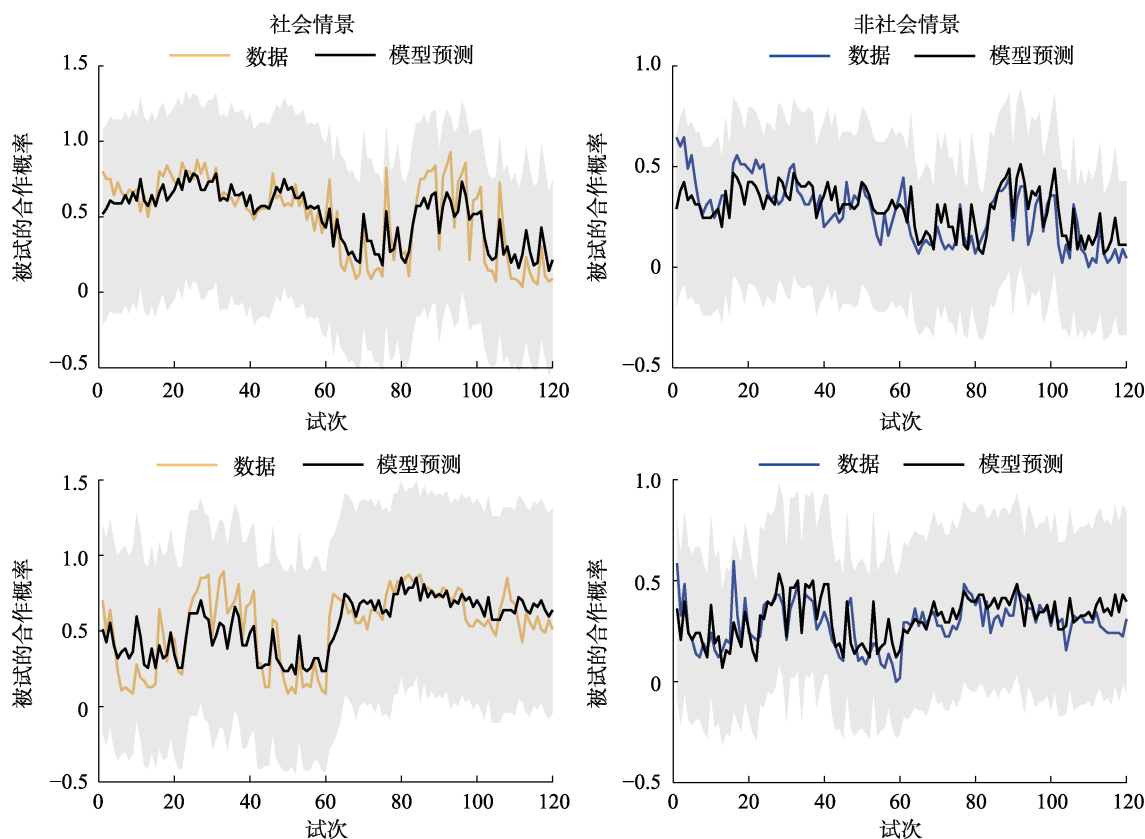
为检验预期和社会奖赏对被试合作行为的影响,我

们进行了模拟分析。首先,我们创建了一位虚拟被试,其自由参数值来自实验 1 所有被试的均值。在预期模拟分析中,我们将被试的预期(p_i)分别设为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0,并观察其与合作概率的影响。结果显示,随着预期的增加,被试的合作概率相应提高(附图 4a)。在社会奖赏模拟分析中,我们将被试的预期保持为全程 0.5,其他参数值与实验 1 所有被试的均值相同,然后通过改变社会奖赏参数(ω)从 0 至 10,以 2 为步长观察其与合作概率的影响。结果显示,随着社会奖赏的增加,合作概率也相应提高(附图 4b)。

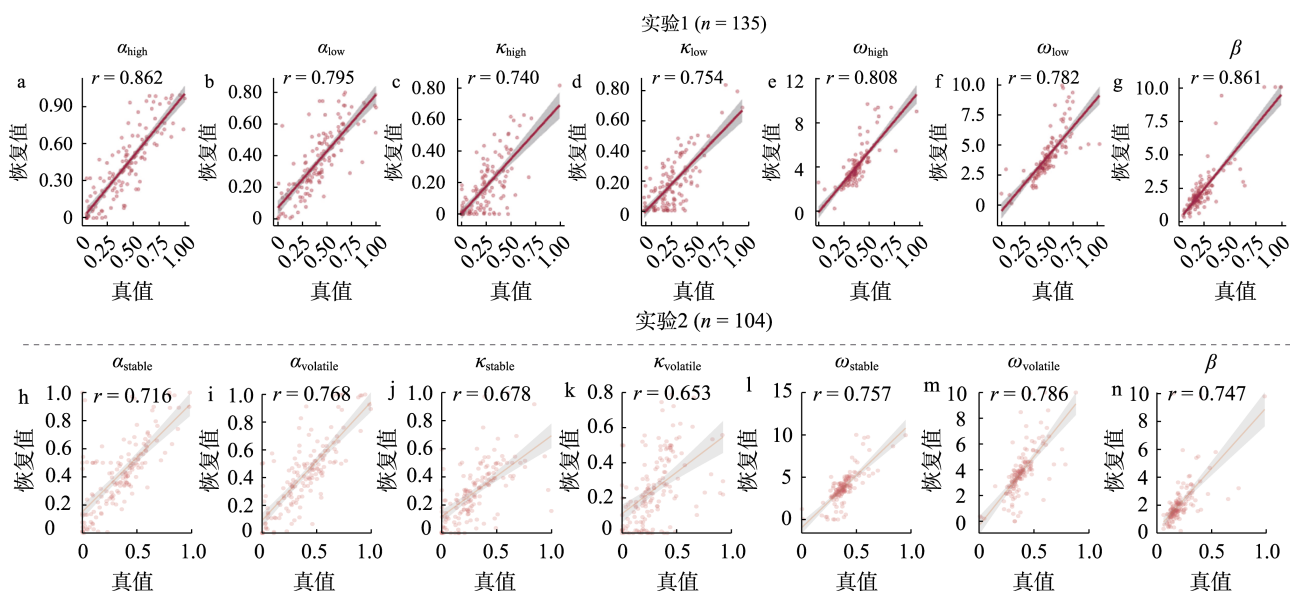
为评估模型 6 是否能准确捕捉被试行为,我们将模型预测数据与实际行为数据进行了对比(见附图 1 和附图 6),并执行了统计分析。具体操作中,我们在实验 1(见附表 3)与实验 2(见附表 7)的广义线性混合模型的基础上,加入了另一个自变量“prediction”。此变量为二分类变量,预测行为标记为 1,实际行为标记为 0。通过该模型中 prediction 变量的效应分析,我们可以评估预测行为与实际行为间的潜在偏差。实验 1 的结果显示,“prediction”变量的主效应($\beta = -0.03$, 95% CI = [-0.14, 0.07], $p = 0.536$)以及所有交互效应均不显著(cooperation probability×prediction: $\beta = 0.06$, 95% CI = [-0.07, 0.20], $p = 0.378$; scenario×prediction: $\beta = -0.05$, 95% CI = [-0.18, 0.08], $p = 0.487$; cooperation probability×scenario×prediction: $\beta = 0.01$, 95% CI = [-0.17, 0.20], $p = 0.875$)。

实验 2 的结果显示,“prediction”变量的主效应($\beta = 0.06$, 95% CI = [-0.06, 1.18], $p = 0.322$)以及所有交互效应均不显著(prediction × probability: $\beta = 0.05$, 95% CI = [-0.12, 0.22], $p = 0.546$; volatility×prediction: $\beta = -0.07$, 95% CI = [-0.22, 0.07], $p = 0.321$; probability×volatility×prediction: $\beta = 0.02$, 95% CI = [-0.19, 0.22], $p = 0.994$; probability×scenario×prediction: $\beta = 0.06$, 95% CI = [-0.14, 0.27], $p = 0.551$; volatility×scenario×prediction: $\beta = 0.03$, 95% CI = [-0.17, 0.24], $p = 0.748$; probability×volatility×scenario×prediction: $\beta = -0.02$, 95% CI = [-0.31, 0.26], $p = 0.887$),这包括 prediction×scenario 交互项的效应也不显著($\beta = -0.06$, 95% CI = [-0.20, 0.08], $p = 0.418$)。这些结果显示,认知计算模型所预测的合作行为与我们实际观测到的合作行为在统计学上没有差异,表明我们的模型预测很好地预测了被试的决策。

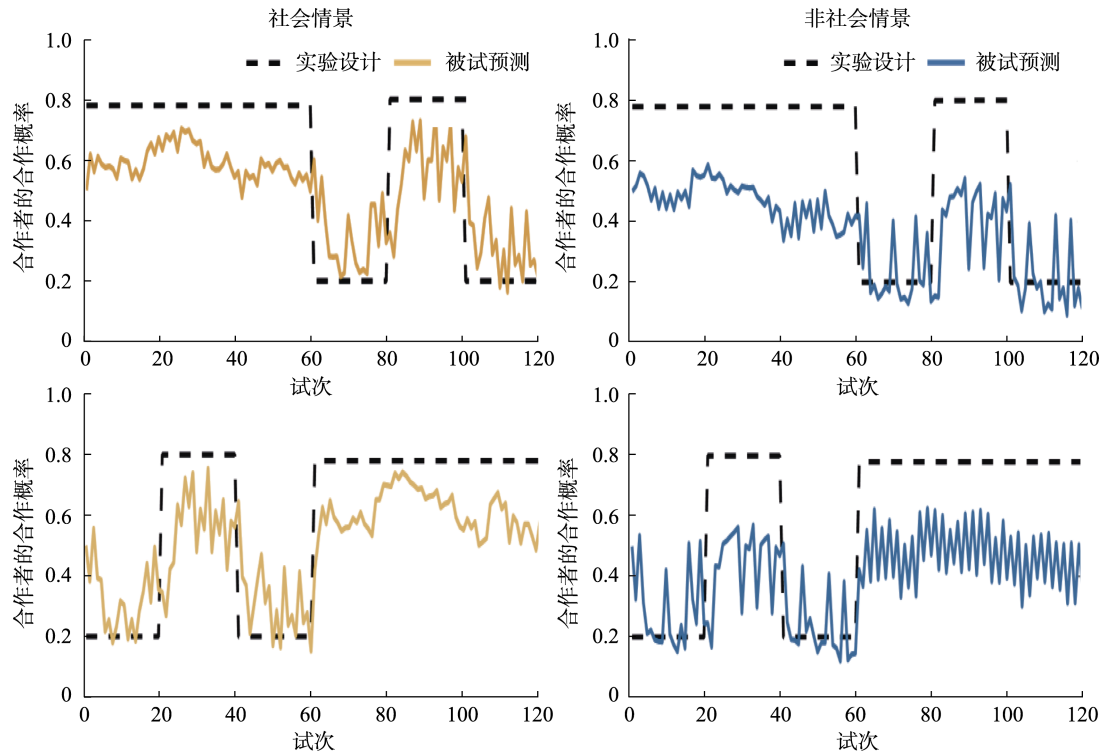
第二部分: 附加图片



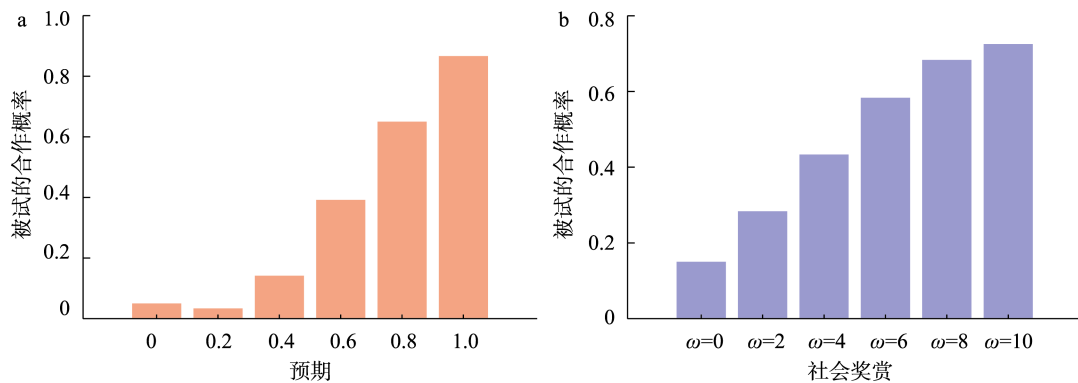
附图1 实验1模型预测。左侧图片展示了社会条件下被试的合作概率(黄色实线)和最优模型预测合作概率(黑色实线)。右侧图片展示非社会条件下被试的合作概率(蓝色实线)和最优模型的预测合作概率(黑色实线)。阴影部分展示模型预测的合作概率的95%的置信区间。横坐标为试次数,纵坐标为 p (cooperation)表示所有被试的平均合作概率。上图和下图分别表示不同的顺序,上图为伙伴的合作概率从高概率到低概率而下图为伙伴的合作概率从低概率到高概率。



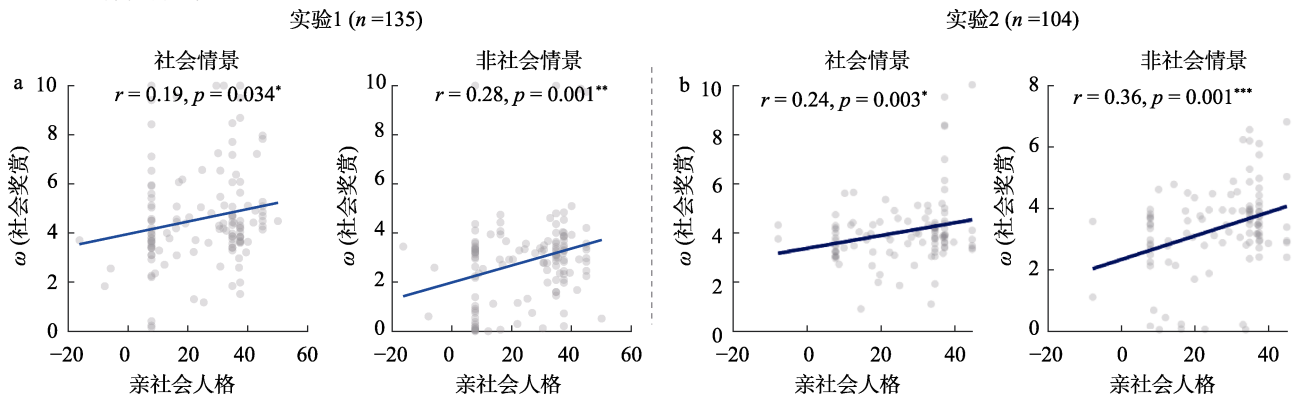
附图2 参数恢复(parameter recovery)。a-g为实验1的参数恢复,h-n为实验2的参数恢复。图中每个点代表每个被试,线条为线性拟合,阴影部分为95%的置信区间。 r 值为皮尔逊相关系数。



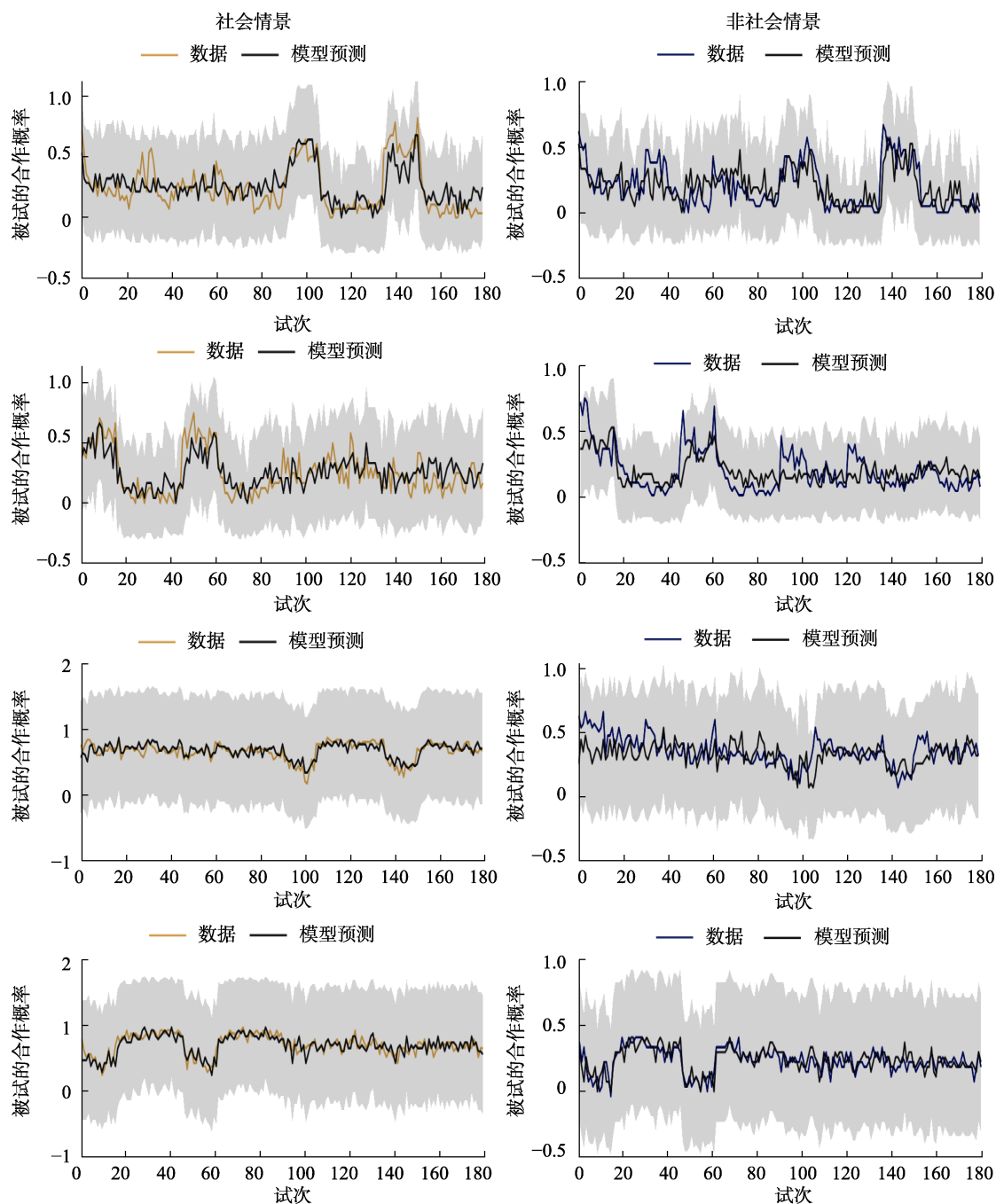
附图 3 实验 1 被试对合作者的合作概率的动态期望。左图右图分别展示在社会条件(黄色实线)和非社会条件(蓝色实线)下, 被试对合作者的合作概率的动态期望变化。黑色虚线表示合作者的真实合作概率。上下图片表示不同的顺序, 分别是合作者的行为从高概率转为低概率, 以及从低概率转为高概率。



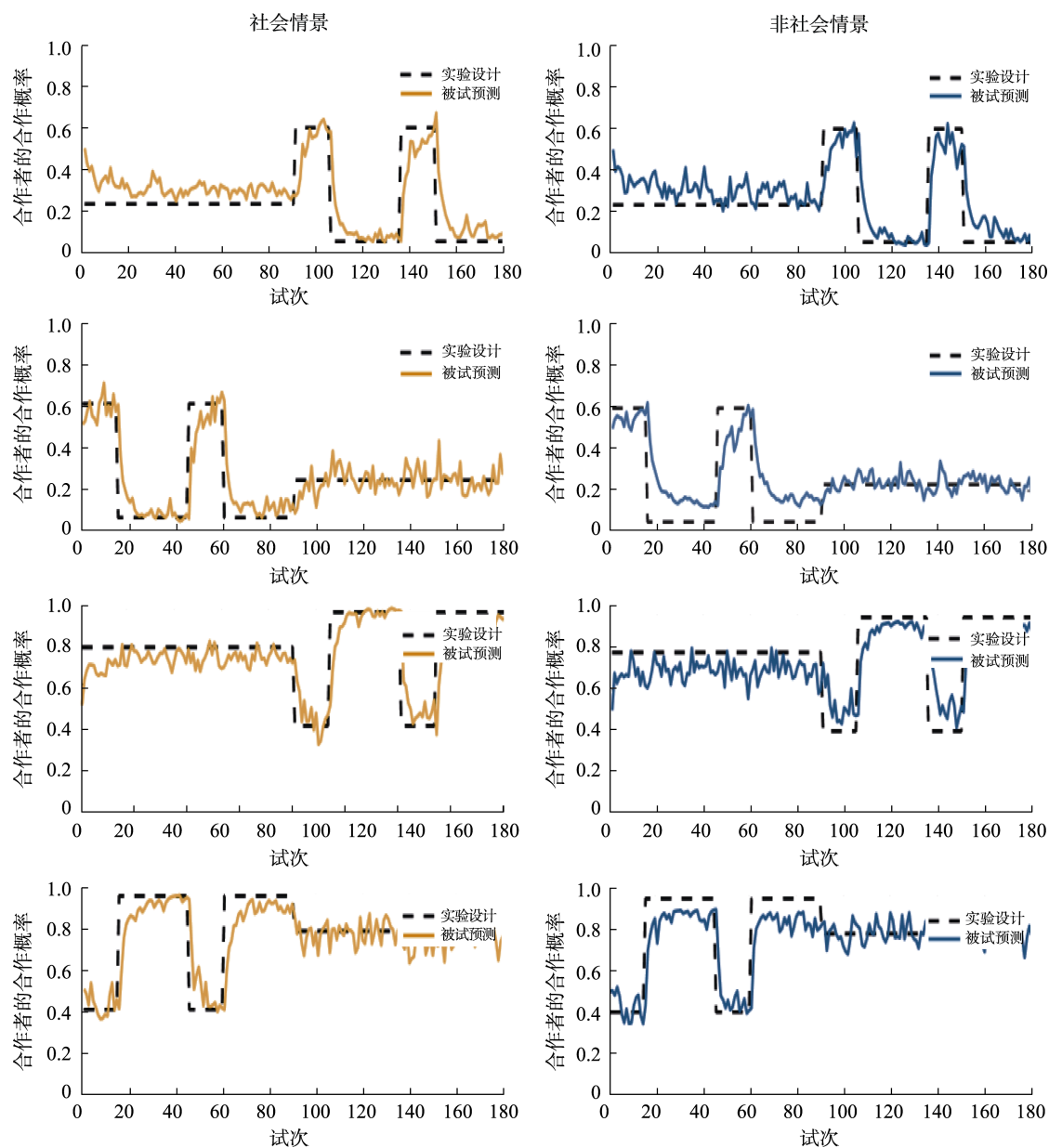
附图 4 模拟分析。图 a 展示预期从低(左)倒高(右)的变化对个体合作行为的提升。图 b 展示社会奖赏从小(左)到大(右)对个体合作行为的提升。



附图 5 实验 1 的社会奖赏与亲社会人格相关性分析。横轴代表个体在社会价值取向问卷上的得分, 得分较低表示个体更加自利, 不太考虑他人利益, 而得分较高则表明个体更加利他。纵轴显示了优选模型中的社会奖赏参数值, 左图(右图)展示的是在社会(非社会)条件下个体的社会奖赏参数值。通过皮尔逊相关分析探究了二者之间的关系。图中, 每个灰色点代表一名被试在这两个维度上的数据, 蓝色线表示二者之间的线性关系拟合。



附图 6 实验 2 被试对合作者的合作概率的动态期望。左侧图片展示了社会条件下被试的合作概率(黄色实线)和最优模型预测合作概率(黑色实线)。右侧图片展示非社会条件下被试的合作概率(蓝色实线)和最优模型的预测合作概率(黑色实线)。阴影部分展示模型预测的合作概率的 95% 的置信区间。横坐标为试次数, 纵坐标为 p (cooperation) 表示所有被试的平均合作概率。上图和下图分别表示不同子条件, 第一行和第二行的图片为伙伴的合作行为为低概率(low probability), 第三行和第四行的图片为伙伴的合作行为为高概率(high probability)。第 1 行和第 3 行为先稳定再变动(stable-volatile), 而第 2 行和第 4 行为伙伴的合作概率先变动再稳定(volatile-stable)。



附图 7 实验 2 被试对合作者的合作概率的期望的动态更新过程。左右图分别展示在社会条件(黄色实线)和非社会条件(蓝色实线)下被试对合作者的合作概率的动态期望变化。黑色虚线表示合作者的真实合作概率。社会条件和非社会条件纵向的四张图片分别代表不同的实验子条件, 从上至下分别为低概率-先稳定再变动、低概率-先稳定再变动、高概率-先稳定再变动、高概率-先变动再稳定。

第三部分: 附加表格

附表 1: 实验 1 的模型比较

Model	Task	Number of parameters	Mean BIC	PEP
Model 1	Social	1	151.19	0.00%
Model 2	Social	2	152.85	0.00%
Model 3	Social	1	156.37	0.00%
Model 4	Social	3	147.46	0.00%
Model 5	Social	5	137.59	0.00%
Model 6	Social	7	128.32	100.00%
Model 1	Non-social	1	115.94	0.00%
Model 2	Non-social	2	111.72	0.07%
Model 3	Non-social	1	117.38	0.00%
Model 4	Non-social	3	116.21	0.00%
Model 5	Non-social	5	108.00	0.00%
Model 6	Non-social	7	100.83	93.00%

附表 2: 最优模型的自由参数

		scenario	parameter	Mean $\pm$ SD
Experiment 1	social		α_{high}	0.23 ± 0.27 (95% CI = 0.18, 0.27)
			α_{low}	0.26 ± 0.24 (95% CI = 0.22, 0.30)
			κ_{high}	0.33 ± 0.28 (95% CI = 0.28, 0.38)
			κ_{low}	0.37 ± 0.21 (95% CI = 0.34, 0.41)
			ω_{high}	4.57 ± 1.97 (95% CI = 4.24, 4.90)
			ω_{low}	3.19 ± 1.38 (95% CI = 2.96, 3.42)
	nonsocial		β	1.93 ± 2.05 (95% CI = 1.59, 2.28)
			α_{high}	0.32 ± 0.25 (95% CI = 0.28, 0.36)
			α_{low}	0.31 ± 0.22 (95% CI = 0.28, 0.35)
			κ_{high}	0.34 ± 0.25 (95% CI = 0.30, 0.38)
			κ_{low}	0.30 ± 0.22 (95% CI = 0.27, 0.34)
			ω_{high}	2.83 ± 1.80 (95% CI = 2.53, 3.13)
			ω_{low}	3.12 ± 1.57 (95% CI = 2.85, 3.38)
			β	3.03 ± 2.69 (95% CI = 2.58, 3.49)
Experiment 2	High probability group	social	α_{stable}	0.43 ± 0.27 (95% CI = 0.35, 0.50)
			$\alpha_{volatile}$	0.43 ± 0.25 (95% CI = 0.37, 0.50)
			κ_{stable}	0.24 ± 0.21 (95% CI = 0.18, 0.30)
			$\kappa_{volatile}$	0.28 ± 0.23 (95% CI = 0.22, 0.34)
			ω_{stable}	4.32 ± 1.65 (95% CI = 3.87, 4.76)
			$\omega_{volatile}$	4.38 ± 1.48 (95% CI = 3.98, 4.78)
		nonsocial	β	2.33 ± 2.05 (95% CI = 1.77, 2.89)
			α_{stable}	0.35 ± 0.25 (95% CI = 0.29, 0.42)
			$\alpha_{volatile}$	0.35 ± 0.25 (95% CI = 0.28, 0.42)
			κ_{stable}	0.29 ± 0.22 (95% CI = 0.23, 0.35)
			$\kappa_{volatile}$	0.28 ± 0.21 (95% CI = 0.23, 0.34)
			ω_{stable}	3.55 ± 1.33 (95% CI = 3.19, 3.91)
	Low probability group	social	$\omega_{volatile}$	3.72 ± 1.39 (95% CI = 3.34, 4.09)
			β	2.32 ± 1.00 (95% CI = 2.04, 2.59)
			α_{stable}	0.37 ± 0.25 (95% CI = 0.30, 0.44)
			$\alpha_{volatile}$	0.40 ± 0.19 (95% CI = 0.34, 0.45)
			κ_{stable}	0.30 ± 0.22 (95% CI = 0.24, 0.36)
			$\kappa_{volatile}$	0.27 ± 0.19 (95% CI = 0.22, 0.32)
		nonsocial	ω_{stable}	3.70 ± 0.94 (95% CI = 3.44, 3.95)
			$\omega_{volatile}$	3.92 ± 0.93 (95% CI = 3.67, 4.17)
			β	1.93 ± 0.89 (95% CI = 1.69, 2.18)
			α_{stable}	0.30 ± 0.22 (95% CI = 0.24, 0.36)
			$\alpha_{volatile}$	0.33 ± 0.23 (95% CI = 0.27, 0.39)
			κ_{stable}	0.33 ± 0.24 (95% CI = 0.26, 0.39)
			$\kappa_{volatile}$	0.30 ± 0.19 (95% CI = 0.24, 0.35)
			ω_{stable}	3.05 ± 1.42 (95% CI = 2.66, 3.43)
			$\omega_{volatile}$	2.99 ± 1.46 (95% CI = 2.59, 3.39)
			β	2.41 ± 1.89 (95% CI = 1.90, 2.92)

附表 3: 实验 1 中以被试选择为因变量的广义线性混合模型效应

Fixed effects	Estimated beta value	SE	t value	P value
(Intercept)	-1.43	0.43	-3.32	$p < 0.001$
cooperation probability	-0.24	0.06	-3.83	$p < 0.001$
order	0.002	0.08	0.02	$p = 0.983$
subject's choice t-1	1.38	0.03	43.04	$p < 0.001$
subject's choice t-2	0.63	0.03	18.60	$p < 0.001$
subject's choice t-3	0.22	0.03	6.62	$p < 0.001$
partner's choice t-1	0.50	0.03	15.64	$p < 0.001$
partner's choice t-2	0.05	0.03	1.69	$p = 0.090$
partner's choice t-3	-0.05	0.03	-1.49	$p = 0.136$
scenario	1.19	0.09	12.68	$p < 0.001$
gender	-0.15	0.08	-1.78	$p = 0.076$
age	-0.03	0.02	-1.52	$p = 0.128$
cooperation probability $\times$ scenario	-0.52	0.06	-8.20	$p < 0.001$

附表 4: 实验 1 中以社会奖赏为因变量的线性混合模型效应

Fixed effects	Estimated beta value	SE	t value	P value
(Intercept)	3.91	0.76	5.11	$p < 0.001$
cooperation probability	0.28	0.17	1.65	$p = 0.100$
order	0.06	0.14	0.43	$p = 0.668$
scenario	1.70	0.17	10.13	$p < 0.001$
gender	-0.28	0.17	-1.71	$p = 0.088$
age	-0.04	0.04	-1.21	$p = 0.226$
cooperation probability $\times$ scenario	-1.67	0.22	-7.68	$p < 0.001$

附表 5: 实验 1 中以期望为因变量的线性混合模型效应

Fixed effects	Estimated beta value	SE	t value	P value
(Intercept)	0.18	0.08	2.24	$p = 0.025$
cooperation probability	-0.03	0.01	-2.43	$p = 0.015$
order	0.02	0.02	0.91	$p = 0.365$
subject's choice t-1	0.07	0.003	22.03	$p < 0.001$
subject's choice t-2	0.04	0.004	12.16	$p < 0.001$
subject's choice t-3	0.03	0.003	9.11	$p < 0.001$
partner's choice t-1	0.22	0.003	77.03	$p < 0.001$
partner's choice t-2	0.06	0.003	20.13	$p < 0.001$
partner's choice t-3	0.04	0.003	12.54	$p < 0.001$
scenario	0.20	0.02	10.86	$p < 0.001$
gender	-0.002	0.02	-0.10	$p = 0.919$
age	-0.001	0.003	-0.50	$p = 0.619$
cooperation probability $\times$ scenario	-0.17	0.01	-30.63	$p < 0.001$

附表 6: 实验 2 的模型比较

Model	Task	Number of parameters	Mean BIC	PEP
Model 1	Social	1	194.80	0.00%
Model 2	Social	2	196.59	0.00%
Model 3	Social	1	220.54	0.00%
Model 4	Social	3	151.31	0.00%
Model 5	Social	5	201.36	0.02%
Model 6	Social	7	140.21	98.00%
Model 1	Non-social	1	170.76	0.00%
Model 2	Non-social	2	164.91	0.00%
Model 3	Non-social	1	179.03	0.00%
Model 4	Non-social	3	173.86	0.00%
Model 5	Non-social	5	144.67	0.00%
Model 6	Non-social	7	133.30	100.00%

附表 7: 实验 2 中以被试选择为因变量的广义线性混合模型效应

Fixed effects	Estimated beta value	SE	t value	P value
(Intercept)	-2.58	0.48	-5.37	$p < 0.001$
cooperation probability	0.53	0.21	2.53	$p = 0.011$
volatility	-0.12	0.08	-1.36	$p = 0.174$
order	0.07	0.11	0.68	$p = 0.498$
subject's choice t-1	1.69	0.04	44.06	$p < 0.001$
subject's choice t-2	0.65	0.04	16.19	$p < 0.001$
subject's choice t-3	0.26	0.04	6.98	$p < 0.001$
partner's choice t-1	2.22	0.04	60.64	$p < 0.001$
partner's choice t-2	0.33	0.04	8.90	$p < 0.001$
partner's choice t-3	0.01	0.04	0.23	$p = 0.819$
scenario	1.20	0.15	8.07	$p < 0.001$
gender	-0.12	0.11	-1.14	$p = 0.253$
age	-0.05	0.02	-2.59	$p = 0.010$
cooperation probability×volatility	0.16	0.12	1.31	$p = 0.192$
cooperation probability×scenario	0.89	0.21	-4.21	$p < 0.001$
volatility×scenario	0.22	0.09	2.39	$p = 0.017$
cooperation probability×volatility×scenario	-0.17	0.13	-1.32	$p = 0.187$

附表 8: 实验 2 中以社会奖赏为因变量的线性混合模型效应

Fixed effects	Estimated beta value	SE	t value	P value
(Intercept)	4.62	0.75	6.14	$p < 0.001$
cooperation probability	0.45	0.24	1.90	$p = 0.058$
volatility	-0.03	0.18	-0.15	$p = 0.884$
order	-0.19	0.15	-1.30	$p = 0.193$
scenario	1.20	0.20	6.10	$p < 0.001$
gender	-0.38	0.16	-2.39	$p = 0.017$
age	-0.06	0.03	-1.82	$p = 0.069$
cooperation probability×volatility	0.16	0.26	0.63	$p = 0.528$
cooperation probability×scenario	-1.08	0.28	-3.90	$p < 0.001$
volatility×scenario	0.11	0.23	0.50	$p = 0.621$
cooperation probability×volatility×scenario	-0.05	0.33	-0.16	$p = 0.873$

附表 9: 实验 2 中以期望为因变量的线性混合模型效应

Fixed effects	Estimated beta value	SE	t value	P value
(Intercept)	0.11	0.06	1.92	$p = 0.055$
cooperation probability	0.02	0.03	0.60	$p = 0.550$
volatility	-0.02	0.01	-1.23	$p = 0.218$
order	-0.004	0.01	-0.43	$p = 0.667$
subject's choice t-1	0.06	0.004	15.90	$p < 0.001$
subject's choice t-2	0.03	0.004	7.62	$p < 0.001$
subject's choice t-3	0.03	0.003	8.15	$p < 0.001$
partner's choice t-1	0.34	0.003	112.40	$p < 0.001$
partner's choice t-2	0.09	0.003	28.67	$p < 0.001$
partner's choice t-3	0.04	0.003	13.85	$p < 0.001$
scenario	0.16	0.02	7.11	$p < 0.001$
gender	0.01	0.02	0.32	$p = 0.747$
age	0.001	0.002	0.30	$p = 0.762$
cooperation probability×volatility	-0.002	0.02	-0.08	$p = 0.936$
cooperation probability×scenario	-0.16	0.03	-5.25	$p < 0.001$
volatility×scenario	0.01	0.01	1.63	$p = 0.102$
cooperation probability×volatility×scenario	-0.02	0.01	-1.62	$p = 0.104$

参 考 文 献

Hill, C. A., Suzuki, S., Polania, R., Moisa, M., O'Doherty, J. P., & Ruff, C. C. (2017). A causal account of the brain network computations underlying strategic social behavior. *Nature Neuroscience*, 20(8), 1142–1149. <https://doi.org/10.1038/nn.4602>