

《心理科学》审稿意见修改说明

第一轮修改

感谢审稿专家和编辑团队付出的时间与精力，以及为本文提出的深刻洞见。我们认真阅读了每一条评论，并据此对文稿进行了全面的修改与完善（正文中蓝色字体为修改内容）。这些建设性意见极大地提升了本研究的严谨性与表述的清晰度，我们对此深表感激。以下是对每条评论的详细回复以及具体修改内容。

对审稿专家一意见的回应

研究采用“努力-门”任务范式与 ERP 技术，探讨努力类型和强度对奖赏加工预期和体验阶段习惯化的影响。选题新颖，有一定的科学意义。但文章引言梳理和结果表述还不够清晰，行文语言不够流畅，长句较多。具体问题如下：

回应，

非常感谢审稿专家对我们研究的细致审阅与宝贵意见。我们认真阅读并思考了您提出的问题，并在下面逐条作出回应。

审稿专家一，意见 1，

摘要结论前后矛盾：“两类努力均增强奖赏期待，但不影响其习惯化过程；亲自我努力可减缓奖赏体验的习惯化，亲社会努力则无明显影响，两类努力对奖赏加工动态的影响存在着分离效应。”

回应 1，

衷心感谢审稿专家关于摘要结论的细致意见。诚如专家所言，原摘要结论的表述可能造成歧义，尤其是“不影响其习惯化过程”这一分句若未明确限定为“期待阶段”，容易与后文关于体验阶段的结论形成矛盾。实际上，本研究发现的“分离效应”是阶段特异性的：在奖赏期待阶段，两类努力均增强期待，且均未影响奖赏期待的习惯化；而在奖赏体验阶段，亲自我努力减缓了习惯化，但亲社会努力无显著影响。为使逻辑更清晰，我们已重新表述摘要结论，将两个阶段的结果分开叙述。修改后的结论部分如下：

“结果表明，亲自我与亲社会努力对奖赏加工的影响具有阶段特异性。具体而言，在

期待阶段，两类努力均能增强个体的奖赏期待水平，但对该阶段的习惯化进程均无显著影响。而在体验阶段，两类努力的作用出现分离：亲自我努力能够显著减缓奖赏体验的习惯化，而亲社会努力则未表现出类似效应。”

审稿专家一，意见 2，

引言逻辑不够清晰。“亲社会努力”和“亲自我努力”的区别在开头提到，但后续引入努力理论时，多数是围绕亲自我努力展开，再转回亲社会努力，比较跳跃。

回应 2，

非常感谢审稿专家关于引言部分逻辑的宝贵意见。在重新审读文章后，我们发现初稿的引言部分在逻辑上确实不够顺畅，未能形成一条清晰连贯的论述主线。根据您的意见，我们对引言部分进行了重构，修改后的核心思路如下(具体内容见修改稿正文第 1-3 页)：

- (1) 首先介绍努力的一般概念和作用。然后明确点出，现有关于努力的理论和绝大多数实证研究，都是在“亲自我努力”的背景下建立和发展的。这为读者建立了一个理解的“基准线”。
- (2) 紧接着，切入主题，指出：努力不仅涵盖亲自我努力，还包括使他人受益的亲社会努力。然后，我们直接引用关于亲社会努力的少量研究，将这些发现与上一步建立的“亲自我努力”基准进行对比。例如，明确指出“与亲自我努力提升价值不同，亲社会努力会降低奖赏价值”，并紧接着讨论现有理论(如努力合理化)在解释这种差异时面临的困境。
- (3) 之后，进一步指出以往研究的局限：奖赏加工本身是随着时间演变的动态过程，然而以往研究未从时间动态的角度审视亲自我与亲社会努力对奖赏加工的影响。
- (4) 最后，基于上述对比和阐述，引出当前研究的必要性。

希望目前的逻辑能够让读者读起来更加流畅。再次感谢您的宝贵意见，这极大地帮助我们提升了论文引言部分的写作质量！

审稿专家一，意见 3，

部分句子不够连贯，改正欧式语法。例如“尽管控制期望价值理论未直接涉及努力付出后的奖赏价值评估，但其成本-收益分析的核心思想，可能有助于理解这种现象。”

回应 3，

衷心感谢审稿专家的细致审阅和指正。原文中确实存在一些受英文写作习惯影响而显

得生硬、不够连贯的句子。我们为初稿在语言表达上的不足表示歉意。根据您的意见，我们已对全文进行了系统性检查与修改，使行文更符合中文表达习惯。以您指出的这个句子为例，我们已将其修改为更符合中文表达习惯的句式：

“控制期望价值理论虽未直接涉及努力付出后的奖赏价值评估，但该理论的成本-收益分析思路，为理解上述现象提供了启示。”

审稿专家一，意见 4，

“依赖状态评估模型”只能解释努力的效应，和本文联系不紧密。

回应 4，

非常感谢审稿专家提出的宝贵意见。在重新审读文章后，我们完全同意您的看法，在引言部分引入“状态依赖评估模型”来解释努力效应，确实与本文后续围绕“控制期望价值理论”和“习惯化”展开的核心论述主线联系不够直接和紧密。该模型虽然能部分解释努力带来的价值变化，但如您所指出的，它并非本文理论框架的核心。根据您的建议，我们在修改稿中删除了关于“状态依赖评估模型”的论述。

审稿专家一，意见 5，

cue-P3 波幅与努力成本的关系描述不清楚。cue-P3 波幅和努力成本有关还是期待？明确这个指标代表什么？

回应 5，

感谢审稿专家指出我们对 cue-P3 功能解释的不够清晰。根据以往研究，在“努力-门”任务或类似的范式中，线索呈现后出现的 cue-P3 成分，被广泛认为反映了对奖赏相关线索的动机性和预期性注意，其波幅大小与个体对即将到来的奖赏的期待或动机显著性成正相关(i.e., Bowyer et al., 2021; Pfabigan et al., 2014; Wang et al., 2024; Zheng et al., 2024)。也就是说，一个线索提示的奖赏价值越高或个体获取该奖赏的动机越强，其诱发的 cue-P3 波幅就越大。

在本研究中，cue-P3 是奖赏期待的指标，而努力水平是作为一种前置变量来影响奖赏期待的。高努力条件意味着个体为获得奖赏付出了更高的成本。根据“成本-收益”平衡原则，个体在付出高成本后，会倾向于对相应的回报产生更强的期待，以期平衡先前的投入。因此，我们观察到的高努力条件下 cue-P3 波幅的增强，反应的是更高努力付出增强了个体随后的奖赏期待，而非直接反映了努力成本本身。更高的努力成本是原因，而增强的奖赏

期待(表现为更大的 cue-P3)是结果。

为了避免潜在的歧义，我们在修改稿中做了如下调整：

(1) 在“2.5 节 脑电数据采集和分析”部分对 cue-P3 的心理含义进行了更明确的说明：

“对于 cue-P3 成分，我们提取每个试次下九个电极点在 300–500 ms 时间窗内的平均值进行计算 (Pfabigan et al., 2014)。该成分被普遍认为是奖赏期待阶段的神经指标，其波幅大小反映了对奖赏相关线索的动机性注意和预期强度(Bowyer et al., 2021; Wang et al., 2024; Zheng et al., 2024)。在本任务中，它主要表征个体在付出努力后对奖赏产生的期待程度。”(第 6 页, 第 1 段)

(2) 在讨论的“4.1 亲自我与亲社会努力对奖赏期待阶段习惯化的影响”开头部分，我们再次强调了上述内容：“作为奖赏相关注意和预期的指标(Wang et al., 2024; Zheng et al., 2024)，高努力条件下 cue-P3 的增强反映了个体在付出更多努力后对奖赏更强的关注和期待。”(第 11 页, 3-4 行)

参考文献：

- Bowyer, C., Brush, C. J., Threadgill, H., Harmon-Jones, E., Treadway, M., Patrick, C. J., & Hajcak, G. (2021). The effort-doors task: Examining the temporal dynamics of effort-based reward processing using ERPs. *NeuroImage*, 228, 117656.
- Pfabigan, D. M., Seidel, E.-M., Sladky, R., Hahn, A., Paul, K., Grahl, A., Küblböck, M., Kraus, C., Hummer, A., Kranz, G. S., Windischberger, C., Lanzenberger, R., & Lamm, C. (2014). P300 amplitude variation is related to ventral striatum BOLD response during gain and loss anticipation: An EEG and fMRI experiment. *NeuroImage*, 96, 12–21.
- Wang, J., Li, R., Tang, S., & Li, H. (2024). Differentiating anticipatory and consummatory reward processing in problematic pornography use: An event-related potential analysis of reward dynamics. *Computers in Human Behavior*, 158, 108277.
- Zheng, Y., Zhang, M., & Wu, M. (2024). Effort discounts reward-based control allocation: A neurodynamic perspective. *Psychophysiology*, 61(2), e14451.

审稿专家一，意见 6，

P5 line2 错别字“注释十字”

回应 6，

感谢审稿专家细致的审阅。我们已在修改稿中将所有“注释十字”一词更正为“注视十字”。

审稿专家一，意见 7，

方法部分，按照实验流程的时间顺序来描述实验。

回应 7，

感谢审稿专家提出的宝贵建议。我们为原文中信息顺序的混乱表示歉意，并已根据您的意见对“实验程序”部分进行了重构。修改后的文本大致如下：

“实验采用‘努力-门’任务(Bowyer et al., 2021)范式考察努力对奖赏期待和体验习惯化的影响。在正式实验前，被试从三个慈善项目(‘罕见病医疗援助工程’、‘铁血老兵公益基金会’和‘幸福列车从心出发’)中选择一个捐赠意愿最高的项目作为捐赠对象。实验包含亲自我努力和亲社会努力两个部分。在每一部分开始前会在屏幕上明确告知被试该部分的受益者是自己还是其所选慈善项目。两部分的顺序在被试间进行平衡。正式实验中单个试次的具体流程如图 1 所示：首先，屏幕中央会呈现一个注视十字，时长为 1000 ms。接着，伴随按键次数要求的锁形图标出现，被试需用左手(非优势手)小指按“h”键，完成要求的按键次数后，锁形图标变为开锁状态，该锁形图标持续呈现 1000 ms。之后，屏幕中央再次呈现 1000 ms 的注视十字。紧接着屏幕上呈现两个相同的黄色门，被试从中选择一个，被选中的门周围将出现红色框，门的呈现时间为 1000 ms。门消失后，屏幕中央呈现 1000 ms 的注视十字，随后屏幕中央呈现绿色向上或者红色向下箭头，时长为 1000 ms。绿色向上的箭头表示被试获得 1 元，而红色向下的箭头表示被试损失 0.5 元。之所以将奖赏的数额设置为损失的两倍，是考虑到损失带来的主观感受大约是收益的两倍(Tversky & Kahneman, 1992)，以及确保被试在整个实验过程中能挣到钱。整个实验一共 160 个试次，亲自我与亲社会两个部分各包含 80 个试次。在每一部分中，高、低努力条件各 40 个试次，呈现顺序随机。努力水平通过按键次数操控。为保证操纵的一致性，所有被试在高努力条件下的按键次数均从均值为 30、标准差为 2 的正态分布中随机抽取(范围：24-36 次)，在低努力条件下的按键次数均从均值为 6、标准差为 2 的正态分布中随机抽取(范围：1-12 次)(见图 1)。为了避免概率的影响，各条件下赢钱和输钱概率设置为 50%。每完成 20 个试次后，被试可以短暂休息。”(第 5 页, 第 1 段)

审稿专家一，意见 8，

P4, 样本量计算中 L1,L2 分别指什么?

回应 8,

感谢审稿专家指出这一表述不够清晰的地方。在本研究中, 我们采用多层线性模型 (Multilevel Linear Model, MLM) 分析数据, 该模型包含两个层级: L1 (水平 1) 指的是试次水平。因此, “L1 样本量为 20” 是指我们预设每个实验条件下, 每名被试平均贡献约 20 个有效试次用于分析。这个数字是基于任务设计和数据清理后的预期。L2 (水平 2) 指的是被试水平。因此, “L2 样本量为 40” 是指我们在功效分析中估算的需要招募的被试数量。

我们在修改稿中 “2.1 被试” 部分对样本量估算的描述进行了修改。修改后的文本大致如下:

“采用蒙特卡洛模拟的 SIMR 包 (Arend & Schäfer, 2019), 组内相关系数 (ICC) 设置为 0.5, 显著性水平 α 为 0.05, 水平 1 (试次水平) 样本量预设为 20 (即每名被试在每个条件下的有效试次数), 水平 2 (被试水平) 样本量估算为 40, 此时跨层交互效应 (CLI) 的 power 值为 0.75。” (第 4 页, 第 2 段)

审稿专家一, 意见 9,

高努力和低努力次数是范围内完全随机? 如何保证每个被试接受的操纵一致。

回应 9,

感谢审稿专家提出这个关于实验操纵的重要问题。在本研究中, 为了确保所有被试都经历相同强度的努力操纵, 我们严格遵循了 Bowyer 等人 (2021) 的方法。对于每一位被试, **高努力条件** 所需的按键次数全部从一个 **固定的正态分布 ($M = 30, SD = 2$)** 中随机抽取。因此, 所有被试在高努力条件下经历的按键次数都基于同一个 “高强度” 分布。类似的, **低努力条件** 所需的按键次数全部从一个 **固定的正态分布 ($M = 6, SD = 2$)** 中随机抽取。因此, 所有被试在低努力条件下经历的按键次数都基于同一个 “低强度” 分布。这意味着, 虽然每个试次的具体按键次数是随机选择的, 但所有被试所面对的高、低努力水平的总体强度和分布范围是完全一致和标准化的。这种方法既保证了实验操纵的一致性, 又通过试次间的随机变化避免了被试形成固定的反应模式, 是此类研究中的标准做法。

我们已在修改稿的 “2.4 实验程序” 部分, 对努力水平的操纵方式进行了更详细的说明, 以避免读者产生与您类似的疑问。修改后的文本大致如下:

“努力水平通过按键次数操控。为保证操纵的一致性, 所有被试在高努力条件下的按键次数均从均值为 30、标准差为 2 的正态分布中随机抽取 (范围: 24-36 次), 在低努力条件下的

按键次数均从均值为 6、标准差为 2 的正态分布中随机抽取(范围：1-12 次)。”(第 5 页, 9-11 行)

参考文献:

Bowyer, C., Brush, C. J., Threadgill, H., Harmon-Jones, E., Treadway, M., Patrick, C. J., & Hajcak, G. (2021). The effort-doors task: Examining the temporal dynamics of effort-based reward processing using ERPs. *NeuroImage*, 228, 117656.

审稿专家一，意见 10，

是否对努力类型进行操纵检验，被试是否在整个游戏过程中都明确游戏对象？

回应 10，

感谢审稿专家对“努力类型”操纵有效性的关注。我们承认，在当前的实验设计中，缺乏一个独立的、量化的行为指标(例如，在实验结束后询问被试在每个部分中的主观感受)来作为正式的操纵检验，这是本研究的一个局限性，我们将在论文的讨论部分明确提及这一点，并作为未来研究可以改进的方向。

不过，为了最大限度地确保被试能够清晰区分并始终牢记努力类型，我们在实验程序中采取了以下重要措施：首先，在每一部分开始之前，我们都在电脑屏幕上向被试呈现了明确的文字说明，清晰地告知他们接下来这个部分所有试次的受益者(例如，“接下来的任务中，您的努力将为您自己赢得奖金”或“接下来的任务中，您的努力将为您所选择的‘XX 慈善项目’赢得捐款”)。被试需要按空格键确认已理解后，才能开始该部分的正式实验。这种设计让被试在每一个完整的区块内都处于同一种明确的奖赏情境下，很大程度上避免了两种条件的混淆。其次，我们对于两种努力类型的顺序我们进行了被试间平衡(一半被试先进行亲自我部分，另一半先进行亲社会部分)。这在很大程度上排除了混淆因素，尽可能确保实验效应源自对努力类型的操纵。

综上，虽然缺乏一个量化的后测指标，但我们相信，通过“明确提示”、“顺序平衡”的设计，我们有效地维持了被试对不同努力类型的意识，保证了核心自变量的操纵有效性。我们衷心感谢您的审阅，并在论文修改稿的“4.3 研究局限和未来方向”部分对此进行了说明，内容大致如下：

“本研究未设置行为后测来对努力类型的操纵进行直接检验。尽管我们在程序上通过每一部分实验前的明确提示以及顺序平衡方式，力求确保被试对不同奖赏情境的清晰认知并控

制混淆因素，未来研究仍可引入主观报告或行为选择任务，为操纵的有效性提供更直接的证据”(第 13 页, 第 3 段)

审稿专家一，意见 11，

为谁进行游戏在游戏前设置？block 设计？每个 block 是 80 个试次？

回应 11，

感谢审稿专家提出这个重要的问题，这有助于澄清我们实验设计的关键细节。现详细说明如下：

首先，“为谁进行游戏”(即努力类型：亲自我 vs. 亲社会)是在每个实验部分(block)开始之前设置的。具体流程如下：在正式实验开始前，被试先选择一个慈善项目。随后，整个实验分为“亲自我努力”和“亲社会努力”两个部分(即两个 block)。在每一部分开始前会明确告知被试该部分的受益者是自己还是其所选慈善项目。

其次，在一个实验部分中，所有试次都只为同一个受益对象(自己或慈善机构)赢取奖金。两个实验部分的顺序在被试间进行了平衡。因此，本实验采用的是“block 设计”。即，同一类型的试次(所有亲自我或所有亲社会)被集中呈现于一个 block 内。这种设计能有效减少任务切换带来的认知干扰，让被试更清晰地感知当前的努力目标，从而更好地分离出两种努力类型对奖赏加工的不同影响。

最后，每个努力类型 block 中，高努力和低努力条件各有 40 个试次，因此每个 block 包含 80 个试次。两个 block 总试次为 160 次。

简而言之，我们的实验采用“block 设计”，“为谁努力”在 block 开始前设定，每个 block 为 80 试次。我们已经在修改稿中增加了关于“为谁努力”设定时间的表述(第 4 页, 26-30 行)，并再次核对了相关内容，确保其清晰无误。

审稿专家一，意见 12，

明确期待阶段的时间窗和对应的实验流程，体验阶段同理。

回应 12，

感谢审稿专家关于脑电实验流程的宝贵建议。我们虽然在原文“2.5 脑电数据采集和分析”部分对“期待阶段”与“体验阶段”的任务流程与 ERP 时间窗对应关系上进行了说明，但表述不够清晰。具体而言，对于期待阶段，我们根据解锁刺激时间点(即锁形图标变为开锁状态的时刻)对每个试次的连续 EEG 数据进行分段，选取刺激前 200 ms 到刺激后 1000 ms

作为感兴趣的时间窗，并且 cue-P3 成分的分析时间窗定义为“300~500 ms”。对于体验阶段，我们根据反馈刺激(收益或损失的箭头)呈现的时间点对每个试次的连续 EEG 数据进行分段，选取刺激前 200 ms 到刺激后 1000 ms 作为感兴趣的时间窗，并且 RewP 成分的分析时间窗定义为“250~350 ms”。

根据您的意见，我们已在方法部分修改了相关表述(第 6 页, 第 1 段)，并在实验流程图(图 1, 第 5 页)中对两个阶段进行了标注。修改后的内容大致如下：

“我们根据解锁刺激(即锁形图标变为开锁状态)和反馈刺激(收益或损失的箭头)呈现的时间点对每个试次的连续 EEG 数据进行分段，选取刺激前 200 ms 到刺激后 1000 ms 作为感兴趣的时间窗。”

“对于期待阶段，我们提取每个试次下九个电极点(Cz、C1、C2、CPz、CP1、CP2、Pz、P3、P4)在解锁刺激呈现后 300~500 ms 时间窗内的平均值计算 cue-P3 成分。”

“对于体验阶段，我们首先提取每个试次下九个电极点(FCz、FC1、FC2、Cz、C1、C2、CPz、CP1、CP2)在反馈刺激呈现后 250~350 ms 时间窗内的平均值，然后用赢钱时的平均值减去输钱时的平均值得到相应的 RewP 成分。”

审稿专家一，意见 13，

为什么不选 200-400 这个窗口，图 2A 看起来差异更大。

回应 13，

非常感谢审稿专家对脑电分析的细致审阅和提出的宝贵问题。您在图 2A 中观察到的现象确实非常有趣。我们选择 300-500 毫秒作为 cue-P3 的分析时间窗，并非基于对本研究数据的观察后调整，而是依据先验的、在相关研究领域内被广泛采纳的标准。具体而言，在我们的直接范式参考文献 Bowyer 等人(2021)的研究中，以及其他考察奖赏期待的研究中，cue-P3 成分大多被定义在刺激呈现 300ms 后，如 300-500 毫秒或 350-600 毫秒的顶叶区域(例如，Luo et al., 2019; Pfabigan et al., 2014; Rong et al., 2022)。这个时间窗被普遍认为能够最特异地捕捉到与奖赏期待相关的动机性注意成分。

为了回应您的关切，并检验我们研究发现的稳健性，我们进行了一次探索性分析：我们提取了每个被试在 200-400 毫秒时间窗内在相同电极点上的波幅，并进行了相同的统计模型分析。在这一分析中，努力水平的主效应依然显著($b = -0.70$, $SE = 0.28$, $t(844) = -2.54$, $p = 0.011$, 95% CI = [-1.24, -0.16])，并且没有出现努力类型、试次或它们之间任何显著的交互作用(见下表)。这一结果与我们基于 300-500 毫秒时间窗的分析结果模式完全相同。基于

此，我们决定还是保留原来基于 300-500 毫秒时间窗的分析结果，以尽量与以往研究保持一致。

cue-P3 (200-400ms)多层线性模型结果

变量	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i>	95% CI
截距	2.02***	0.22	9.10	129	<0.001	[1.58, 2.46]
努力类型	-0.05	0.29	-0.16	404	0.870	[-0.62, 0.52]
努力水平	-0.70*	0.28	-2.54	844	0.011	[-1.24, -0.16]
试次	-0.01	0.01	-1.15	349	0.249	[-0.03, 0.01]
努力类型×努力水平	0.03	0.37	0.07	5920	0.940	[-0.70, 0.75]
努力类型×试次	0.004	0.01	0.33	5921	0.739	[-0.02, 0.03]
努力水平×试次	0.003	0.01	0.30	5922	0.763	[-0.02, 0.03]
努力类型×努力水平×试次	0.001	0.02	0.05	5912	0.962	[-0.03, 0.03]

注：在模型中，试次变量都被平移为与截距相对应，即试次的取值范围为 0 ~ 39；努力水平变量编码为二分变量，即高努力条件为 0，低努力条件为 1；努力类型变量编码为二分变量，即亲社会努力条件为 0，亲自我努力条件为 1。对于该模型，AIC 为 33078.8，R² 为 0.08。AIC = Akaike information criterion; **p* < 0.05, ****p* < 0.001。

参考文献:

Bowyer, C., Brush, C. J., Threadgill, H., Harmon-Jones, E., Treadway, M., Patrick, C. J., & Hajcak, G. (2021). The effort-doors task: Examining the temporal dynamics of effort-based reward processing using ERPs. *NeuroImage*, 228, 117656.

Luo, Y., Jiang, H., Chen, X., Zhang, Y., & You, X. (2019). Temporal dynamics of hedonic and eudaimonic reward processing: An event-related potentials (ERPs) study. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 137, 63–71.

Pfabigan, D. M., Seidel, E.-M., Sladky, R., Hahn, A., Paul, K., Grahl, A., Küblböck, M., Kraus, C., Hummer, A., Kranz, G. S., Windischberger, C., Lanzenberger, R., & Lamm, C. (2014). P300 amplitude variation is related to ventral striatum BOLD response during gain and loss anticipation: An EEG and fMRI experiment. *NeuroImage*, 96, 12–21.

Rong, Y., Chen, N., Dong, J., Li, Q., Yue, X., Hu, L., & Wei, P. (2022). Expectations of immediate and delayed reward differentially affect cognitive task performance. *NeuroImage*, 262, 119582.

审稿专家一，意见 14，

结果部分，交互作用没有进一步分析，例如 P9 line6。建模方程一起报告出来比较好。

回应 14,

感谢审稿专家关于统计分析的宝贵意见。我们完全同意应对显著的交互作用进行进一步分析。实际上,在发现显著的三阶交互作用后,我们已按照标准统计流程进行了解析:**首先,我们进行了简单交互作用分析:**通过分别建立亲自我(模型 3)和亲社会(模型 4)努力条件下的模型,我们检验了不同努力类型下的“努力水平×试次”交互作用。结果显示,该交互作用仅在亲自我条件下显著(模型 3),而在亲社会条件下不显著(模型 4),这解释了三阶交互的来源。**对于显著的简单交互作用,我们进行了简单斜率分析:**针对模型 3 中显著的“努力水平×试次”交互作用,我们进一步分析了在高、低亲自我努力水平下, RewP 随试次的变化。结果显示,仅在低亲自我努力条件下, RewP 随试次显著下降($b = -0.14, SE = 0.05, t(95.3) = -2.90, p = 0.004, 95\% CI = [-0.24, -0.04]$),而在高亲自我努力条件下则无显著变化($b = 0.06, SE = 0.05, t(103) = 1.15, p = 0.251, 95\% CI = [-0.04, 0.16]$)。

我们为初稿中未能清晰呈现这一分析链条表示歉意,这是我们行文中的疏忽。我们已在修改稿中明确使用“简单交互作用分析”和“简单斜率分析”等术语来描述我们的分析步骤(第 9 页,第 1 段;第 10 页,第 1 段),并补充了所构建的多层线性模型的具体方程(第 6 页,第 2、3 段)。

模型 1 和模型 2 的方程如下:

$$\begin{aligned} Y_{ij} = & \beta_{00} + \beta_{10} \times trial_{ij} + \beta_{20} \times effort_{ij} + \beta_{30} \times target_{ij} \\ & + \beta_{40} \times (effort_{ij} \times trial_{ij}) + \beta_{50} \times (target_{ij} \times trial_{ij}) \\ & + \beta_{60} \times (target_{ij} \times effort_{ij}) + \beta_{70} \times (target_{ij} \times effort_{ij} \times trial_{ij}) \\ & + u_{0j} + u_{1j} \times trial_{ij} + u_{2j} \times effort_{ij} + u_{3j} \times target_{ij} + e_{ij} \end{aligned}$$

其中, Y_{ij} 代表第 j 名被试在第 i 个试次上的 cue-P3 或 RewP 波幅, e_{ij} 表示第 j 名被试在第 i 个试次上的残差, $trial$ 表示试次, $effort$ 表示努力水平, $target$ 表示努力类型。模型包含了所有固定效应(三个主效应、三个二阶交互项和一个三阶交互项),以及被试水平的随机截距(u_{0j})、试次的随机斜率(u_{1j})、努力水平的随机斜率(u_{2j})和努力类型的随机斜率(u_{3j})。

模型 3 和模型 4 的方程如下:

$$\begin{aligned} Y_{ij} = & \gamma_{00} + \gamma_{10} \times trial_{ij} + \gamma_{20} \times effort_{ij} + \gamma_{30} \times (effort_{ij} \times trial_{ij}) + u_{0j} \\ & + u_{1j} \times trial_{ij} + u_{2j} \times effort_{ij} + e_{ij} \end{aligned}$$

其中, Y_{ij} 代表第 j 名被试在第 i 个试次上的 RewP 波幅, e_{ij} 表示表第 j 名被试在第 i 个试次上的残差, $trial$ 表示试次, $effort$ 表示努力水平。模型包含了努力水平、试次及其交互项的固定效应,以及被试水平的随机截距(u_{0j})、试次的随机斜率(u_{1j})和努力水平的随机斜率

(u_{2j}) 。

审稿专家一，意见 15，

P9 努力水平主效应显著，边际均值估计不显著，为什么结果矛盾？

回应 15，

感谢审稿专家关于统计分析结果的宝贵问题。我们为原文中可能引起的误解表示歉意，并就此进行澄清：这个看似矛盾的结果并非是一个真正的矛盾，而是源于存在显著交互作用时，对“主效应”和“边际均值”的不同解读。

模型 3 中显著的努力水平主效应($b = 1.67, p = 0.017$)表明，在初始试次(trial=0)时，高、低努力条件之间的 RewP 波幅存在显著差异。这个主效应表示在模型控制了“试次”以及“努力水平×试次”交互作用后，在特定点(trial=0)上的“截距”差异。而后续的边际均值估计，比较的是排除了“试次”影响后，高、低努力条件在整个试次范围内总体平均 RewP 波幅。由于模型中存在显著的“努力水平×试次”交互作用(低努力下 RewP 随试次下降，高努力下无显著变化)，高努力条件下相对稳定的 RewP 和低努力条件下前期高、后期低的 RewP 在求取整体平均值后，其差异被削弱，从而在统计上不再显著。

简而言之，主效应告诉我们，在初始试次(trial=0)，努力水平有显著影响。而交互作用告诉我们，这种影响随着试次在变化。边际均值则给出了一个“整体平均”的视角，但这个平均效应被随试次变化的模式所掩盖了。我们再次对原文表达的不足之处表示歉意。为了避免读者的困惑，我们已经在修改稿中对原文的这部分内容进行了修改，增加了对主效应和边际均值估计的解释。修改后的文本大致如下：

“模型 3 探究了在亲自我努力条件下，RewP 波幅随试次增加的变化趋势在不同努力水平间的差异。结果显示努力水平主效应显著($b = 1.67, SE = 0.70, t(301) = 2.39, p = 0.017, 95\% CI = [0.29, 3.04]$)，表明在初始试次(trial = 0)，努力水平对 RewP 存在显著影响；试次主效应不显著($b = 0.06, SE = 0.05, t(97) = 1.15, p = 0.252, 95\% CI = [-0.04, 0.16]$)；努力水平和试次交互作用显著($b = -0.20, SE = 0.06, t(1262) = -3.25, p = 0.001, 95\% CI = [-0.32, -0.08]$)。进一步的边际均值估计显示，在排除了试次效应后，高低努力水平下的总体平均 RewP 波幅无显著差异($t(38.1) = 0.46, p = 0.649$ ；参见图 2B)。”(第 10 页, 第 1 段)

审稿专家一，意见 16，

P10“受益者中立性”这个词有点困惑，是前人提出的吗？

回应 16,

感谢审稿专家对术语使用的关注。原文中“受益者中立性”是指在奖赏期待阶段,无论受益者是自己还是他人,个体的反应模式是一样的。该词并非前人提出,是我们为了表达奖赏期待反应不受奖赏归属(受益者)影响所采用的一种表述。对于使用该词可能引起的困惑,我们表示歉意。为了使表达更清晰、明确,我们在修改稿中对原句“这一结果表明,在奖赏加工早期阶段,个体的动机性趋近倾向可能具有一定的‘受益者中立性’,即对奖赏归属不敏感,更关注自身投入与回报之间的对应关系”进行了修改。修改后的句子如下:

“这一结果表明,在奖赏加工早期阶段,个体可能更关注自身投入与回报之间的对应关系,而对奖赏归属(即受益者是谁)不太敏感。”(第 11 页, 11-12 行)

审稿专家一, 意见 17,

P11 亲社会努力下 RewP 波幅随试次降低, 和你的结论不符合“亲自我努力减缓了奖赏快乐体验的习惯化, 而亲社会努力则无显著影响”。

回应 17,

感谢审稿专家提出的深刻意见。我们完全理解您所关注的问题, 并意识到原文的表述可能会引起一定的歧义。在原文中, 我们的结论“亲社会努力无显著影响”所指的是: 亲社会努力的水平(高 vs. 低)对奖赏体验习惯化的进程没有产生显著的调节作用。

具体而言: 在亲社会努力条件下, RewP 波幅确实随着试次重复出现了显著的总体下降(试次主效应显著, $b = -0.11, p = 0.008$), 表明习惯化过程确实发生了。但努力水平 $\times$ 试次的交互作用不显著($b = -0.02, p = 0.740$), 说明高、低亲社会努力水平下 RewP 随试次下降的斜率并无显著差异, 即更高的亲社会努力并未减缓习惯化的进程。而在亲自我努力下, 努力水平与试次存在显著交互作用($b = -0.20, p = 0.001$), 低努力水平的 RewP 波幅随试次增加而显著减小($b = -0.14, p = 0.004$), 而高努力水平下无显著变化($b = 0.06, p = 0.251$), 说明高努力显著减缓了 RewP 的下降速度。由此我们得出结论: 亲自我努力能减缓奖赏体验的习惯化, 而亲社会努力并未对该过程产生显著调节作用(无显著影响)。

再次感谢您指出这一潜在的误解。为避免读者混淆, 我们已在修改稿讨论部分(第 4.2 节)对相关表述进行了更清晰的说明, 将“亲社会努力无显著影响”修改为: “亲社会努力水平并未对该过程产生显著调节作用”(第 11 页, 第 30 行)。

对审稿专家二意见的回应

《亲自我与亲社会努力奖赏后效的分离：习惯化的视角》一文，逻辑清晰、实验过程介绍清楚、以 cue-P3 和 RewP 分别作为期待阶段和体验阶段的脑电指标也是合理的、数据处理得当，讨论合理，建议修改后录用。主要不足有两个

回应，

非常感谢审稿专家对本研究所提出的宝贵意见，以及对本研究的肯定。我们非常认同您所指出的两项主要不足，并已据此对文稿进行了认真修改与补充。

审稿专家二，意见 1，

缺少行为结果的分析，如有收集应加入分析。

回应 1，

衷心感谢审稿专家提出的这一富有建设性的意见。我们完全同意行为数据的分析能够为神经电生理的发现提供更直接的证据，从而增强研究结论的完整性和说服力。然而，由于研究范式的特点，本研究并未收集相关行为数据。我们在此诚恳地向您说明相关情况。

首先，本研究采用的“努力-门任务”范式(Bowyer et al., 2021)，其核心目的在于通过精细控制的努力操纵来捕捉其对奖赏加工神经动态的影响。该范式在设计之初就未纳入与奖赏加工有关的行为指标。在该任务中，努力完成后的门选择是强制性的且无优劣之分(两个门完全相同)，因此选择数据不具备分析价值。而反馈阶段为结果呈现，不涉及行为反应。我们承认，未能包含一个独立的主观评分或更丰富的行为指标来直接度量奖赏期待和体验的强弱，是本研究的局限性之一。这一设计上的取舍，使我们能够避免在脑电记录过程中进行行为反应可能带来的干扰，更专注于利用 ERP 技术的高时间分辨率来解析奖赏加工的时程动态，但也不可避免地损失了在行为层面进行深入关联分析的机会。您的意见极具价值。我们已经在修改稿的“4.3 研究局限和未来方向”部分明确加入了对此局限性的讨论，并指出未来研究可以引入主观评分或其他行为指标，为亲自我与亲社会努力的后效提供更直接、多层次的行为证据(第 13 页, 第 3 段)。新添加的文本内容大致如下：

“本研究未能包含一个独立的主观评分或更丰富的行为指标来直接度量奖赏期待和体验的强弱。未来研究可引入主观报告或行为选择任务，为操纵的有效性以及亲自我与亲社会努力的后效提供更直接、多层次的证据。”

再次感谢您的严谨审阅，这为我们的研究提供了重要的改进方向。

参考文献:

Bowyer, C., Brush, C. J., Threadgill, H., Harmon-Jones, E., Treadway, M., Patrick, C. J., & Hajcak, G. (2021). The effort-doors task: Examining the temporal dynamics of effort-based reward processing using ERPs. *NeuroImage*, 228, 117656.

审稿专家二, 意见 2,

在图 4 中, 为什么能根据“在奖赏期待阶段, 个体对奖赏的期待随努力程度的提升而增强, 且不易习惯化;”而推导出努力是固定成本?

怎么获得“而在奖赏体验阶段, 当奖赏不足以覆盖努力成本时, 个体可能通过努力合理化提升奖赏的主观价值, 以实现成本-收益平衡, 从而有助于减缓习惯化”这个结论, 尤其是“当奖赏不足以覆盖努力成本时”这个结论从什么数据可以获得呢? 个人觉得行为数据是必要的解释, 否则 cue-P3 和 RewP 这两个指标不足以说明成本-收益的问题, 因为脑电指标说到底也是一种推断的结果。

回应 2,

非常感谢审稿专家深入地审阅我们的理论解释部分。您的意见促使我们重新审视并更精确地表述我们的理论框架。

首先, 请允许我们稍作澄清。在我们的解释中, “努力是一种成本”是我们基于控制期望价值理论及大量前人研究(如努力折扣文献)所采用的理论前提, 而非单从本研究的“期待增强”现象中反向推导出的结论。我们认同, 仅凭 cue-P3 的增强本身不足以定义努力的成本属性; 我们是在以往研究的基础上, 将本研究的发现——即努力付出后期待增强且稳定——解释为个体在付出成本后寻求成本-收益平衡的一种表现。

我们完全同意您指出的核心问题: 我们关于“当奖赏不足以覆盖努力成本时”的具体推论, 以及由此延伸的整个体验阶段的成本-收益再评估机制, 确实缺乏除 RewP 模式外的直接行为证据支持, 可能存在过度推论的问题。尽管我们在表述中使用了“可能”一词来表明推测性, 但所提出的关于“成本-收益覆盖”的机制, 在当前研究的证据基础上仍然是一个跨度较大的推论, 这是原文表述的疏漏, 我们为此表示歉意。您的意见帮助我们意识到, 要直接证实“奖赏不足以覆盖努力成本”这一内在认知状态, 以及随之而来的“主观价值提升”, 理想情况下需要结合行为学测量(如主观价值评分、努力折扣任务)或对奖赏大小进行系统操纵。仅凭 RewP 的习惯化模式来支持这一复杂机制, 证据链不够充分, 可能导致

读者产生与您类似的疑问。

根据您的宝贵意见，我们已对讨论部分进行了如下修改，以更准确地反映我们发现的贡献和该解释的假设性质：

- (1) 将原文中关于成本-收益覆盖的句子修改为更具整合性和推测性的表述。修改后的文本大致如下：

“个体在付出努力后，可能存在一种动态的价值调节机制以实现内在的成本-收益平衡。我们推测，在亲自我努力条件下，高努力付出所形成的内在成本，可能促使个体通过‘努力合理化’等机制来提升随后获得的、固定金额奖赏的主观价值，从而延缓了奖赏体验的习惯化过程。与之形成对照的是，在亲社会努力中，由利他行为本身产生的‘温暖光辉’效应可能作为一种额外的内在收益，补偿了努力成本，从而减少了对金钱奖赏进行主观价值提升的必要性。”(第 12 页, 第 2 段)

- (2) 重新定位理论框架：明确说明，图 4 所展示的框架是一个“用于解释本研究结果的理论模型”，它整合了控制期望价值理论的核心思想与本研究的新发现，其目的在于为理解亲自我与亲社会努力后效的分离提供一个启发性的、可检验的假设，而非一个已被完全证实的结论(第 12 页, 第 2 段)。

最后，再次感谢您的宝贵意见。通过上述修改，我们希望能够更清晰地传达：本研究的主要贡献在于发现了现象，并为此现象构建了一个逻辑连贯且富有前景的理论解释框架，而该框架的细节仍需未来研究通过多方法手段进行验证。

审稿专家二，意见 3，

“注释十字”应为“注视十字”

回应 3，

感谢审稿专家的细致审阅。我们已在修改稿中将所有“注释十字”一词更正为“注视十字”。

审稿专家二，意见 4，

类似 t980 应为 t(980)

回应 4，

感谢审稿专家指出该问题。我们已在修改稿中将所有类似“t980”的表达修改为“t(980)”。

审稿专家二，意见 5，

参考文献需进一步修改，不符合 apa 格式，如 Jiang, H., & Zheng, Y. (2024). Effort Expenditure Increases Risk-Taking for Improbable Rewards. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 01461672231218746.

回应 5，

感谢审稿专家提醒。我们已全面检查并修改参考文献列表，使其符合 APA 第 7 版格式。以审稿专家提及的条目为例，现已更正为：

Jiang, H., & Zheng, Y. (2024). Effort Expenditure Increases Risk-Taking for Improbable Rewards. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 51(8), 1396-1410.