

急性疼痛对个人与替代奖赏加工的调控效应： 来自 ERP 的证据*

刘沛菡¹ 彭微微² 王金霞¹ 李红¹ 雷怡¹

(¹ 四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都 610066) (² 深圳大学心理学院, 深圳 518060)

摘要 疼痛和奖赏是调节人类感知和行为的两个基本激励因素, 其交互机制对理解动机决策具有重要价值。本研究采用改良版金钱激励延迟任务(Monetary Incentive Delay Task, MID), 结合事件相关电位(Event-related potential, ERP)技术, 考察健康个体在急性疼痛影响下的奖赏加工动态特征, 重点关注对个人奖赏(自我导向)和替代奖赏(他人导向)加工的阶段性调节效应。行为结果显示, 疼痛增强了个体在预期阶段的奖赏动机, 表现为更快的反应时和更多的按键次数, 且该效应随奖赏价值提升呈线性增长。ERP 结果显示, 在奖赏预期阶段, 疼痛组诱发更大的 cue-P2 与 cue-P3 波幅, 提示其对奖赏线索的情绪加工和对替代奖赏的注意增强; 而在奖赏体验阶段, 疼痛组在替代奖赏条件下表现出更大的 FRN 和 P3 波幅, 表明其对社会性奖赏结果反馈的神经响应增强。上述结果共同表明, 疼痛对奖赏加工的影响存在阶段性差异: 在动机层面表现为一致增强, 而在情绪体验和神经反应层面则更显著地影响替代奖赏。本研究更加全面深入地探讨了疼痛和奖赏二者相互作用的原因和机制, 进一步说明疼痛对奖赏系统的调控具有“动机趋同-体验分离”的双重特性。

关键词 急性疼痛, 金钱奖赏, 个人奖赏, 替代奖赏, 奖赏预期阶段, 奖赏体验阶段, ERP

分类号 B845

1 引言

疼痛与奖赏是调节人类感知和行为的两个基本动机因素, 分别驱动个体避免威胁与寻求奖赏, 对生存与适应具有核心作用。二者在神经回路和功能上存在密切的重叠关系。神经科学研究表明, 疼痛和奖赏加工均依赖于多巴胺系统、伏隔核(nucleus accumbens, NAc)和前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)等关键脑区, 这些区域在动机、情感调节和决策过程中起到关键作用(Porreca & Navratilova, 2017; 刘沛菡等, 2023)。近年来, 心理学研究对疼痛、奖赏以及它们之间的相互作用进行了广泛关注。动机决策模型表明, 疼痛和奖赏通过消极和积极的动机系统分别诱导、驱动和维持个体的行为, 即个体既会寻求奖赏以获得愉悦感, 也会避免疼痛

以减少不适(Becker et al., 2012; Fields, 2004, 2007)。该模型的基本假设是: 当更高优先级的目标出现时, 疼痛感受可能会缓解, 而奖赏的主观价值亦可能因竞争性需求而降低。这种神经和功能上的重叠关系说明了疼痛与奖赏之间的密切互动。研究发现奖赏能够影响疼痛感受, 金钱奖赏可以降低个体的疼痛感受, 而金钱损失则增强了疼痛感受, 表明金钱奖赏可以缓解急性疼痛。随后的研究进一步发现, 奖赏能够增强个体对疼痛的辨别能力(Becker et al., 2013, 2020)。相反, 疼痛也能对奖赏加工产生影响。例如, Gandhi 等人(2013)观察到急性疼痛能够增强个体寻求奖赏的动机; Salcido 等人(2018)在啮齿动物研究中发现, 避免长期疼痛的动机取代了获得食物奖赏的动机, 这表明在特定环境下, 慢性疼痛的潜在威胁可能大于食物奖赏的价值。这些研究结果

收稿日期: 2024-11-09

* 国家自然科学基金面上项目(32271142)、教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(21JZD063)资助。

通信作者: 雷怡, E-mail: leiyi821@vip.sina.com

共同验证了动机-决策模型的基本假设,即疼痛和奖赏之间的关系可以根据特定的环境和目标进行调整,相互影响。当个体同时面对疼痛和奖赏时,他们必须根据情境因素、个人状态、潜在威胁和奖赏价值来决定优先考虑哪一方面。

奖赏加工并非单一瞬时的心理反应,而是一个由多个阶段组成的动态过程。大量研究表明,奖赏加工可划分为两个核心阶段:奖赏预期阶段与奖赏体验阶段(Knutson et al., 2001; Berridge & Robinson, 2003)。奖赏预期阶段反映个体在接收到奖赏线索后对潜在奖赏的动机准备和情绪调动,通常伴随增强的注意资源分配与情绪唤醒;而奖赏体验阶段则涉及个体在实际获得反馈后的愉悦感受与主观评价。在神经机制上,前者主要依赖腹侧纹状体(ventral striatum, VS)与 NAc 的激活,后者则涉及 PFC 与阿片系统的参与(Berridge & Kringelbach, 2015; Knutson et al., 2001)。因此,疼痛是否会在这两个阶段发挥一致或分化的调节效应,是理解其与奖赏系统交互机制的关键所在。行为研究普遍表明,急性疼痛能够影响个体在奖赏预期阶段对自身奖赏的加工,表现为增强个体寻求奖赏的动机(Darbor et al., 2016; Gandhi et al., 2013; Wang et al., 2018)。然而,疼痛对奖赏体验阶段的影响并不一致。部分研究发现,疼痛不会显著改变奖赏体验中的愉悦感受(Darbor et al., 2016; Gandhi et al., 2013);相反,Becker 等人(2017)的研究表明,疼痛可能降低个体对金钱奖赏的愉悦感受,而 Wang 和 Bao 等人(2020)则发现疼痛反而增加了个体对金钱奖赏的愉悦感。这种不一致性可能源于疼痛和奖赏本身的多样性,包括疼痛刺激的形式、奖赏类型以及奖赏对象的差异;此外,个体对奖赏的情感反应还可能受到个人的心理状态和环境因素等多重变量的调节作用。神经层面的研究进一步揭示了疼痛对奖赏加工的影响机制。急性疼痛可通过增加多巴胺的释放,将奖赏信息充分地投射到 NAc,从而增强个体的奖赏动机和行为(Peciña et al., 2003; Berridge et al., 2009; Taylor et al., 2016; Scott et al., 2006)。而在奖赏体验阶段,疼痛的影响可能涉及阿片系统的功能变化以及内侧前额叶皮层(medial prefrontal cortex, mPFC)的调节作用,这些区域在情绪加工和愉悦体验中扮演重要角色(Berridge & Kringelbach, 2015; Zubieta et al., 2001; Etkin et al., 2011; Huckins et al., 2019; Wang, Bao, et al., 2020)。因此,研究总体表明疼痛增强了个体为自身获得奖赏的动机,但其对奖赏情感价值

体验的具体影响则可能取决于个体的情境和心理调节能力。

个人奖赏(自我导向)和替代奖赏(他人导向)在神经加工上存在部分重叠,尤其是当替代奖赏涉及亲密他人时。这种重叠关系表现在大脑中多个区域的共同激活,尤其是在与主观价值计算、动机和情绪调节相关的神经通路中。已有研究表明,个人奖赏与替代奖赏都能激活腹内侧前额叶皮层(ventromedial prefrontal cortex, vmPFC)和杏仁核,这些区域参与了奖赏的价值评估和情感体验(Bartra et al., 2013; Hare et al., 2010)。这种神经机制的重叠在一定程度上解释了个体在为自己和为亲密他人获得奖赏时产生相似的情感反应。个体奖赏和替代奖赏也具有可分离的神经激活模式,这取决于个体与替代奖赏对象的情感和社会接近程度。这种差异表现在与奖赏激励线索的动机显著性和效价评估相关的 VS 和 NAc 的激活强度上。研究发现,当替代奖赏对象是亲密的朋友或家人时,VS 和 NAc 的活动增强,与个人奖赏的加工模式相似;但当奖赏对象是陌生人时,VS 的激活显著减弱(Fareri et al., 2012; Hackel et al., 2017)。这一差异可能源于社会距离效应(Social Distance Effect)所带来的动机显著性与情绪共鸣差异,表明替代奖赏的情感和动机加工受到社会和情感距离的影响,当个体在情感上与另一个人接近时,他们更有可能分享自己的积极情绪状态,相比之下,为普通他人获取奖赏时,这种动机显著性和情绪共鸣较弱(Morelli et al., 2015; Braams et al., 2014)。这种耦合关系反映了个体在社会互动中的共情能力,亲密关系往往伴随更强的情感共鸣,个体在面对亲密他人的奖赏时,会表现出更强的情绪投入和动机反应,个体对“内群体成员”(如亲密他人)的奖赏更敏感,表现出类似自我奖赏的反应,而对“外群体成员”(如普通他人)则反应较弱(Braams & Crone, 2017; Fareri et al., 2012; Hackel et al., 2017)。替代奖赏的加工还涉及背内侧前额叶皮层(dorsomedial prefrontal cortex, dmPFC)、颞顶叶交界处(temporo-parietal junction, TPJ)等与心理化相关的区域,尤其是在需要理解和预测他人情绪状态时(Buckner & Carroll, 2007; Zaki & Ochsner, 2012)。亲密他人奖赏通常涉及更深层次的情感投入和共情反应,激活与个人奖赏相似的神经回路,如 vmPFC 和 VS;而普通他人奖赏则可能更多地涉及社会认知和道德判断相关区域,如 dmPFC 和 TPJ。这些差异可能导致亲密他人奖赏在情感价值、动机强度和神经反应等方

面与普通他人奖赏存在显著区别。

除了奖赏加工阶段与奖赏类型, 奖赏的客观价值本身也是影响奖赏动机和神经加工的重要因素。奖赏价值越高, 通常诱发更强的动机反应和更大的情绪唤醒, 表现在行为层面为更快的反应、更高的努力投入, 在脑电指标上表现为预期阶段和体验阶段更大的 P3 波幅(Yeung & Sanfey, 2004)。已有 ERP 研究表明, 奖赏金额的大小调节了个体对奖赏线索的敏感性与反馈期的奖赏价值评估过程。例如, 在金钱激励延迟任务中, 高价值奖赏线索诱发更强的 CNV 和 cue-P3, 表明个体对高价值目标的预期动机更强(Zhang et al., 2017)。而在奖赏体验阶段, 高价值奖赏通常会引发更小的 FRN 波幅和更大的 P3 波幅, 反映出更强的愉悦感和对积极反馈的情绪投入(Heydari & Holroyd., 2016)。因此, 在本研究中引入多个水平的金钱奖赏, 有助于揭示疼痛是否以不同方式调节个体对不同奖赏价值的反应, 并进一步澄清动机系统如何在威胁状态下动态调整对价值的敏感性。

理解疼痛对奖赏加工的影响, 必须考虑疼痛和奖赏本身的多样性。疼痛不仅是一种个体体验, 也会通过共情和社会认同影响人际互动。探讨疼痛对亲密他人奖赏的调节作用, 有助于揭示疼痛在社会互动中的潜在影响机制。研究发现, 疼痛会激活个体的情绪调节系统, 而亲密他人往往承担更重要的社会支持功能, 理解疼痛对替代奖赏(尤其是亲密他人奖赏)的特殊影响, 具有重要的理论和应用价值(Navratilova & Porreca, 2014)。本研究聚焦于替代奖赏中具有代表性的关系类型——亲密朋友。相较于普通他人, 亲密朋友具有更高的情感依附水平、更频繁的互动经历以及更强的社会身份认同, 因此个体对其奖赏可能表现出更强的动机参与和情感共鸣(Mobbs et al., 2009; Braams & Crone, 2017)。亲密朋友奖赏加工具有独特的神经和心理机制, 不同于家庭成员、恋爱伴侣或陌生人, 这一差异在青少年与青年人群中尤为显著(Telzer et al., 2010)。因此, 在当前研究中, 我们将“替代奖赏”明确定义为亲密朋友所获得的奖赏, 借此提高任务情境的生态效度和情感真实性, 进一步探索疼痛状态下个体对自我奖赏与亲密他人奖赏的动机加工特点及其神经机制。此外, 奖赏加工是一个动态的心理过程, 主要包括奖赏预期与奖赏体验两个阶段。不同阶段所涉及的神经机制和心理过程各不相同, 可能受到不同情境因素的调节。与此同时, 奖赏加工还受到

奖赏类型与奖赏价值的共同影响: 个人奖赏与替代奖赏由于社会距离和情感关联的差异, 其动机显著性与情绪反应可能存在分化; 而奖赏价值的大小则直接影响个体的动机强度与情绪投入。基于此, 本研究提出以下核心问题: 急性疼痛是否以相似的方式调节个人奖赏与替代奖赏的加工过程? 疼痛是否在奖赏预期与奖赏体验两个阶段产生一致或阶段性差异的影响? 疼痛是否改变个体对不同奖赏价值水平的反应强度? 对这些问题的回答, 将有助于揭示疼痛在如何调节个体的奖赏加工系统, 特别是在面对不同社会情境与价值条件时, 其动机系统如何动态适应, 从而深化对疼痛-奖赏交互机制的理解。

为了解决疼痛对奖赏加工影响的问题, 本研究采用了金钱激励延迟任务(Monetary Incentive Delay, MID), 该实验范式能够有效区分奖赏加工的预期阶段和体验阶段, 并通过设置个人奖赏和替代奖赏, 比较两者在疼痛情境下的加工差异。结合高时间分辨率的事件相关电位(Event-related potential, ERP)技术, 深入探索疼痛如何影响个人奖赏和替代奖赏的动机、情绪和神经反应, 从而全面解析疼痛和奖赏系统的交互作用。

在奖赏加工的预期阶段, 本研究特别关注了三个关键 ERP 成分: CNV、cue-P2 和 cue-P3。目前已有研究将 MID 任务与 EEG 技术相结合。首先, 在奖赏加工预期阶段发现了奖赏激励线索后 200 ms 左右出现的 cue-P2 以及 300~600 ms 出现的 cue-P3, 分别与对线索的视觉加工调节、情绪价值评估以及动机显著性和注意力资源分配相关, 反映了对奖赏线索的检测和动机系统激活的过程(Wang, Liu, & Shi, 2020; Wang, Li, et al., 2020)。高奖赏线索诱发更强的 cue-P3 振幅, 这与奖赏线索的动机显著性增加和内部环境的更新相关。其次, 在预期阶段有一个明显的负向偏转——关联性负变化(contingent negative variation, CNV), 通常在预备信号(奖赏激励线索)和命令信号(按键目标)之间出现。CNV 被认为反映了个体对即将发生事件的期待和准备程度, 与预期注意、动机和运动准备有关, 通常在线索呈现后 750~3000 ms 出现(Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2017; 李琪 等, 2017)。

在奖赏加工的体验阶段, 重点关注反馈呈现后 200~400 ms 内出现的反馈相关负波(Feedback-related Negativity, FRN)以及 300~600 ms 后的结果评价阶段出现的 P3。FRN 通常在反馈信息出现后出现, 反

映个体对反馈的情感反应和评价过程(Gu et al., 2017; Klawohn et al., 2021; Zhu et al., 2019; 李丹阳等, 2018; 陈乐乐等, 2020; 秦浩方等, 2021); P3 通常与线索的动机意义相关, 同时也与对线索刺激进行评估的注意资源分配相关, 被认为反映了刺激评估的过程, 还与持续注意力、工作记忆、情境更新和辨别有关(Lasaponara et al., 2019; Nair et al., 2016)。有研究发现, 在赌博任务中疼痛一般会增加金钱奖赏相关的 P3 波幅, 但不影响 FRN (Li et al., 2023)。

基于此, 本研究在行为和脑电层面分别提出假设。行为层面假设, 在疼痛情境下, 个体对金钱奖赏的动机反应增强, 且疼痛情境下个人奖赏和替代奖赏加工的变化模式一致, 表现为: 1) 在奖赏预期阶段, 疼痛组在个人奖赏和替代奖赏条件下的按键反应时相较于对照组更短, 按键次数相对于基线显著增加, 反映出更高的动机强度; 2) 疼痛组在高金钱奖赏条件下的动机评分显著高于对照组, 表明疼痛情境强化了个体对高价值奖赏的动机反应; 3) 疼痛对奖赏体验阶段的愉悦感受不产生显著影响; 4) 动机和愉悦感受都随金钱奖赏的增加而增强。脑电层面假设为: 在奖赏预期阶段, 在疼痛情境中的的奖赏线索出现后, cue-P2、cue-P3 以及 CNV 波幅增大, 表明疼痛增强了个体在动机和准备阶段的动机显著性和情绪价值评估; 在奖赏体验阶段, 疼痛情境中奖赏反馈出现后, FRN 和 P3 波幅增大, 表明疼痛增强了个体的情绪反应敏感性。综上所述, 本研究主要假设为, 疼痛能够增强个体对金额奖赏的动机反应, 无论奖赏对象是自身或他人且会诱发与奖赏预期和体验相关的特定神经反应变化。

2 方法

2.1 被试

本研究使用 G-power 3.1 软件对所需样本量进行了估计, 采用三因素混合实验设计内重复测量方差分析, 设置中等效应量 $f = 0.25$ 、统计检验力为 0.95, 显著性水平为 0.05, 计算得出所需最少样本量为 28 人。实际从四川师范大学招募了 70 名健康大学生作为研究对象。所有被试在性别、年龄、用手习惯等方面无显著差异, 且未报告有精神疾病或慢性疼痛障碍。在实验过程中, 为确保数据质量, 有 2 名被试因未理解实验内容而被排除, 共有 68 名符合纳入标准的参与者用于正式数据分析, 其中男性 24 人, 女性 44 人, 年龄介于 18 至 24 岁之间。

疼痛组($n = 32$)和对照组($n = 36$)的分组采用随机分组方法, 且在实验过程中进行单盲操作, 即被试不知晓其所属的具体组别。所有被试在参与实验前均接受了详细说明, 并在书面知情同意书上签字。本研究遵循《赫尔辛基宣言》的伦理准则, 实验方案通过了四川师范大学伦理委员会的批准。实验前被试被告知实验过程中将施加热痛刺激, 明确告知疼痛操纵失败的标准: 即在疼痛条件下, 疼痛强度评分低于 3 分; 或在对照条件下, 疼痛强度评分高于 3 分。所有参与者在实验结束后获得了相应的实验报酬, 以感谢其参与。

在实验进行前一天, 要求被试完成社会价值取向(Social Value Orientation, SVO; 李璿等, 2020)、自我纳入他人量表(Inclusion of Other in the Self Scale, IOS)和友谊质量量表(Friendship Quality Scale, FQQ)、贝克抑郁量表(Beck Depression Inventory, BDI)。在实验进行当天, 被试完成奖赏敏感性问卷(Reward Sensitivity Questionnaire, SPSRQ; Pizzagalli et al., 2009)和疲劳问卷(Fatigue Questionnaire, FS-14)。

本研究采用了社会心理学中常见的亲密关系筛选标准。研究在被试招募时, 要求每位被试填写 FQQ 及 IOS, 以确保被试与朋友之间具有较高的亲密度。在本研究中, 亲密他人定义为与被试保持密切情感联系的同性好友, 并在 FQQ 量表中得分不低于 60 分(满分 100 分), 确保两者在社交互动、信任感及情感投入方面的紧密关系。所有被试均为独立参与者, 并未成对参加实验。为保证实验操作的一致性, 被试需在实验任务前指定一位亲密好友, 并在实验过程中反复强调该亲密他人是其指定的好友。

2.2 疼痛诱发操作

疼痛诱发过程基于安全和无创的热/辣椒素致敏模型(Modir & Wallace, 2010)。参与者被随机分为疼痛组和对照组。疼痛组接受辣椒素乳膏(辣椒素 0.1%)的刺激以诱发急性疼痛, 对照组则接受不含刺激物的护手霜作为对照。在实验开始前, 将辣椒素乳膏涂抹于疼痛组被试左手手腕内侧的 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 区域, 并使用塑料薄膜覆盖此区域。这样做有两个目的: 第一, 确保乳膏与皮肤充分接触, 防止挥发; 第二, 积累手腕处的体温, 以增加疼痛感受。在对照组中, 进行相同的操作。

辣椒素诱发的疼痛具有持续性和累积性, 为了尽可能降低疼痛波动对实验数据的干扰, 在正式实验开始前, 要求被试每隔 5 分钟对疼痛强度进行评

分, 直至疼痛评分稳定在 3 分以上并持续 10 分钟后才开始正式实验。正式实验总时长控制在 50 分钟内, 避免长时间实验导致疼痛累积效应显著增加, 每组实验任务后都会让被试进行一次疼痛强度评分。为进一步避免疼痛累积导致的行为反应变化, 将任务顺序进行了平衡, 确保各被试在奖赏任务中经历的疼痛强度变化具有随机性, 从而减小系统性偏差。

本研究使用 0~10 分视觉模拟量表(0 对应“完全没有疼痛”, 10 对应“可想象的最严重疼痛”, Visual Analog Scale, VAS; Wang et al., 2018)对疼痛强度进行评估。参照已有研究(LaMotte et al., 1991), 疼痛评分 3 分通常被视为显著疼痛感知的起始点, 而非轻微不适的最低感知点。3 分以上的疼痛评分通常反映较强的疼痛刺激, 具有明显的主观不适感, 且更容易在行为和神经反应中体现疼痛诱发效应(Rainville et al., 1997)。因此, 本研究将 3 分作为区分疼痛组与对照组的阈值, 旨在确保疼痛组的疼痛强度足够明显, 同时排除对照组的潜在痛感干扰。实验结束后, 告知被试使用凉水清洗, 并为其涂抹舒缓凝胶进行降温处理。

2.3 实验程序

本实验采用了 2 (组别: 疼痛组 vs. 对照组) × 2 (奖赏类型: 个人奖赏 vs. 替代奖赏) × 3 (金钱线索: 0 元、1 元、3 元) 的混合实验设计。自变量包括 3 个: 组别(疼痛组与对照组)、奖赏类型(个人奖赏和替代奖赏)以及金钱线索(0 元、1 元、3 元)。因变量则是奖赏加工过程中记录的行为指标(按键反应时、动机评分、愉悦感评分等)和神经指标(事件相关电位的不同成分, 如 CNV、P2、P3、FRN)。根据 Knutson 等人(2001)提出的“动机显著性模型(Motivational Salience Model)”, 中等幅度的金钱奖赏(如 1 元、3 元)能够有效激发个体的奖赏动机, 同时避免极端奖赏(如 10 元、20 元)带来的非线性反应。已有研究表明, 奖赏金额与个体动机的关系并非线性增长, 奖赏金额在较低水平时对动机的提升更显著, 而当金额超过一定阈值时, 额外增加的奖赏仅带来较小的动机提升(Sescousse et al., 2010), 且较大的奖赏金额可能引发被试对“经济收益最大化”的过度关注, 导致其将注意力从实验任务本身转移到对奖赏的计算上(Botvinick & Braver, 2015)。因此, 1 元与 3 元的奖赏差异能够在提供有效动机的同时, 降低额外的认知干扰。通过这些因变量, 可以深入探讨疼痛对个人奖赏和替代奖赏加工的

影响。

参与者首先随机分为疼痛组和对照组。在实验任务中, 所有参与者需要完成 MID 任务, 该任务包含个人奖赏(为自己获得金钱)和替代奖赏(为亲密好友获得金钱)两种情境。每个试次开始时, 屏幕上会出现 0 元、1 元或 3 元的金钱线索, 提示可能获得的奖赏金额。参与者需尽快按键反应以获得相应奖赏。行为测量包括按键反应时、按键次数、动机评分和愉悦感评分, 以评估参与者在不同条件下的奖赏动机和情绪反应。神经测量记录参与者在奖赏预期阶段(如 CNV、P2、P3)和奖赏体验阶段(如 FRN、P3)的神经活动。具体实验操作及流程如下。

2.3.1 实验操作

在实验进行当天, 首先要求被试填写一些调查问卷, 接着让被试进行基线按键水平测试, 测试结束后进行脑电帽的佩戴以及疼痛诱发操作。两组被试分别涂抹上辣椒素软膏和护手霜后被告知: 软膏会逐渐生效, 20~30 分钟后会产生稳定疼痛感受。被试需在正式实验中完成一项改编后的金钱激励延迟任务(Knutson et al., 2001), 除了基本的实验报酬外, 被试在任务中可以为自己和朋友获得额外的金钱奖赏。具体的实验操作内容包括基线测试阶段。在此阶段, 被试看到一个空白屏幕, 随后出现一个十字注视点。被试需在十字注视点出现的同时进行按键反应, 具体操作为在十字注视点出现的期间根据自身手速不断地按下空格键, 十字注视点消失时停止按键。该阶段的平均按键次数作为被试的基线按键水平(见图 1A)。

在练习阶段和正式阶段(见图 1B), 被试首先看到一个短暂的注视点, 随后出现“正方形”或“圆形”两个图形。图形中会出现“¥0”、“¥1”、“¥3”三种不同的金钱线索, 用于提示被试在该试次中可能会获得的金钱奖赏。在练习阶段, 不匹配金钱奖赏, 只出现图形。其中, “正方形”提示该试次被试将为自己获得相应的金钱奖赏(个人奖赏), 而“圆形”提示该试次被试将为朋友获得相应的金钱奖赏(替代奖赏)。在线索阶段, 进一步向被试强调: “在替代奖赏任务中, 您正在为您的亲密好友获取奖赏。”这种操作旨在强化被试在任务中对亲密他人的心理表征, 确保替代奖赏的社会情境充分建立。随后出现一个较长的注视点, 注视点结束后会出现“礼物盒”, 被试需要在“礼物盒”出现的同时进行按键反应。正式阶段与基线测试阶段的按键操作一致。当“礼物盒”消失后, 被试停止按键。接着出现一个

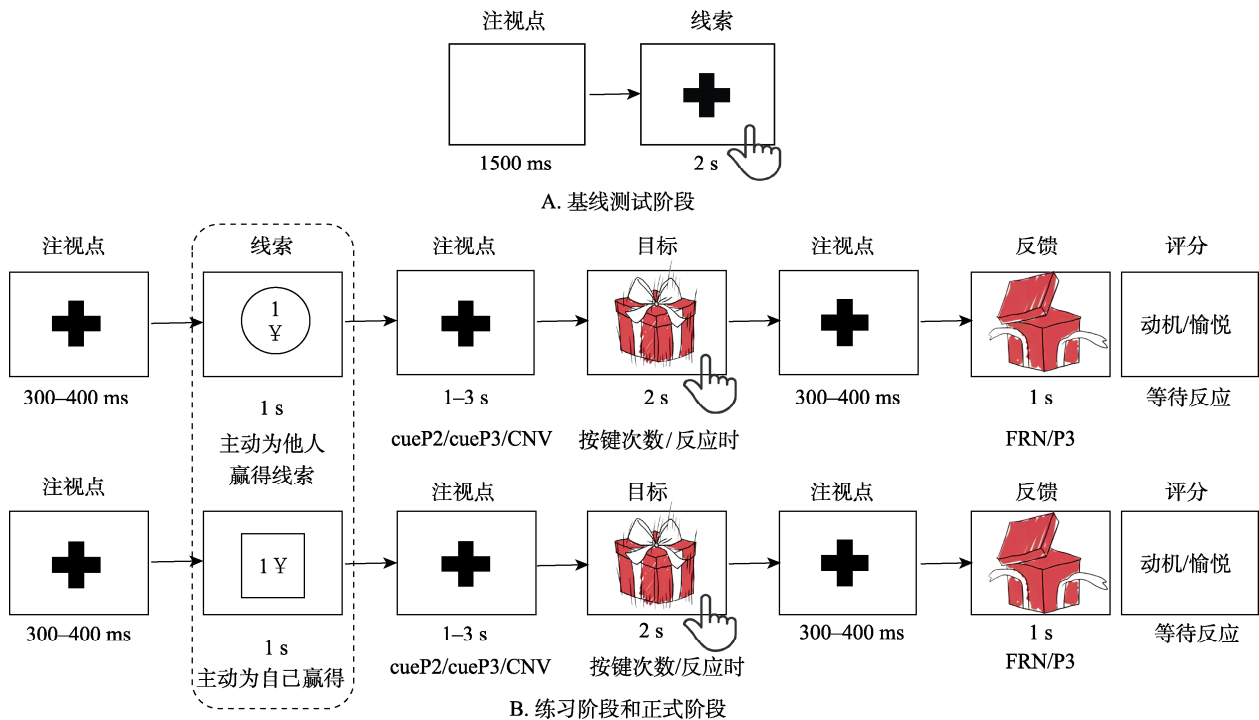


图 1 实验流程

短暂注视点, 之后给予被试按键反馈, 被试得知是否打开了“礼物盒”获得前面图形提示中的金钱奖赏。最后, 被试根据该试次中金钱奖赏带给他们的动机、反馈后的愉悦感进行评分, 并评估当前的满足与幸福感, 使用 11 点评分(0 对应“完全没有动机/愉悦感/满足与幸福感”, 10 对应“最强烈的动机/愉悦感/满足与幸福感”)。被试完全理解实验内容及流程后进行正式实验, 并再次呈现指导语以及相关提示。

2.3.2 实验流程

本研究的实验程序使用了 E-prime 2.0 进行编写, 采用了比较柔和的灰色(RGB: 242, 242, 242)作为刺激背景。实验过程采用事件相关电位技术进行记录, 该技术具有高时间分辨率, 能够区分奖赏加工的预期阶段和体验阶段(Ait Oumeziane et al., 2019)。鉴于被试之间可能存在个体差异, 在进行正式的脑电实验之前, 我们通过一个简单的基线测试来记录被试在正常情况下的按键水平, 作为后续数据分析的基线条件。基线测试阶段共包括 3 个试次, 首先呈现 1500 ms 的空白屏幕, 然后出现一个 2 s 的十字注视点, 记录该屏幕上的按键次数(见图 1A)。

练习阶段共包括 6 个试次, 其中个人奖赏和替代奖赏各有 3 个试次。每个试次首先呈现 300~400 ms 的注视点, 然后呈现 1 s 的“正方形”或“圆形”进行提示。图形消失后, 随机呈现 1~3 s 的注视点, 接着出现 2 s 的按键目标“礼物盒”。按键结束后再次呈

现 300~400 ms 的注视点, 给予相应的反馈, 反馈时间持续 1 s。反馈结束后, 被试对动机、愉悦感以及满足与幸福感进行评分, 评分时间根据被试的反应进行调整(见图 1B)。在练习阶段结束后, 对被试进行询问, 确保他们熟悉实验流程并准确记住了“正方形”或“圆形”所代表的奖赏类型。

正式阶段包括个人奖赏和替代奖赏两个部分, 每部分包含 3 组实验, 每组包含“¥0”、“¥1”、“¥3”三种金钱线索条件各 17 个试次, 共 306 个试次, 持续约 50~60 分钟, 线索以伪随机的方式呈现。每部分包含的 3 组实验获得金钱奖赏的概率分别为 58.8%、64.7%、76.5%, 平均奖赏概率为 66.67%。正式阶段的实验流程与练习阶段一致, 但在 1 s 的“正方形”或“圆形”中会匹配不同的金钱线索提示。正式阶段开始前指导语为: “当屏幕中出现礼物盒时, 按键反应越快, 次数越多, 成功打开礼物盒并获得奖励的概率越高”。个人奖赏和替代奖赏两个部分的实验开始前会分别在屏幕上告知: “接下来你将会为自己/朋友获得奖赏”。按键结束后会出现 4 种不同的反馈, 成功开盒则会出现上述三种不同的金钱奖赏, 相反则盒子保持关闭。每个试次的反馈结束后, 被试需要根据金钱奖赏的不同对动机、愉悦感进行评分, 每组实验结束后还需要对满足与幸福感进行评分。被试在任务开始前、任务中间以及任务结束后对疼痛强度进行评分(见图 1B)。

2.4 数据的采集与分析

在本研究的不同分析层面, 我们采用了不同的金钱奖赏分类方式。行为数据(按键次数、按键反应时)、动机评分、享乐评分以及奖赏加工预期阶段的 ERP 成分主要衡量奖赏预期阶段的反应, 因此按照金钱线索(0、1、3)进行划分。享乐评分主要衡量对金钱奖赏的主观体验, 因而采用 0、1、3 的分组方式, 以关注不同奖赏水平的体验差异(Rutledge et al., 2014)。而奖赏加工体验阶段的 ERP 成分主要反映奖赏反馈处理, 因此依据金钱反馈(0、1、3、未获得)进行划分。

2.4.1 行为数据的采集与分析

在基线测试阶段, 记录了被试的基线按键水平。在正式阶段, 记录被试的按键次数、按键反应时以及动机评分, 用以评估被试对获得金钱奖赏的动机程度; 记录被试的享乐评分, 以评估被试对不同金钱奖赏的愉悦感受。将正式阶段和基线测试阶段之间的按键差异(按键差异=正式阶段按键次数-基线按键水平)用于数据分析。分析采用 SPSS 24 软件进行 2 (组别: 疼痛组 vs. 对照组) × 2 (奖赏类型: 个人奖赏 vs. 替代奖赏) × 3 (金钱线索: 0 元、1 元、3 元) 的多因素重复测量方差分析。

2.4.2 ERP 数据的采集与分析

研究使用 Brain Products 脑电系统来采集和记录脑电数据, 采用 10~20 国际标准扩展的 64 导联电极帽, 在线参考点位于 FCz 电极, 接地点位于 AFz 电极, 垂直眼电(EOG)电极放置于右眼眶正下方 1 cm 处。数据采样频率为 500 Hz, 带通滤波设置为 0.05~100 Hz, 确保所有电极的电阻均小于 10 K Ω 。脑电数据分析采用 Analyzer 2.2 进行。离线分析过程中, 重新设置了双侧乳突(TP9、TP10)作为参考点, 并通过独立主成分分析(ICA)去除了所有电极上的垂直眼电等伪迹。离线数据的带通滤波设置为 0.1~30 Hz, 伪迹剔除标准设定为 $\pm 80 \mu\text{V}$, 基线设为刺激出现前的 200 ms。本研究的主要关注点是奖赏加工的预期和体验阶段, 对应于 MID 中金钱线索和反馈诱发的 ERP。金钱线索提示诱发的 ERP 分段时程为-200 至 2000 ms, 反馈诱发的 ERP 分段时程为-200 至 800 ms。对每个实验条件剔除伪迹后的试次数进行叠加平均, 最后对所有被试的不同条件分别进行了总平均。

基于以往有关奖赏加工和 MID 的研究(Barman et al., 2015; Flores et al., 2015; Goerlich et al., 2017), 确定了每个 ERP 成分的电极位置和时间窗。在奖

赏加工的预期阶段, 主要关注疼痛组和对照组在 MID 中由不同金钱线索引起的 cue-P2、cue-P3 以及 CNV 的差异。cue-P2 的时间窗为线索出现后 220~320 ms, 选取中央顶叶区域(包括 Cz、C1、C2、CPz、CP1、CP2)的电极位置并使用算术平均值计算平均波幅; cue-P3 的时间窗为线索出现后 320~420 ms, 选取顶枕叶区域(包括 Pz、P3、P4、CP1 和 CP2)电极位置用于计算平均波幅; CNV 的时间窗为提示开始后的 750~1000 ms, 选取额中央区域(包括 FCz、Cz、C1 和 C2)电极位置用于计算平均波幅(Zhang et al., 2017)。对于金钱反馈诱发的 ERP, 主要关注疼痛组和对照组在 MID 中由不同反馈引起的 FRN 和 P3 的差异。FRN 的时间窗为反馈出现后的 240~350 ms, 前额中央区域(包括 FCz、Fz、FC1 和 FC2)电极位置用于计算平均波幅(Gu et al., 2017; Klawohn et al., 2021; Zhu et al., 2019); P3 的时间窗为反馈出现后的 230~450 ms, 顶枕叶区域(包括 Pz、P3、P4、CP1 和 CP2)电极位置用于计算平均波幅(Greimel et al., 2018; Zhang et al., 2017)。

采用重复测量方差分析来比较两组被试所有脑电成分的平均波幅。分析 cue-P2、cue-P3 以及 CNV 时, 组内变量为奖赏类型(个人奖赏、替代奖赏)、金钱线索(0、1、3), 组间因素为组别(疼痛组、对照组); 分析 FRN 和 P3 时, 组内变量为奖赏类型(个人奖赏、替代奖赏)、金钱反馈(0、1、3、未获得), 组间因素为组别(疼痛组、对照组)。在进行差异检验时, 如果违反了球形假设, 则经过 Greenhouse-Geisser 校正后报告 p 值。在进行多重比较时, 使用 Bonferroni 方法对 p 值进行了校正, 显著性水平 α 为 0.05。

3 结果

3.1 人口学变量及问卷结果

对人口学变量进行独立样本 t 检验, 结果显示疼痛组和对照组在年龄和性别上差异不显著。结果显示在 FQQ (友谊质量量表)、IOS (自我纳入他人量表)、SVO (社会价值取向量表)、BDI (贝克抑郁量表)、SPRSQ (奖赏敏感性问卷)和 FS-14 (疲劳问卷)中组别的主效应均不显著, 疼痛组和对照组在量表结果上均无差异(表 1)。

3.2 疼痛操作性检验结果

实验过程中在每组实验结束后对疼痛操作进行了检查, 共进行了 6 次疼痛感受评分。通过对组别(疼痛组、对照组)、奖赏类型(个人奖赏、替代奖赏)和疼痛评分时间(1、2、3)的方差分析来进行检查(图 2)。

表 1 参与者人口学特征及量表统计($M \pm SD$)

| 变量 | 疼痛组($n = 32$) | 对照组($n = 36$) | 统计分析 |
|----------|------------------|------------------|---------------------------|
| 年龄 | 19.19 \pm 1.45 | 20.03 \pm 2.09 | $t(66) = 1.90, p = 0.06$ |
| 性别(男/女) | 12/20 | 12/24 | - |
| 优势手(右/左) | 32/0 | 32/0 | - |
| FQQ | 72.59 \pm 9.97 | 74.36 \pm 8.64 | $t(66) = 0.78, p = 0.44$ |
| IOS | 5.5 \pm 1.02 | 5.47 \pm 1.13 | $t(66) = -0.11, p = 0.92$ |
| SVO | 1.72 \pm 0.52 | 1.67 \pm 0.54 | $t(66) = -0.41, p = 0.69$ |
| BDI | 7.06 \pm 6.41 | 9.14 \pm 6.46 | $t(66) = 1.33, p = 0.19$ |
| SPRSQ | 7.81 \pm 2.52 | 8.42 \pm 2.08 | $t(66) = 1.08, p = 0.28$ |
| FS-14 | 5.53 \pm 3.56 | 6.58 \pm 2.99 | $t(66) = 1.32, p = 0.19$ |

注: FQQ: 友谊质量量表; IOS: 自我纳入他人量表; SVO: 社会价值取向, 1: 个人取向; 2: 亲社会倾向, 平均值接近 2, 表明大多数参与者都是亲社会个体; BDI: 贝克抑郁量表; SPRSQ: 奖赏敏感性问卷; FS-14: 疲劳问卷。

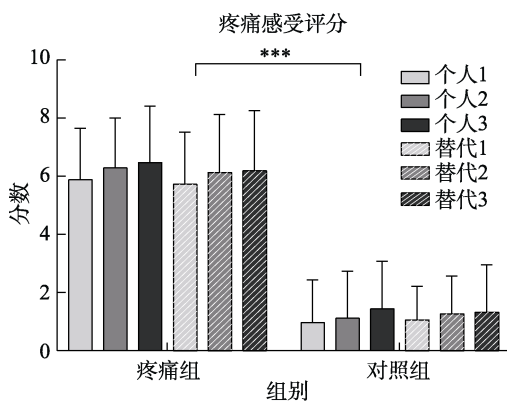


图 2 不同时间和奖赏类型下的疼痛感受变化

注: 误差线为标准差(SD); * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$; 下同。

结果显示疼痛评分的组别主效应显著, $F(1, 64) = 190.29, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.75$, 疼痛组(6.11 ± 0.26)评分大于对照组(1.19 ± 0.25), 表明疼痛操作有效, 辣椒素成功诱发了急性疼痛; 评分时间主效应显著, $F(2, 64) = 15.43, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.194$, 组别和评分时间的交互作用不显著($p = 0.334$), 表明疼痛感虽然存在一定时间波动, 但疼痛组与对照组的评分变化趋势类似, 即疼痛效应具有稳定性, 且疼痛感受能够一直持续到实验结束; 奖赏类型主效应($p = 0.63$)以及组别和奖赏类型的交互作用均不显著($p = 0.472$), 表明在个人奖赏和替代奖赏两种条件下, 疼痛组和对照组组内疼痛评分无差异(6.21 ± 0.28 vs. $6.01 \pm 0.28, p = 0.403$; 1.18 ± 0.27 vs. $1.22 \pm 0.27, p = 0.403$)。

对照组的疼痛评分约为 1 分(VAS ≈ 1), 这一现象可能受到非实验因素干扰。一方面, 虽然使用的护手霜不含辣椒素成分, 但少数皮肤敏感个体在涂抹及覆盖过程中可能感受到轻微物理刺激(如紧绷或发热感); 另一方面, 由于对照组与疼痛组接

受了相同的实验流程(如膏体涂抹、薄膜包裹), 可能引发一定程度的预期效应或安慰剂反应。为进一步验证上述解释, 我们在实验结束后对对照组被试进行了非正式访谈。结果显示, 疼痛评分接近 1 分的被试普遍报告“感受到皮肤略有发热或紧绷”, 但未出现持续性或显著不适感。符合已有文献中对安慰剂效应(placebo effect)的描述(Wager et al., 2004)。

综上, 疼痛操作效果显著, 且疼痛感受在任务过程中保持稳定。奖赏类型未对疼痛感受产生调节效应, 表明本研究中疼痛诱导效果在不同任务情境下具有一致性, 为后续疼痛-奖赏交互机制的分析提供了稳定基础。

3.3 行为结果

3.3.1 评分结果

对评分结果的分析表明: 满足与幸福感评分的奖赏类型主效应显著, $F(1, 64) = 35.35, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.36$, 替代奖赏(7.04 ± 0.20)的评分大于个人奖赏(5.65 ± 0.24), 表明无论在疼痛组还是对照组, 为朋友努力获得金钱奖赏时更加幸福(图 3A); 组别主效应不显著($p = 0.988$), 疼痛组与对照组的评分没有显著差异, 表明疼痛状态并未影响整体满足与幸福感评分; 组别和奖赏类型的交互作用不显著($p = 0.109$), 表明无论是否处于疼痛状态, 个体对替代奖赏的幸福体验始终高于个人奖赏。

动机评分金钱线索主效应显著, $F(2, 64) = 112.22, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.64$, 表明主观动机评分随金钱奖赏大小的增加而增加; 金钱线索和组别的交互作用显著, $F(2, 64) = 4.225, p = 0.017, \eta_p^2 = 0.062$, 简单效应分析同样表明, 两组被试的动机强度都随金钱奖赏的增加而增加; 组别主效应($p = 0.412$)、奖赏类型主效应($p = 0.713$)、组别和奖赏类型的交互作

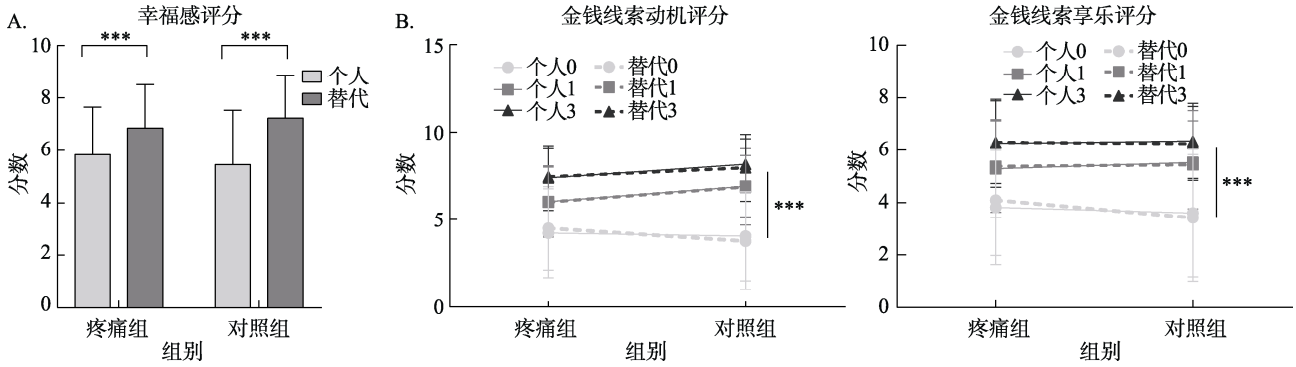


图3 A. 个人奖赏和替代奖赏的幸福感受评分; B. 不同奖赏类型和金钱线索的动机与享乐评分

用($p = 0.162$)、金钱线索和奖赏类型的交互作用($p = 0.863$)以及三者的交互作用($p = 0.121$)均不显著,表明金钱线索的奖赏价值调节了动机。享乐评分的金钱线索主效应显著, $F(2, 64) = 99.29, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.61$,表明个体获得的主观愉悦感同样随金钱奖赏的增加而增强;组别主效应($p = 0.816$)、奖赏类型主效应($p = 0.952$)、组别和金钱线索的交互作用($p = 0.237$)、组别和奖赏类型的交互作用($p = 0.321$)、金钱线索和奖赏类型的交互作用($p = 0.703$)以及三者的交互作用($p = 0.232$)均不显著,表明奖赏价值对愉悦感的提升作用是一致的,不受疼痛状态或奖赏对象影响(图 3B)。

3.3.2 按键结果

对按键结果的分析表明,按键差异的组别主效应显著 $F(1, 66) = 10.21, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.13$,表明疼痛组与对照组在任务期按键变化(相较基线)上存在显著差异。具体来看,疼痛组平均按键差异为正值(0.45 ± 0.28),表现出相较基线的按键增加趋势;而对照组的按键差异为负值(-0.8 ± 0.27),呈现出按键减少的趋势(图 4A)。这一结果显示,疼痛组在金钱奖赏任务中表现出更强的动机倾向,特别是在面对潜在金钱奖赏时,疼痛状态显著增强了他们的动机。这一发现支持了疼痛对动机系统的激活作用,突出了疼痛环境下个体对奖赏刺激的敏感性。按键反应时的组别主效应同样显著 $F(1, 66) = 6.68, p = 0.012, \eta_p^2 = 0.09$,疼痛组(378.07 ± 20.73)反应时显著短于对照组(451.68 ± 19.54),进一步验证了疼痛对金钱奖赏动机的促进作用(图 4B)。

按键差异的金钱线索主效应显著, $F(2, 66) = 18.8, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.22$,0元(-1.133 ± 0.34)小于1元(0.13 ± 0.19)小于3元(0.48 ± 0.20);按键反应时的金钱线索主效应显著, $F(2, 66) = 5.19, p = 0.026, \eta_p^2 = 0.07$,0元(468.49 ± 35.95)大于1元(390.3 ± 8.42)

大于3元(385.83 ± 8.81),上述结果表明三种不同金钱线索的操作有效,动机强度随着金钱奖赏的增加而增加。按键差异和按键反应时的奖赏类型主效应($p = 0.528; p = 0.872$)均不显著,表明个人奖赏($-0.22 \pm 0.19/415.49 \pm 15.43$)和替代奖赏($-0.13 \pm 0.22/414.25 \pm 14.05$)加工的预期阶段无差异,替代奖赏表现出与个人奖赏一致的动机变化模式;按键差异和按键反应时的组别和奖赏类型交互作用($p = 0.879; p = 0.507$)以及三者交互作用($p = 0.632; p = 0.31$)均不显著,表明疼痛主要通过整体提升动机,而不是改变奖赏类型或奖赏价值对动机的调节方式(图 4)。

在按键差异和按键反应时的分析中都发现金钱线索和组别的交互作用显著, $F(2, 66) = 3.19, p = 0.044, \eta_p^2 = 0.05; F(2, 66) = 3.06, p = 0.05, \eta_p^2 = 0.04$ 。为了进一步检验金钱线索和组别的交互作用,将个人奖赏和替代奖赏条件下的按键差异和按键反应时进行平均后,再对金钱线索和组别进行了两因素交互作用的分析。结果发现按键差异组别和金钱线索的主效应显著($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.07; p < 0.001, \eta_p^2 = 0.09$);金钱线索和组别的交互作用显著($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.02$);按键反应时组别和金钱线索的主效应显著($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.04; p < 0.001, \eta_p^2 = 0.04$);金钱线索和组别的交互作用显著($p < 0.001, \eta_p^2 = 0.02$)。这些结果共同表明,无论是疼痛组还是对照组,动机强度均随金钱奖赏的增加而增强,但两组的表现存在显著差异,疼痛组表现出更强的动机驱动。具体来说,在相同大小的金钱奖赏下,疼痛组的动机明显强于对照组,且在所有金钱线索条件下,疼痛组的动机强度均高于对照组,说明了疼痛对奖赏动机的普遍提升作用。尽管对照组在三种金钱线索之间的动机差异显著,但疼痛组的内部差异有所缩小,表明疼痛不仅增强了整体动机,还在一定程度上平衡了不同金钱线索之间的动机差异。

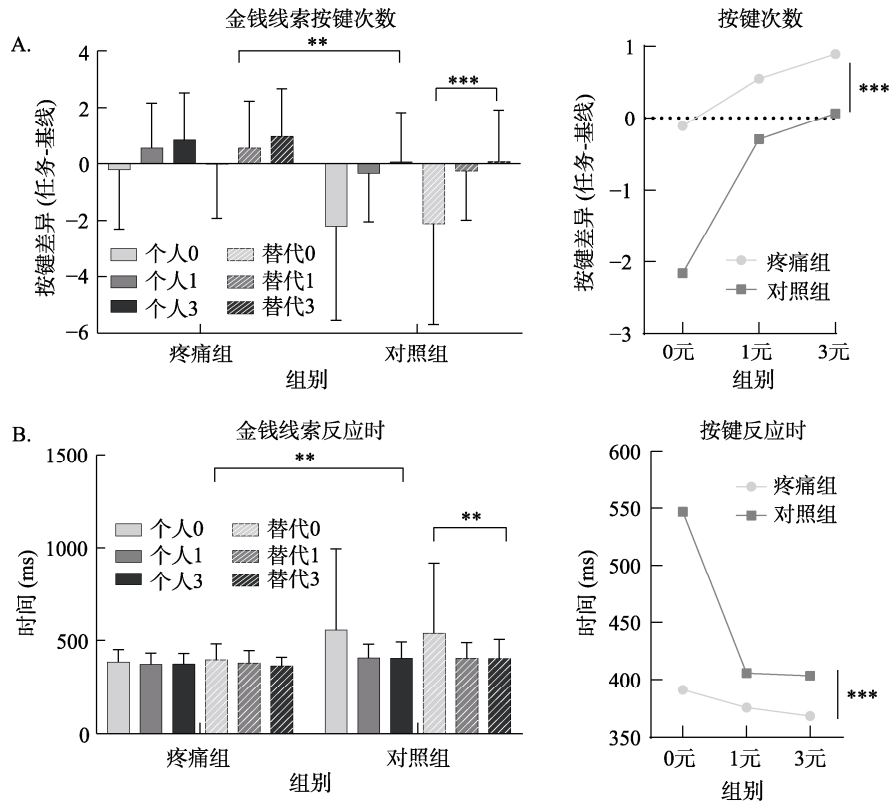


图 4 A. 不同奖赏类型和金钱线索的按键次数; B. 不同奖赏类型和金钱线索的按键反应时

虽然对照组在三种金钱线索之间的动机差异显著,但疼痛组在不同金钱线索下的表现更加一致,呈现出一种“动机趋同”的效应,即对高、低奖赏线索的动机反应差距缩小。这种现象可被理解为疼痛状态下奖赏加工系统的广域激活效应:在生理威胁状态中,个体对所有正向刺激均表现出增强的敏感性和趋向反应(Fields, 2007; Leknes & Tracey, 2008),即便是低奖赏也可激发较强的动机投入(Berridge & Robinson, 1998)。神经机制上,这一现象可能与中脑边缘结构(如伏隔核和前扣带皮层)对负性状态与奖赏线索整合的功能有关(Shackman et al., 2011)。这些结果共同提示:疼痛状态不仅激发了更高的总体动机水平,还促使个体对不同奖赏水平的加工更加一致,从而体现出对奖赏动机的普遍性提升与均衡化调节,且这一效果不受奖赏类型(个人奖赏与替代奖赏)的影响(图 4)。

3.4 ERP 结果

(1) 奖赏预期阶段 ERP

cue-P2 cue-P2 的组别主效应显著, $F(1, 66) = 6.46, p = 0.013, \eta_p^2 = 0.09$, 疼痛组($2.82 \pm 0.95 \mu V$)比对照组($-0.59 \pm 0.95 \mu V$)诱发了更大的波幅,提示个体在疼痛状态下对奖赏线索的早期注意资源分配与情绪唤醒水平整体提升。这一结果表明疼痛

组在此类任务中可能普遍存在更大的 cue-P2 波幅,可能反映了疼痛状态下更广泛的情绪反应性,而非仅针对奖赏刺激的特异性反应。奖赏类型主效应显著, $F(1, 66) = 4.95, p = 0.029, \eta_p^2 = 0.07$, 个人奖赏($1.67 \pm 0.69 \mu V$)比替代奖赏($0.56 \pm 0.75 \mu V$)诱发更大的波幅,这一结果表明尽管疼痛增强了奖赏相关线索的整体加工,但个体对与自我相关的奖赏信息仍具有更强的早期注意偏向。P2 波幅通常受外部刺激的情绪唤醒水平与显著性影响(Carretié, 2014),而个人奖赏与个体动机系统高度相关,往往在早期加工阶段即引发更强的神经反应。这一结果与“自我奖赏优先效应”相一致,即个体对自我相关的奖赏更具敏感性和加工优势(Sui & Humphreys, 2015)。因此,尽管疼痛状态激活了整体奖赏加工系统,但在 cue-P2 阶段,个体依然保留了对自我奖赏的初始加工优势。金钱线索的主效应显著, $F(2, 66) = 3.35, p = 0.038, \eta_p^2 = 0.05$, cue-P2 波幅随着金钱奖赏的增加而增大。这一结果表明,随着奖赏金额的增加,个体对奖赏刺激的情绪反应也随之增强。这种波幅变化模式与按键反应差异的结果模式相似,均显示出动机随奖赏金额增大的趋势,且两组在斜率上的表现存在差异。值得注意的是,奖赏类型与金钱线索的交互作用边缘显著, $F(2, 66) = 2.73, p =$

0.069, $\eta_p^2 = 0.04$, 简单效应分析表明, 在个人奖赏中, 相比于替代奖赏, 1 元和 3 元金钱线索诱发了更大的 cue-P2 波幅。这一现象与行为数据中的结果一致, 提示了 cue-P2 波幅的变化可能与动机行为的变化密切相关, 尤其是在个人奖赏的情境下, 两者的变化趋势高度吻合。如果进一步分析发现 cue-P2 波幅与行为反应存在显著相关性, 这将为解释疼痛组 and 对照组在奖赏加工中的差异提供更有力的支持(图 5)。组别和金钱线索($p = 0.288$)、奖赏类型($p = 0.337$)交互作用以及三者交互作用($p = 0.271$)均不显著, 表明疼痛整体增强了 cue-P2 波幅, 并未改变奖赏类型或奖赏价值对 cue-P2 的调节模式, 即疼痛对早期奖赏加工的普遍增强而非选择性调节。

CNV CNV 的奖赏类型主效应显著, $F(1, 66) = 4.92, p = 0.03, \eta_p^2 = 0.07$, 替代奖赏($-1.53 \pm 0.86 \mu\text{V}$)比个人奖赏($0.02 \pm 0.65 \mu\text{V}$)诱发了更负的波幅。这一结果可能提示个体在早期阶段对替代奖赏表现出更多的注意力偏向, 但由于 CNV 效应不够突出, 该结果在解释个体对奖赏的注意力分配时仍需谨慎。进一步研究可能需要探讨是否存在其他未捕捉的因素, 或利用其他方法来更好地理解替代奖赏与个人奖赏的注意力分配机制(图 5)。其他主效应与交互作用均不显著, 表明疼痛状态在此阶段未显著影响个体的行为准备或预期投入。

cue-P3 cue-P3 的组别主效应边缘显著, $F(1, 66) = 3.46, p = 0.068, \eta_p^2 = 0.05$ 。疼痛组($2.08 \pm 0.86 \mu\text{V}$)比对照组($-0.18 \pm 0.86 \mu\text{V}$)诱发了更大的波幅。这一结果表明, 疼痛组在奖赏任务中可能普遍表现出更大的情绪或注意反应, 而不仅仅是动机的增强。与 cue-P2 类似, 这种波幅差异可能反映了疼痛组整体神经反应的调节, 而非单纯由奖赏动机驱动。金钱线索的主效应显著, $F(2, 66) = 3.2, p = 0.044, \eta_p^2 = 0.05$, cue-P3 波幅随金钱奖赏的增加而增大, 这表明个体对奖赏刺激的动机或情绪反应随着奖赏金额的增加而增强。奖赏类型主效应不显著($p = 0.136$), 与 cue-P2 阶段不同的是, 在 cue-P3 中, 疼痛组对个人奖赏与替代奖赏之间的差异显著减弱, 呈现出较为一致的增强趋势。这种“奖赏类型差异的趋同”现象可能源于疼痛状态激活了更广义的动机系统, 使个体对不同类型奖赏线索均投入更多的认知资源。

此外, 金钱线索和组别的交互作用显著, $F(2, 66) = 3.32, p = 0.039, \eta_p^2 = 0.05$, 但需要注意的是, 疼痛组和对照组在不同金钱线索条件下的 cue-P3

波幅变化并未表现出一致的模式。简单效应分析表明, 在疼痛组中, 三种金钱线索均诱发了更大的 cue-P3 波幅, 尤其是 3 元金钱线索在疼痛组中诱发的 cue-P3 波幅显著大于对照组, 表明疼痛显著增强了个体对金钱奖赏的敏感性。这一增强效应反映出, 在急性疼痛的影响下, 个体对高奖赏刺激的神经反应显著提高, 表现出对奖赏价值的高度关注和动机激活。进一步分析发现与奖赏类型的三重交互作用并不显著, 说明疼痛对金钱奖赏敏感性的增强并不受奖赏对象的影响, 该效应在个人奖赏和替代奖赏上表现出一致性。这种一致性表明, 疼痛对奖赏金额的敏感性增强效应是普遍的, 无论奖赏是为了自己还是他人(图 6)。其他交互作用均不显著, 表明 cue-P3 更反映对奖赏价值的注意和动机反应。

具体而言, 疼痛组在各类奖赏线索条件下均表现出更大的 cue-P2、cue-P3 波幅, 提示疼痛状态可能普遍增强了个体对奖赏线索的加工能力。这种增强并非局限于某一特定的奖赏金额或奖赏类型, 而是广泛存在于所有奖赏条件中, 表现出一种跨情境的加工敏感性。cue-P2 作为金钱线索出现后约 200 ms 内的早期成分, 主要反映了外部显著性线索所引发的注意过程与情绪加工(Carretié, 2014)。而 cue-P3 成分则代表动机准备与预期处理过程, 与目标导向行为密切相关(Polich, 2007; Knutson et al., 2001)。疼痛组表现出更大的 cue-P2、cue-P3 波幅, 可能意味着个体在疼痛状态下对潜在的正性资源(即金钱奖赏)表现出更强的加工倾向。这一结果支持了先前理论观点, 即疼痛可激活与生存相关的动机系统, 进而放大对环境中潜在有利线索的敏感性与加工强度(Fields, 2007; Becerra et al., 2001)。因此, 尽管个体在早期注意阶段对个人奖赏具有偏向性, 但随着加工的深入, 疼痛所诱发的整体动机状态可能使得对不同奖赏类型的响应趋于一致, 体现出一种从选择性加工到普遍增强的动态调节过程, 使个体在受威胁或不适状态下更加关注外部资源, 从而优化应对策略。

(2) 奖赏体验阶段 ERP

FRN FRN 的金钱反馈主效应显著, $F(3, 66) = 15.66, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.19$, FRN 波幅随金钱奖赏的增加而增大, 表现为 0 元波幅($5.09 \pm 0.67 \mu\text{V}$)小于无奖赏($6.17 \pm 0.64 \mu\text{V}$), 无奖赏小于 1 元($6.44 \pm 0.71 \mu\text{V}$), 1 元小于 3 元($7.74 \pm 0.81 \mu\text{V}$)。这一结果表明, 个体对奖赏刺激的情绪价值体验随着金钱奖赏的增加而增强。这一模式与行为结果的奖赏动机

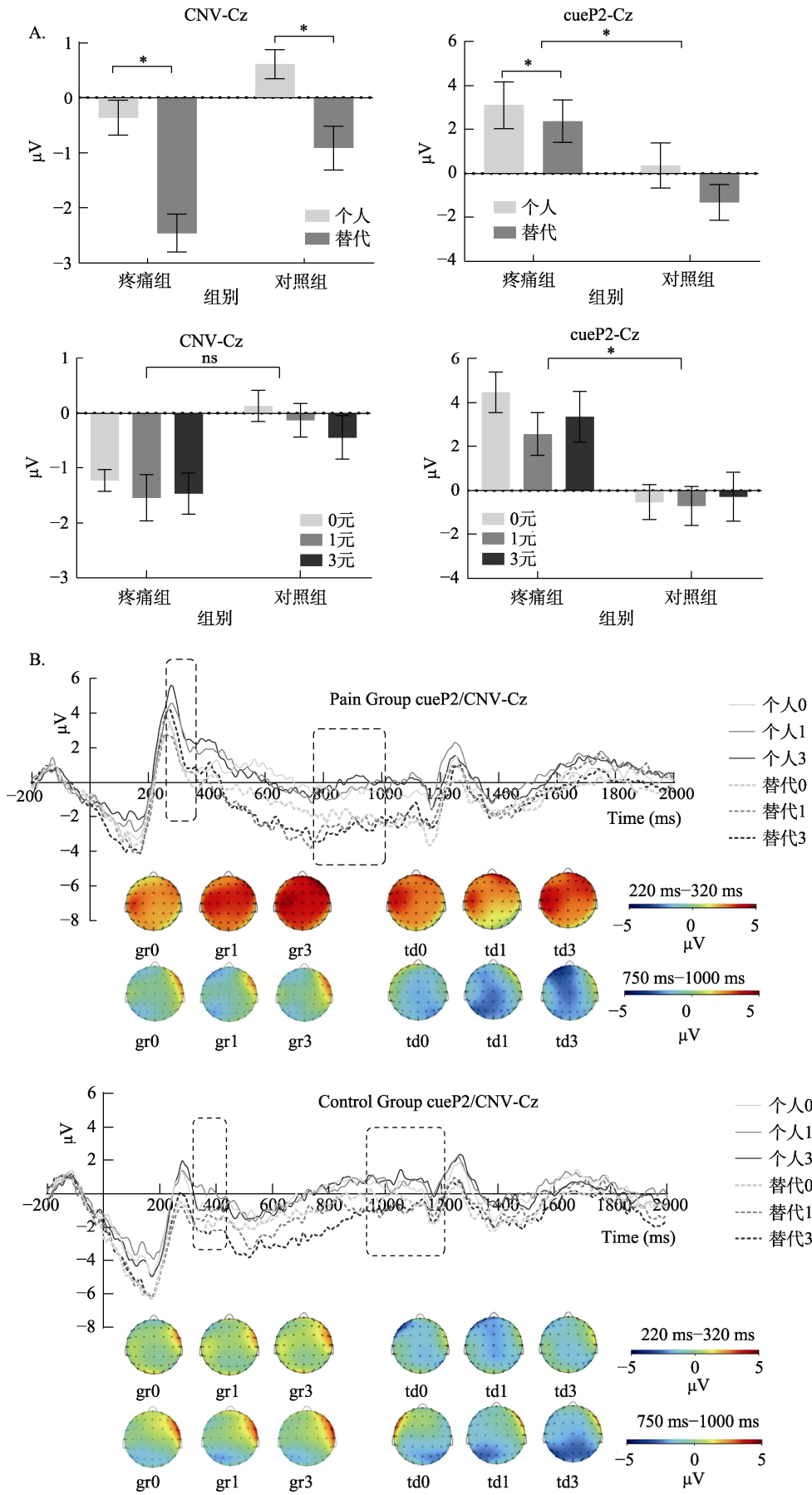


图 5 奖赏预期阶段 cue-P2/CNV 波形图、地形图：A. 不同奖赏类型和金钱线索；B. 疼痛组和对照组

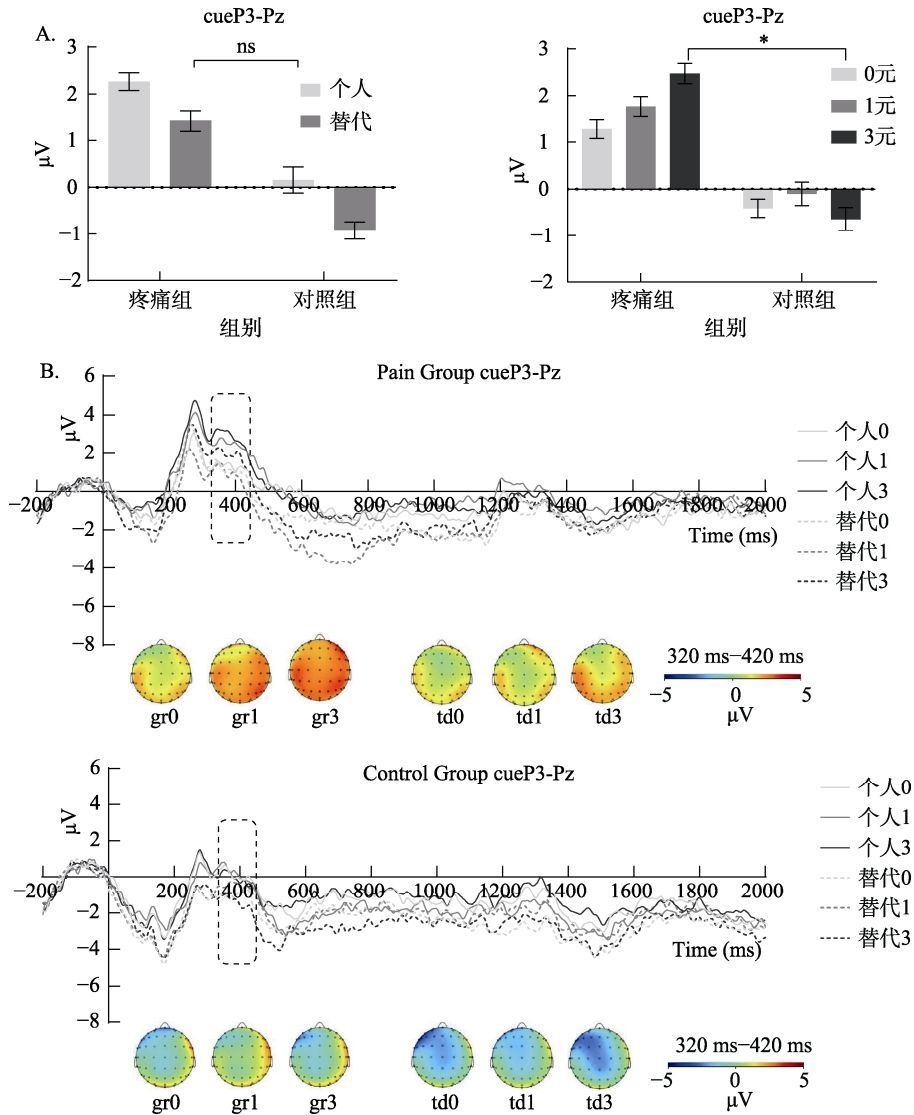


图 6 奖赏预期阶段 cue-P3 波形图、地形图: A. 不同奖赏类型和金钱线索; B. 疼痛组和对照组

随金钱奖赏增加的模式相似,提示了神经反应与行为动机之间可能存在一致性。奖赏类型和组别的交互作用显著, $F(1, 66) = 4.96, p = 0.029, \eta_p^2 = 0.07$, 简单效应分析边缘显著。具体而言, 对照组中, 个人奖赏的 FRN 波幅大于替代奖赏; 但在疼痛组中, 替代奖赏的 FRN 波幅略微大于个人奖赏。这一结果可能表明, 疼痛增强了个体对替代奖赏的情绪价值体验。该现象在疼痛组中的表现与行为结果的某些趋势一致, 特别是疼痛可能改变了对不同类型奖赏的反应模式, 不仅体现在神经层面, 也可能影响行为上的奖赏偏好(图 7)。其他主效应与交互作用均不显著, 表明疼痛不改变 FRN 的总体波幅大小, 在整体水平上个人奖赏和替代奖赏在差异不显著。

P3 P3 的金钱反馈主效应显著, $F(3, 66) = 21.73, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.25$, 无奖赏($8.17 \pm 0.62 \mu\text{V}$)小于 0

元波幅($8.55 \pm 0.61 \mu\text{V}$)小于 1 元($9.89 \pm 0.65 \mu\text{V}$)小于 3 元($10.67 \pm 0.76 \mu\text{V}$), 表明个体对奖赏刺激的动机和注意力控制随金钱奖赏的增加而增大(图 8)。值得注意的是, 组别、奖赏类型和金钱线索三者交互作用边缘显著, $F(3, 66) = 2.59, p = 0.054, \eta_p^2 = 0.04$ 。简单效应分析表明, 在对照组中个人奖赏条件下, 相比于 0 元和未获得条件, 1 元和 3 元诱发了更大的 P3 波幅; 替代奖赏条件下, 仅有 3 元条件的 P3 波幅显著大于其他条件。在疼痛组中结果正好相反, 个人奖赏条件下仅在 3 元条件下波幅较大, 替代奖赏条件中 1 元和 3 元都诱发了更大的 P3 波幅, 这一结果与 FRN 一致, 表明疼痛增强了个体对替代奖赏的神经敏感性与情绪价值体验。其他主效应与交互作用均不显著, 表明只有在特定奖赏价值水平下, 三者共同作用才表现出差异。

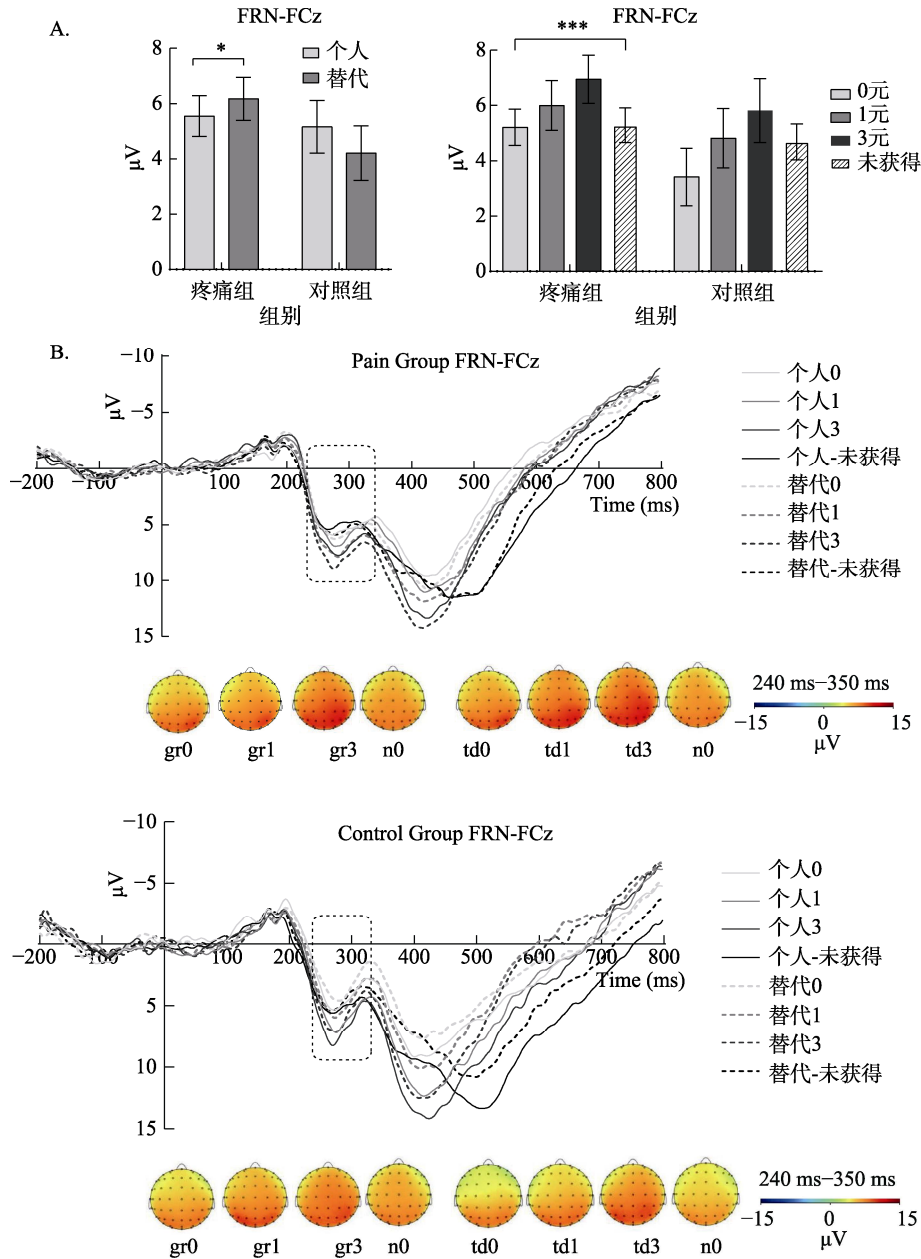


图 7 奖赏体验阶段 FRN 波形图、地形图：A. 不同奖赏类型和金钱线索；B. 疼痛组和对照组

FRN 是奖赏预测误差信号的经典电生理指标 (Holroyd & Coles, 2002)。已有研究表明, FRN 对未获得奖赏的反馈更为敏感, 通常表现为更大的负向波幅 (Hajcak et al., 2006)。本研究的 ERP 结果同样显示, 无奖赏条件下 FRN 波幅显著大于 0 元条件, 这一结果支持了未获得奖赏可能引发更强预测误差信号的假设。此外, P3 成分反映奖赏价值的加工和情绪投入 (Knutson et al., 2001; Yeung & Sanfey, 2004)。研究结果显示, 0 元条件下 P3 波幅同样大于无奖赏条件, 表明尽管奖赏金额为零, 但任务成功的情境仍可能导致较高的情感投入和认知资源分配。

(3) ERP 结果与行为结果的相关性

相关分析基于 68 位被试的平均数据, 具有统计意义, 提示奖赏预期阶段与奖赏体验阶段存在阶段性联结。按键差异与按键反应时之间存在显著的负相关关系 ($r = -0.44, p < 0.001$), 这一结果表明, 按键差异越大, 即被试的动机越高, 其反应时越短, 反映了动机强度的提升对反应速度的促进作用。按键差异与 cue-P3 呈现出显著正相关 ($r = 0.13, p = 0.008$), 这表明被试的动机强度越大, 在奖赏预期阶段的 cue-P3 波幅越高, 暗示动机提升与奖赏预期阶段神经活动增强的相关性。cue-P2 与 cue-P3 之间存在显著正相关 ($r = 0.33, p < 0.001$), 表明在

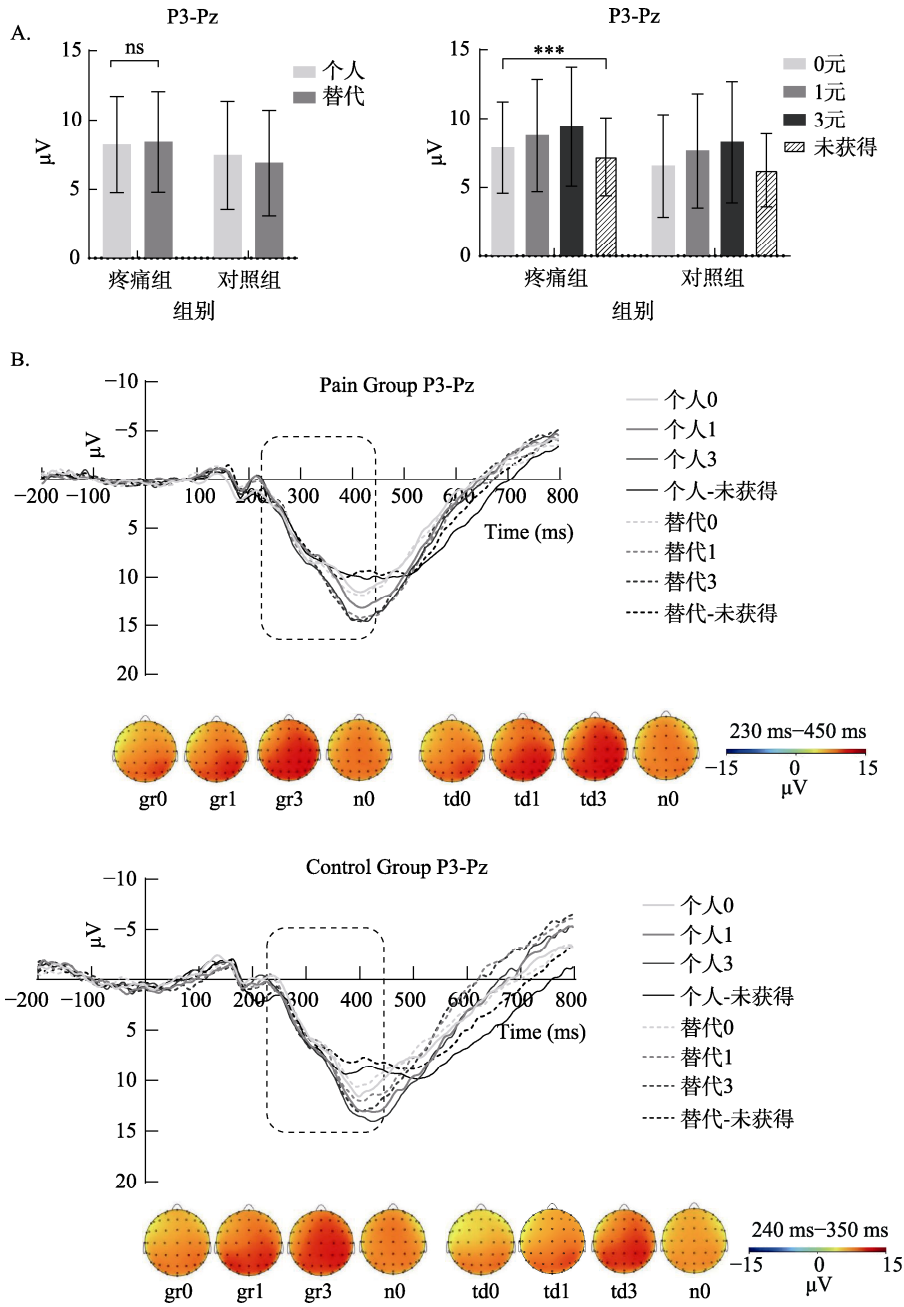


图 8 奖赏体验阶段 P3 波形图、地形图: A.不同奖赏类型和金钱线索; B.疼痛组和对照组

奖赏预期阶段, 早期神经反应 cue-P2 越强烈, 后期的 cue-P3 反应也越高, 这可能表明, 早期注意分配和动机的增强与后期奖赏预期阶段的动机和情绪反应进一步增强之间的关系。cue-P3 与 FRN 存在显著正相关($r = 0.19, p < 0.001$), 且与 P3 也呈正相关($r = 0.15, p = 0.002$), 这表明奖赏预期阶段的神经活动 cue-P3 与奖赏体验阶段的奖赏反馈反应 FRN 和愉悦体验反应 P3 具有一致性, 可能反映了动机与奖赏加工过程的连续性, 即奖赏预期越高, 体验阶段的情绪和愉悦反应也越强。FRN 和 P3 之间存在高度显著的正相关关系($r = 0.73, p < 0.001$)。

这表明在奖赏体验阶段, 个体对奖赏反馈的情感反应 FRN 与愉悦体验 P3 之间存在密切关系, 提示反馈的情绪价值与奖赏体验的愉悦感可能共同构成了奖赏加工的情绪反应(表 2)。

整体来看, 按键差异动机强度与 cue-P3 的相关性, 表明动机提升会增强奖赏预期的神经反应。cue-P3 与 FRN、P3 之间的显著相关性进一步揭示了奖赏预期与体验的连续性, 动机和预期的增强会转化为体验阶段的情绪和愉悦反应。最终, FRN 与 P3 的强相关表明奖赏反馈的情绪和愉悦体验是奖赏加工的核心成分, 且二者在奖赏体验阶段紧密结

表 2 行为结果与 ERP 结果相关性

| 变量 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| 1. 按键差异 | 相关系数 | 1.000 | -0.44** | 0.01 | 0.13** | 0.04 | 0.02 |
| | 显著性 | | 0.000 | 0.896 | 0.008 | 0.425 | 0.672 |
| 2. 按键反应时 | 相关系数 | | 1.000 | -0.03 | -0.05 | 0.09 | 0.01 |
| | 显著性 | | | 0.490 | 0.370 | 0.088 | 0.861 |
| 3. cue-P2 | 相关系数 | | | 1.000 | 0.33** | 0.03 | -0.04 |
| | 显著性 | | | | 0.000 | 0.505 | 0.442 |
| 4. cue-P3 | 相关系数 | | | | 1.000 | 0.19** | 0.15** |
| | 显著性 | | | | | 0.000 | 0.002 |
| 5. FRN | 相关系数 | | | | | 1.000 | 0.73** |
| | 显著性 | | | | | | 0.000 |
| 6. P3 | 相关系数 | | | | | | 1.000 |
| | 显著性 | | | | | | |

注：相关分析基于被试平均值, $df = 66$ 。* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

合。这些结果支持疼痛对奖赏动机的全面提升作用,并在奖赏预期和体验过程中表现出一致的神经反应。

4 讨论

本研究通过探讨急性疼痛对奖赏加工的影响,发现疼痛在多个方面调节了个体的奖赏动机和情绪反应。行为结果证实了先前的发现,发现急性疼痛主要影响个体对金钱奖赏加工预期阶段的动机成分,动机和愉悦感受都随着奖赏的价值而增加;在疼痛影响下,个人和替代奖赏加工模式的变化基本一致。此外,ERP 结果验证了上述行为结果,还通过神经活动进一步发现,急性疼痛不仅影响替代奖赏加工预期阶段的动机成分,还影响体验阶段的享乐成分,增强了个体对替代奖赏的情绪价值体验。以下将针对这些结果进行详细讨论。

4.1 疼痛对奖赏预期阶段的影响

在奖赏加工的预期阶段,本研究在行为和神经层面均发现疼痛显著增强个体的奖赏动机。具体而言,主观动机评分、按键结果与 ERP 指标(cue-P2、cue-P3 波幅)均随金钱奖赏价值的提升而增强,这一现象表明个体在面对高价值奖赏线索时,表现出更强的动机投入和早期注意资源分配,该结果与以往研究一致(Knutson et al., 2001; Polich, 2007)。此外,疼痛普遍增强了个体的奖赏动机倾向,表现为动机评分提高、按键差异扩大、反应时缩短以及 cue-P2、cue-P3 波幅增大,提示急性疼痛激活了与奖赏驱动、注意资源分配相关的动机系统(Fields, 2007; Becerra et al., 2001)。

然而,在奖赏类型加工上,行为层面上未发现

个人奖赏与替代奖赏之间的显著差异,反映出在疼痛状态下个体对自我奖赏与他人奖赏表现出的相似动机反应模式;然而,ERP 结果揭示了更为精细的加工差异。首先,个人奖赏诱发了更大的 cue-P2 波幅,相较于替代奖赏表现出更强的早期注意加工偏向,该现象可能反映“自我奖赏优先效应”(Sui & Humphreys, 2015),即即便在疼痛干扰下,个体仍优先分配有限的注意资源以感知与自身利益高度相关的奖赏信息。其次,替代奖赏诱发了更负的 CNV 波幅,这可能源于他人奖赏所激发的情感依恋与责任感(Telzer et al., 2010; Braams & Crone, 2017)。这些差异未能在后续动机输出中体现,提示疼痛可能通过增强整体动机系统活动,掩盖了奖赏类型间的行为表现差异,形成了早期加工阶段存在奖赏类型区分,后期动机输出趋于一致的分化模式。值得注意的是,cue-P3 波幅在高奖赏条件下显著增强,且疼痛组对个人奖赏与替代奖赏的 cue-P3 差异进一步减弱,表现出奖赏类型加工的趋同趋势。这一结果表明,随着奖赏信息的进一步深入加工,尤其是在疼痛状态下,个体可能将更多认知资源整体投入至奖赏动机系统,削弱了对奖赏类型(自我或他人)的区分。这种加工模式与疼痛所引发的“动机系统普遍激活”假设相符合,提示急性疼痛通过强化奖赏动机系统,促进个体对环境积极资源的广泛关注与响应,具备重要的适应性功能(Gandhi et al., 2013)。综上所述,奖赏预期阶段不同指标间的一致与不一致性,反映出疼痛通过早期加工保留自我奖赏优势、增强社会性期待,同时在整体动机输出阶段打破了奖赏类型的边界,促进个体

对不同奖赏目标的广泛投入, 揭示了疼痛对奖赏系统的动态、阶段性调控作用。

本研究结果表明, 急性疼痛普遍增强了个体在奖赏加工预期阶段的动机反应, 无论奖赏对象是自我导向的个人奖赏, 还是亲密他人导向的替代奖赏, 均呈现出一致的动机增强效应。这一现象在行为层面与神经指标上表现出高度一致性, 提示疼痛对奖赏动机系统的激活作用具有跨奖赏类型的普遍性, 且不受奖赏对象的限制。这一结果拓展了既有关于“疼痛增强奖赏动机”理论(Gandhi et al., 2013), 进一步揭示了该效应的独立性, 即个体在疼痛状态下不仅更加渴求自身奖赏, 同样会提升其为亲密他人获取奖赏的动机水平。

疼痛作为一种消极的体验, 会引发大脑中的动机系统以求得正向补偿。已有研究表明, 疼痛能够通过激活大脑的奖赏相关神经回路, 疼痛对动机的普遍增强可能源于神经回路的共享机制(Navratilova & Porreca, 2014)。无论是个人奖赏还是替代奖赏, 大脑的奖赏加工系统都涉及到类似的神经通路, 例如伏隔核、腹侧纹状体和腹内侧前额叶皮层等区域(Becker et al., 2017; Gandhi et al., 2013)。这些脑区不仅参与奖赏的主观价值评估, 还参与情感调节和动机生成。疼痛还能够增加多巴胺系统活性, 提升个体对任何形式奖赏的敏感性。因此, 疼痛通过激活这些区域来增强个体对奖赏的动机, 这一机制可能独立于奖赏的具体对象(Porreca & Navratilova, 2017)。疼痛作为一种强烈的负面情感, 可能通过调动这些神经机制, 促使个体更加积极地追求奖赏, 以抵消疼痛带来的负面效应。

从进化生物学的角度看, 疼痛触发的动机提升具有适应性意义。个体在遭受疼痛时, 身体和大脑会优先寻找能够缓解痛苦的方式, 而奖赏提供了一个潜在的情感补偿机制。无论奖赏的对象是自己还是他人, 奖赏动机的增强都可以为个体提供心理上的舒缓, 促进情绪恢复和心理平衡。因此, 疼痛下的动机增强效应反映了个体为了应对消极情绪而加大对正向刺激的需求。这一适应性策略有助于个体维持情感平衡, 并减少疼痛带来的心理负担(Becker et al., 2013)。同时, 这一发现与动机-决策模型的假设相一致。该模型认为, 疼痛和奖赏通过消极和积极的动机系统共同作用, 驱动和维持个体的行为选择(Fields, 2004, 2007)。个体在面对疼痛时, 会优先考虑能够带来愉悦和正向反馈的行为, 以减少痛苦带来的负面体验。这也解释了为什么无论奖赏是为

自己还是为他人, 只要能够提供积极反馈, 疼痛都会增强对奖赏的追求。这种普遍的动机提升机制进一步证实了疼痛与奖赏在神经回路上的紧密联系, 并表明疼痛对奖赏动机的调节不受奖赏对象的影响。

本研究还发现, 疼痛对个人奖赏和替代奖赏的动机增强效应在神经层面上也表现出一致性。ERP结果显示, 疼痛条件下, CNV 和 cue-P3 波幅的增大反映了个体在奖赏预期阶段的动机增强效应无论是在个人奖赏还是替代奖赏中都显著存在。这与已有研究表明, 个人奖赏和替代奖赏在神经回路存在重叠性一致, 尤其是在涉及亲密他人的情境下, 替代奖赏引发的神经激活模式与个人奖赏类似(Morelli et al., 2015; Bartra et al., 2013)。这进一步解释了为什么疼痛对两类奖赏的动机增强没有显著差异, 因为疼痛影响的主要是共享的神经机制, 而非奖赏的具体对象。在奖赏预期阶段, CNV 的增大通常与增强的动机和注意分配相关联(Holroyd & Coles, 2002; Boksem et al., 2006)。疼痛条件下的 CNV 波幅增大可能反映了个体在奖赏预期阶段对奖赏的更强烈期望, 这与疼痛状态激活多巴胺系统的研究一致, 表明疼痛通过神经机制增强了奖赏动机(Navratilova & Porreca, 2014)。同时, cue-P3 的波幅在疼痛条件下显著增大, 这表明疼痛状态下的个体在奖赏出现的前期表现出更高的动机响应。已有研究指出, cue-P3 波幅与预期奖赏的价值密切相关(Nieuwenhuis et al., 2005; Sato et al., 2005)。这一现象说明, 疼痛对动机的增强作用可能是通过调节奖赏预期的神经活动实现的, 使个体在疼痛时对奖赏线索的敏感度提升, 以实现消极体验的情感补偿。

4.2 疼痛对奖赏体验阶段的影响

研究结果还发现, 尽管急性疼痛增强了个体在奖赏预期阶段的动机, 但对奖赏体验阶段的享乐体验没有显著影响。这一结果表明, 疼痛虽然增强了个体对奖赏的追求动机, 但并未显著改变其对奖赏本身愉悦体验的感知。这一现象为理解疼痛与奖赏加工的关系提供了新的视角, 也与已有研究结果部分一致(Darbor et al., 2016; Gandhi et al., 2013)。在奖赏体验阶段中行为与神经指标均体现了奖赏价值递增效应, 支持奖赏体验过程中价值敏感性的普遍性(Knutson et al., 2001)。主观享乐评分结果显示, 个体获得的愉悦感随金钱奖赏的增加而增强。该趋势在神经层面的 FRN 与 P3 波幅中同样得到验证, 表现为更高价值奖赏诱发更强的情绪价值评估与注意资源分配反应, 进一步支持了奖赏体验过程中

动机与情绪系统对奖赏强度的敏感性(Gu et al., 2017; Polich, 2007)。

首先,从神经机制的角度来看,疼痛对奖赏享乐体验的影响较小可能与疼痛对大脑奖赏系统的调节模式有关。奖赏加工通常涉及多个脑区的协同作用,尤其是在奖赏体验阶段,个体的愉悦感通常与腹内侧前额叶皮层和伏隔核的激活有关(Berridge & Kringelbach, 2015)。这些区域负责处理奖赏的主观价值和情感体验。然而,疼痛更多地影响动机层面的调节,而在情感体验层面可能并不显著干扰奖赏价值的计算。因此,尽管疼痛增强了奖赏预期阶段的动机,但在奖赏体验阶段,个体对愉悦感的感知仍主要由奖赏的客观价值所决定,而非疼痛的影响。

其次,疼痛不影响愉悦反应的结果可以通过动机-享乐的双加工模型(Berridge et al., 2009)来解释。根据该模型,奖赏的加工可以分为“想要”(动机)和“喜欢”(享乐)两个独立的过程。“想要”过程主要涉及寻求奖赏的动机,而“喜欢”过程则与奖赏带来的愉悦感受有关。ERP 研究表明,奖赏体验中的 P3 成分通常与愉悦和主观价值评估相关(Hajcak et al., 2006; Wu & Zhou, 2009)。在疼痛条件下,P3 波幅未出现显著变化,这与疼痛主要调节动机而非享乐的双重加工模型一致(Berridge et al., 2009)。这一结果说明,疼痛更多地增强对奖赏的“想要”过程,而“喜欢”过程则相对独立于疼痛的影响,支持了奖赏预期和奖赏体验的分离机制(Berridge & Robinson, 2003)。这意味着,疼痛更多地影响个体对奖赏的期待和寻求动机,即便奖赏得到实现,其带来的愉悦体验也并未因疼痛而发生显著改变。这一现象与多项研究结果一致,即疼痛更多地影响奖赏的动机成分,而对愉悦体验的影响则较为有限(Wang et al., 2018; Becker et al., 2017)。

此外,疼痛不影响享乐体验可能与奖赏的类型和价值有关。研究表明,奖赏的愉悦体验更多依赖于奖赏的实际客观价值(如金钱奖赏的大小),而疼痛更多影响个体对奖赏的动机强度,而非对愉悦度的感知(Becker et al., 2020)。在本研究中,尽管疼痛条件下个体表现出更强的奖赏动机,但由于奖赏的愉悦体验主要由奖赏的实际价值决定,疼痛并未显著改变这一享乐体验。这也解释了为何在疼痛条件下,个体的动机增强,但愉悦感评分保持相对稳定。

最后,这一结果还有助于理解疼痛对情感调节的双重效应。疼痛作为一种负性情绪刺激,更多影

响个体的动机系统,而并未干扰个体的情感体验能力。这一现象可能反映了人类在进化过程中形成的情感调节机制,即个体在面对负性情绪时,依然能够保持对正性情绪体验的稳定感知,从而确保情感平衡。这种机制有助于个体在经历疼痛等负性情绪时,依然能够从积极的体验中获得愉悦感,维持情绪的正向调节。

4.3 疼痛影响替代奖赏的情绪价值体验

值得注意的是,奖赏类型在不同指标间表现出不一致的加工特点,主观享乐评分未体现个人奖赏与替代奖赏的显著差异,提示在自我报告层面,个体对两种奖赏对象的情绪体验具有一定的一致性。相较之下,FRN 与 P3 结果揭示出疼痛状态下替代奖赏的加工优势:FRN 波幅在疼痛组中,替代奖赏条件略高于个人奖赏,P3 波幅在中高价值奖赏条件下,替代奖赏同样诱发更强的神经反应。这一结果表明,尽管个体在主观层面未明确区分两种奖赏类型,但其神经系统对亲密他人奖赏表现出更高的敏感性与情绪价值投入。这种“主观-神经分离”现象可能反映了不同加工水平的信息提取差异。主观享乐评分主要反映显性、意识层面的情绪体验,受社会期望、个体信念等多重因素影响,存在一定的反应偏倚。而 FRN 与 P3 作为内隐神经指标,能够捕捉早期的情绪价值评估与深层次的动机调控,揭示了个体在未必有意识觉察的情况下,对替代奖赏的情绪投入与注意偏向(Morelli et al., 2015; Navratilova et al., 2016)。此外,奖赏价值与类型整合加工层面的不一致性也值得关注。主观享乐评分未体现出奖赏价值与类型的交互效应,表明个体主观体验对不同奖赏对象与价值水平的整合反应相对平稳。但 P3 波幅则呈现出三重交互趋势,特别是在疼痛状态下,替代奖赏条件下中高价值奖赏诱发了更显著的神经反应,提示疼痛状态下,个体对亲密他人奖赏的加工优先性随奖赏价值提升而放大,反映了个体在面临威胁状态时,社会联结与亲密关系激活机制可能具有更强的适应性意义(Berridge & Kringelbach, 2015; Telzer et al., 2010)。

FRN 通常被认为反映了个体对负性反馈或预期违背的情感反应和评价,反映了奖赏评价系统的负性偏向(Holroyd et al., 2003)。本研究中,在疼痛情境中,个体对替代奖赏的 FRN 反应增强可能表明,他们在替代奖赏情境下更投入情感资源,以实现对他人的更强情绪价值体验,表明个体在替代奖赏情境中对情绪价值的体验更加敏感。这可能

是因为替代奖赏涉及到更多的情感和社会认知加工, 尤其是当奖赏对象为亲密他人时, 个体可能会对替代奖赏投入更多的情感资源(Morelli et al., 2015; Kujawa et al., 2019)。这一结果从多个角度揭示了疼痛如何通过情感调节机制影响替代奖赏的加工过程。

首先, 替代奖赏本身具有强烈的社会情感成分, 尤其当奖赏对象是个体的亲密朋友或家人时。已有研究表明, 替代奖赏对象为亲密他人时能够引发与个人奖赏类似的神经反应, 替代奖赏加工涉及到更多的情感和社会认知区域(如腹内侧前额叶皮层和颞顶叶交界处)共同参与(Morelli et al., 2015; Braams et al., 2014)。替代奖赏涉及的不仅是客观的物质回报, 还包含了对他人幸福和情感状态的关注, 这种社会情感联系使得个体在替代奖赏情境中对奖赏结果更加敏感。疼痛作为一种负性情绪状态, 可能通过增强社会情感联系的敏感度, 进一步放大了替代奖赏的情绪价值体验。

其次, 疼痛可能通过影响情感调节系统, 增加个体对情绪价值的敏感度。疼痛作为一种强烈的生理和心理压力, 会激活大脑中与情感调节相关的区域, 如背内侧前额叶皮层和后扣带回皮层, 这些区域参与个体的情感评估和调节(Etkin et al., 2011)。在替代奖赏情境中, 疼痛可能通过这些情感调节区域放大了对他人奖赏的情绪价值评估, 导致个体在替代奖赏时产生更强的情感反应。

此外, 疼痛对替代奖赏情绪价值体验的增强还可能与个体在疼痛状态下的社会认知调节有关, 疼痛的负性情绪可能通过激活社会认知和情感调节的相关脑区, 放大替代奖赏的情绪反应。替代奖赏不仅涉及情感共鸣, 还需要个体进行社会认知加工, 包括理解他人的需求、预测他人的情感反应等(Zaki & Ochsner, 2012)。这些社会认知加工过程通常与背内侧前额叶皮层、颞顶叶交界处和后扣带回皮层的激活相关。这些脑区通过整合社会线索, 帮助个体在替代奖赏情境中进行情感评估和决策。

因此, 在疼痛条件下, 个体对替代奖赏的 FRN 反应增强, 可以通过神经激活的协同效应来解释。替代奖赏的情感加工不仅涉及到与动机相关的腹侧纹状体, 还与情感和社会认知相关的脑区密切相关, 如背内侧前额叶皮层和颞顶叶交界处(Buckner & Carroll, 2007)。这一现象与“疼痛增加情感共鸣”理论相吻合。研究发现, 疼痛能够增强个体的情感共鸣能力, 使他们对社会情境中的情感线索更加敏

感, 从而增强替代奖赏的情感价值(Zaki & Ochsner, 2012)。当个体处于疼痛状态时, 这些区域的情感敏感度增加, 使得个体对替代奖赏的情感反应进一步增强。这种情感加工的协同效应可能导致 FRN 反应的增强, 反映个体对替代奖赏的情绪价值有了更深层次的反应。疼痛还可能通过调动社会认知机制, 增强个体对替代奖赏的情绪价值感知。FRN 反应的增强可能反映了个体对替代奖赏结果更高的情感投入和情绪评估。尤其是在疼痛状态下, 个体可能更加依赖社会认知系统来评估替代奖赏的情感价值, 进而表现出更强的情感反应。

4.4 研究局限与未来研究

尽管本研究揭示了急性疼痛对奖赏动机和情绪价值体验的调节作用, 尤其在替代奖赏中表现出更显著的增强效应, 但仍存在一定的局限性, 值得在未来研究中进一步探讨。

首先, 本研究聚焦于“自我-亲密他人”的奖赏对照体系, 未纳入普通他人或陌生人条件, 限制了对社会距离效应(Social Distance Effect)的系统性探讨。已有研究表明, 替代奖赏的神经加工显著受到社会关系远近的调节, 亲密他人奖赏与个人奖赏在神经通路上高度重叠, 而普通他人奖赏更多依赖社会认知相关脑区的加工(Braams et al., 2014; Morelli et al., 2015; Hackel et al., 2017)。因此, 疼痛对替代奖赏的增强效应可能特异性存在于高情感联结的社会关系中。其次, 疼痛-奖赏交互机制的解释维度有待拓展。疼痛对奖赏动机的提升可能与个体的情绪共鸣、社会认同等因素密切相关(Navratilova & Porreca, 2014; Fareri et al., 2012)。在面对亲密他人时, 个体可能更倾向于将替代奖赏视为自我奖赏的延伸, 因此表现出更显著的动机增强和情绪反应。未来研究可结合 fMRI 神经解码技术, 量化疼痛条件下社会奖赏表征的神经相似性指数, 以区分情感驱动与认知调节的贡献度。此外, 实验设计的生态效度存在提升空间。虽然本研究通过分段式任务设计将单次实验时长控制在 60 分钟内, 但引入普通他人条件仍需增加试次数, 进而影响数据的稳定性和有效性。为平衡实验效度与数据质量, 本研究选择了更具代表性的“亲密他人”作为替代奖赏对象, 以确保研究聚焦于疼痛对奖赏动机和情绪反应的核心机制。后续研究可采用跨期分组设计或开发基于虚拟现实的社会奖赏动态范式, 在保证数据质量的前提下拓展社会距离变量的考察范围。

值得注意的是, 本研究在替代奖赏的操作上选

用了被试所指定的亲密朋友作为替代奖赏对象,强调了亲密社会关系中情绪与动机加工的特点。然而,亲密朋友并非亲密关系的唯一类型,伴侣关系作为另一种高度依附性的社会关系,在情绪加工、共情调节以及奖赏系统激活方面可能展现出不同的心理机制。例如,有研究表明,在面对伴侣图像时,个体的奖赏动机系统会表现出更强的情绪依附与信任反应,甚至涉及内啡肽系统的激活,而不仅仅是奖赏价值的评估(Acevedo et al., 2012)。因此,未来研究可通过引入社会距离变量,细化替代奖赏中的亲密关系维度,比较朋友、伴侣与家庭成员在奖赏加工中的异同,探讨疼痛或其他情绪状态下,这些关系类型是否调节奖赏动机系统的反应路径,从而丰富对社会奖赏加工的多维理解。

其次,尽管本研究采用反应时和按键次数作为奖赏动机的行为指标,并基于现有动机理论(如动机强度模型)和实证研究验证了其效度,但仍存在一定局限。具体而言,在疼痛情境中,个体表现出的更快反应和更多按键行为,可能同时受到奖赏动机驱动与疼痛回避倾向的双重影响。本研究虽在任务设计中通过提升奖赏价值来增强任务目标的吸引力,但仍难以完全分离这两种行为动因。为更清晰地区分奖赏寻求与疼痛回避的行为驱动力,未来研究可采用冲突范式(conflict paradigm),即在实验任务中同时呈现奖赏获取和疼痛回避的选项,迫使被试在两者之间进行权衡。例如, Schrooten 等人(2014)通过操作疼痛刺激的可控性,观察个体在奖赏与疼痛之间的选择行为,结果发现,参与者在做出选择时的反应时间和选择切换频率与其对疼痛的感知和情绪反应密切相关,表明个体在奖赏与疼痛之间的权衡受到多种因素的影响,从而揭示了疼痛回避和奖赏寻求的相对权重。此外,动物研究中也采用了类似的冲突范式,例如使用奖赏/疼痛冲突任务,要求动物在获得奖赏性饮料与避免接触疼痛刺激之间进行选择,从而评估其对奖赏和疼痛的动机强度(Navratilova & Porreca, 2014)。在行为数据分析方面,传统的统计方法难以揭示潜在的认知过程。因此,结合计算建模方法,如强化学习模型(Reinforcement Learning, RL)和漂移扩散模型(Drift Diffusion Model, DDM),可更深入地解析个体在奖赏与疼痛情境下的决策过程。RL 模型能够模拟个体如何基于奖赏反馈更新行为策略,而 DDM 则可以模拟决策过程中的证据积累和反应时间分布。将两者结合的 RL-DDM 模型已被用于研究奖赏和惩

罚学习中的决策机制。此外, Hierarchical Bayesian 方法(如 HDDM)也被用于同时估计学习参数和决策参数,提供对个体差异的更精确建模(Pedersen et al., 2017, 2020)。因此,未来研究可通过引入冲突范式和计算建模方法,更有效地区分奖赏寻求与疼痛回避的行为驱动力。这种多层次的研究策略将有助于建立更具机制解释力的动机评估体系,推动疼痛-奖赏互动研究向更精细化的方向发展。

疼痛操作方面,尽管辣椒素诱发的持续性疼痛刺激具备较高的生态效度,但部分被试在实验过程中可能仍存在轻微的感受波动。未来研究可考虑引入更稳定的疼痛诱发方法(如热刺激装置),或进一步优化任务时长与刺激强度匹配,以更有效地控制疼痛波动对行为反应的潜在影响,提升操作的一致性和重复性。此外,本研究所采用的短时急性疼痛模型无法直接用于解释慢性疼痛患者的长期适应性调节模式。未来可考虑引入慢性疼痛样本,以探讨不同类型疼痛在奖赏加工系统中的长期调节机制差异。最后,本研究仅使用 ERP 技术评估疼痛对奖赏加工的神经效应,尽管 ERP 具有高时间分辨率的优势,但在空间分辨率上相对较低,难以精准定位深层脑区的神经活动。未来研究可以整合功能性磁共振成像等技术,以实现时空分辨率的互补,从而更系统地揭示疼痛-奖赏交互过程中的神经网络特征。

5 结论

本研究采用相关电位(ERP)技术,考察急性疼痛对奖赏加工预期与体验阶段的影响,并获得以下主要结果: 1)急性疼痛增强了奖赏加工预期阶段的动机成分, 2)在疼痛条件下,个人奖赏与替代奖赏的加工模式相似,个体对高价值奖赏表现出更强的动机与愉悦反应; 3)急性疼痛对奖赏加工的调节作用表现出阶段性差异,对奖赏预期阶段和奖赏体验阶段的影响分别存在独特的神经反应特征。进一步分析发现,疼痛状态下个体的奖赏动机整体提升,而对奖赏所引发的主观愉悦体验影响相对较小。同时,在奖赏体验阶段,疼痛增强了对替代奖赏的情绪价值加工,表现为 FRN 波幅的增强,提示个体在此情境下对他人导向奖赏的神经敏感性升高。研究结果表明,急性疼痛可能主要通过调节奖赏动机系统与社会情绪加工机制,增强个体对奖赏目标的追求倾向。未来研究可在不同人群、不同奖赏对象情境中进一步验证该效应,并结合多模态神经成像技

术, 深入探索疼痛与奖赏系统的动态交互机制, 为疼痛相关治疗中的疼痛管理和心理干预提供理论依据, 最大化奖赏干预治疗的效果。

参 考 文 献

- Acevedo, B. P., Aron, A., Fisher, H. E., & Brown, L. L. (2012). Neural correlates of long-term intense romantic love. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 7(2), 145–159. <https://doi.org/10.1093/scan/nsq092>
- Ait Oumeziane, B., Jones, O., & Foti, D. (2019). Neural sensitivity to social and monetary reward in depression: Clarifying general and domain-specific deficits. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 13, 199. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2019.00199>
- Barman, A., Richter, S., Soch, J., Deibele, A., Richter, A., Assmann, A., ... Schott, B. H. (2015). Gender-specific modulation of neural mechanisms underlying social reward processing by Autism Quotient. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 10(11), 1537–1547. <https://doi.org/10.1093/scan/nsv044>
- Bartra, O., McGuire, J. T., & Kable, J. W. (2013). The valuation system: A coordinate-based meta-analysis of bold fMRI experiments examining neural correlates of subjective value. *Neuroimage*, 76, 412–427. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.063>
- Becerra, L., Breiter, H. C., Wise, R., Gonzalez, R. G., & Borsook, D. (2001). Reward circuitry activation by noxious thermal stimuli. *Neuron*, 32(5), 927–946. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(01\)00533-5](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(01)00533-5)
- Becker, S., Gandhi, W., Chen, Y. J., & Schweinhardt, P. (2017). Subjective utility moderates bidirectional effects of conflicting motivations on pain perception. *Scientific Reports*, 7(1), 7790. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08454-4>
- Becker, S., Gandhi, W., Elfassy, N. M., & Schweinhardt, P. (2013). The role of dopamine in the perceptual modulation of nociceptive stimuli by monetary wins or losses. *The European Journal of Neuroscience*, 38(7), 3080–3088. <https://doi.org/10.1111/ejn.12303>
- Becker, S., Gandhi, W., & Schweinhardt, P. (2012). Cerebral interactions of pain and reward and their relevance for chronic pain. *Neuroscience Letters*, 520(2), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.03.013>
- Becker, S., Löffler, M., & Seymour, B. (2020). Reward enhances pain discrimination in humans. *Psychological Science*, 31(9), 1191–1199. <https://doi.org/10.1177/0956797620939588>
- Berridge, K. C., & Kringelbach, M. L. (2015). Pleasure systems in the brain. *Neuron*, 86(3), 646–664. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.02.018>
- Berridge, K. C., & Robinson, T. E. (1998). What is the role of dopamine in reward: Hedonic impact, reward learning, or incentive salience?. *Brain Research Reviews*, 28(3), 309–369.
- Berridge, K. C., & Robinson, T. E. (2003). Parsing reward. *Trends in Neurosciences*, 26(9), 507–513. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(03\)00233-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00233-9)
- Berridge, K. C., Robinson, T. E., & Aldridge, J. W. (2009). Dissecting components of reward: ‘Liking’, ‘wanting’, and learning. *Current Opinion in Pharmacology*, 9(1), 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.coph.2008.12.014>
- Boksem, M. A., Tops, M., Wester, A. E., Meijman, T. F., & Lorist, M. M. (2006). Error-related ERP components and individual differences in punishment and reward sensitivity. *Brain Research*, 1101(1), 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.05.004>
- Botvinick, M., & Braver, T. (2015). Motivation and cognitive control: From behavior to neural mechanism. *Annual Review of Psychology*, 66, 83–113. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015044>
- Braams, B. R., & Crone, E. A. (2017). Peers and parents: A comparison between neural activation when winning for friends and mothers in adolescence. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(3), 417–426. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw136>
- Braams, B. R., Peters, S., Peper, J. S., Güroğlu, B., & Crone, E. A. (2014). Gambling for self, friends, and antagonists: Differential contributions of affective and social brain regions on adolescent reward processing. *Neuroimage*, 100, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.06.020>
- Buckner, R. L., & Carroll, D. C. (2007). Self-projection and the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(2), 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.11.004>
- Carretié, L. (2014). Exogenous (automatic) attention to emotional stimuli: A review. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, 14(4), 1228–1258. <https://doi.org/10.3758/s13415-014-0270-2>
- Chen, L. L., Huang, R., & Jia, S. W. (2020). Feedback-related negativity and addiction. *Advances in Psychological Science*, 28(6), 959–968.
- [陈乐乐, 黄蓉, 贾世伟. (2020). 反馈相关负波与成瘾. *心理科学进展*, 28(6), 959–968.]
- Darbor, K. E., Lench, H. C., & Carter-Sowell, A. R. (2016). Do people eat the pain away? The effects of acute physical pain on subsequent consumption of sweet-tasting food. *PLOS ONE*, 11(11), e0166931. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166931>
- Etkin, A., Egner, T., & Kalisch, R. (2011). Emotional processing in anterior cingulate and medial prefrontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(2), 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.11.004>
- Fareri, D. S., Niznikiewicz, M. A., Lee, V. K., & Delgado, M. R. (2012). Social network modulation of reward-related signals. *The Journal of Neuroscience*, 32(26), 9045–9052. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0610-12.2012>
- Fields, H. (2004). State-dependent opioid control of pain. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(7), 565–575. <https://doi.org/10.1038/nrn1431>
- Fields, H. (2007). Understanding how opioids contribute to reward and analgesia. *Regional Anesthesia and Pain Medicine*, 32(3), 242–246. <https://doi.org/10.1016/j.rapm.2007.01.001>
- Flores, A., Münte, T. F., & Doñamayor, N. (2015). Event-related EEG responses to anticipation and delivery of monetary and social reward. *Biological Psychology*, 109, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.04.005>
- Gandhi, W., Becker, S., & Schweinhardt, P. (2013). Pain increases motivational drive to obtain reward, but does not affect associated hedonic responses: A behavioural study in healthy volunteers. *European Journal of Pain*, 17(7), 1093–1103. <https://doi.org/10.1002/j.1532-2149.2012.00281.x>
- Goerlich, K. S., Votinov, M., Lammertz, S. E., Winkler, L., Spreckelmeyer, K. N., Habel, U., Gründer, G., & Gossen, A. (2017). Effects of alexithymia and empathy on the neural processing of social and monetary rewards. *Brain Structure and Function*, 222(5), 2235–2250. <https://doi.org/10.1007/s00429-016-1339-1>
- Greimel, E., Bakos, S., Landes, I., Töllner, T., Bartling, J., Kohls, G., & Schulte-Körne, G. (2018). Sex differences in the neural underpinnings of social and monetary incentive processing during adolescence. *Cognitive, Affective, &*

- Behavioral Neuroscience*, 18(2), 296–312. <https://doi.org/10.3758/s13415-018-0570-z>
- Gu, R., Jiang, Y., Kiser, S., Black, C. L., Broster, L. S., Luo, Y., & Kelly, T. H. (2017). Impulsive personality dimensions are associated with altered behavioral performance and neural responses in the monetary incentive delay task. *Neuropsychologia*, 103, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.07.013>
- Hackel, L. M., Zaki, J., & Van Bavel, J. J. (2017). Social identity shapes social valuation: Evidence from prosocial behavior and vicarious reward. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(8), 1219–1228. <https://doi.org/10.1093/scan/nsx045>
- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2006). The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biological Psychology*, 71(2), 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.04.001>
- Hare, T. A., Camerer, C. F., Knoepfle, D. T., & Rangel, A. (2010). Value computations in ventral medial prefrontal cortex during charitable decision making incorporate input from regions involved in social cognition. *The Journal of Neuroscience*, 30(2), 583–590. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4089-09.2010>
- Heydari, S., & Holroyd, C. B. (2016). Reward positivity: Reward prediction error or salience prediction error?. *Psychophysiology*, 53(8), 1185–1192. <https://doi.org/10.1111/psyp.12673>
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. H. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, 109(4), 679–709. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.109.4.679>
- Holroyd, C. B., Nieuwenhuis, S., Yeung, N., & Cohen, J. D. (2003). Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential. *Neuroreport*, 14(18), 2481–2484. <https://doi.org/10.1097/00001756-200312190-00037>
- Huckins, J. F., Adeyemo, B., Miezin, F. M., Power, J. D., Gordon, E. M., Laumann, T. O., ... Kelley, W. M. (2019). Reward-related regions form a preferentially coupled system at rest. *Human Brain Mapping*, 40(2), 361–376. <https://doi.org/10.1002/hbm.24377>
- Klawohn, J., Burani, K., Bruchnak, A., Santopetro, N., & Hajcak, G. (2021). Reduced neural response to reward and pleasant pictures independently relate to depression. *Psychological Medicine*, 51(5), 741–749. <https://doi.org/10.1017/S0033291719003659>
- Knutson, B., Fong, G. W., Adams, C. M., Varner, J. L., & Hommer, D. (2001). Dissociation of reward anticipation and outcome with event-related fMRI. *Neuroreport*, 12(17), 3683–3687. <https://doi.org/10.1097/00001756-200112040-00016>
- Kujawa, A., Hajcak, G., & Klein, D. N. (2019). Reduced reward responsiveness moderates the effect of maternal depression on depressive symptoms in offspring: Evidence across levels of analysis. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 60(1), 82–90. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12944>
- LaMotte, R. H., Shain, C. N., Simone, D. A., & Tsai, E. F. (1991). Neurogenic hyperalgesia: Psychophysical studies of underlying mechanisms. *Journal of Neurophysiology*, 66(1), 190–211. <https://doi.org/10.1152/jn.1991.66.1.190>
- Lasaponara, S., Glicksohn, J., Mauro, F., & Ben-Soussan, T. D. (2019). Contingent negative variation and P3 modulations following mindful movement training. *Progress in brain research*, 244, 101–114. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2018.10.017>
- Leknes, S., & Tracey, I. (2008). A common neurobiology for pain and pleasure. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 314–320. <https://doi.org/10.1038/nrn2333>
- Li, D. Y., Li, P., & Li, H. (2018). The updated theories of feedback-related negativity in the last decade. *Advances in Psychological Science*, 26(9), 1642–1650. [李丹阳, 李鹏, 李红. (2018). 反馈负波及其近 10 年理论解释. *心理科学进展*, 26(9), 1642–1650.]
- Li, J., Sun, Y., Yang, Z. L., & Zhong, Y. P. (2020). Social value orientation modulates the processing of social rewards for self: Evidence from ERPs study. *Acta Psychologica Sinica*, 52(6), 786–800. [李璉, 孙宇, 杨子鹿, 钟毅平. (2020). 社会价值取向对自我社会奖赏加工的影响——来自 ERPs 的证据. *心理学报*, 52(6), 786–800.]
- Li, Q., Xu, J., & Zheng, Y. (2017). Stimulus-preceding negativity: An electrophysiological index of reward anticipation. *Advances in Psychological Science*, 25(7), 1114–1121. [李琪, 许晶, 郑亚. (2017). 刺激前负波: 奖赏期待的电生理指标. *心理科学进展*, 25(7), 1114–1121.]
- Li, X., Zhou, X., Zheng, H., & Wang, C. (2023). The modulation of pain in reward processing is reflected by increased P300 and delta oscillation. *Brain and Cognition*, 168, 105972. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2023.105972>
- Liu, P. H., Zhang, H. Y., Zhang, X. K., Li, H., & Lei, Y. (2023). Effects of acute versus chronic pain on reward processing and the underlying neural mechanisms involved. *Advances in Psychological Science*, 31(3), 402–415. [刘沛菡, 张火垠, 张旭凯, 李红, 雷怡. (2023). 急性疼痛与慢性疼痛对奖赏加工的影响及神经机制. *心理科学进展*, 31(3), 402–415.]
- Mobbs, D., Yu, R., Meyer, M., Passamonti, L., Seymour, B., Calder, A. J., ... Dalgleish, T. (2009). A key role for similarity in vicarious reward. *Science*, 324(5929), 900. <https://doi.org/10.1126/science.1170539>
- Modir, J. G., & Wallace, M. S. (2010). Human experimental pain models 3: Heat/capsaicin sensitization and intradermal capsaicin models. *Methods in Molecular Biology*, 617, 169–174. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-323-7_14
- Morelli, S. A., Sacchet, M. D., & Zaki, J. (2015). Common and distinct neural correlates of personal and vicarious reward: A quantitative meta-analysis. *Neuroimage*, 112, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.12.056>
- Nair, A. K., Sasidharan, A., John, J. P., Mehrotra, S., & Kutty, B. M. (2016). Assessing neurocognition via gamified experimental logic: A novel approach to simultaneous acquisition of multiple ERPs. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 1. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00001>
- Navratilova, E., Morimura, K., Xie, J. Y., Atcherley, C. W., Ossipov, M. H., & Porreca, F. (2016). Positive emotions and brain reward circuits in chronic pain. *Journal of Comparative Neurology*, 524(8), 1646–1652. <https://doi.org/10.1002/cne.23968>
- Navratilova, E., & Porreca, F. (2014). Reward and motivation in pain and pain relief. *Nature Neuroscience*, 17(10), 1304–1312. <https://doi.org/10.1038/nn.3811>
- Nieuwenhuis, S., Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Decision making, the P3, and the locus coeruleus-norepinephrine system. *Psychological Bulletin*, 131(4), 510–532. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.4.510>
- Peciña, S., Cagniard, B., Berridge, K. C., Aldridge, J. W., & Zhuang, X. (2003). Hyperdopaminergic mutant mice have higher “wanting” but not “liking” for sweet rewards. *The Journal of Neuroscience*, 23(28), 9395–9402. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.23-28-09395.2003>
- Pedersen, M. L., & Frank, M. J. (2020). Simultaneous

- hierarchical bayesian parameter estimation for reinforcement learning and drift diffusion models: A tutorial and links to neural data. *Computational Brain & Behavior*, 3(4), 458–471. <https://doi.org/10.1007/s42113-020-00084-w>
- Pedersen, M. L., Frank, M. J., & Biele, G. (2017). The drift diffusion model as the choice rule in reinforcement learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(4), 1234–1251. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1199-y>
- Pizzagalli, D. A., Holmes, A. J., Dillon, D. G., Goetz, E. L., Birk, J. L., Bogdan, R., ... Fava, M. (2009). Reduced caudate and nucleus accumbens response to rewards in unmedicated individuals with major depressive disorder. *American Journal of Psychiatry*, 166(6), 702–710. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2008.08081201>
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- Porreca, F., & Navratilova, E. (2017). Reward, motivation, and emotion of pain and its relief. *Pain*, 158 (Suppl 1), S43–S49. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000000798>
- Qin, H. F., Huang, R., & Jia, S. W. (2021). Feedback-related negativity: A biomarker for depression. *Advances in Psychological Science*, 29(3), 404–413.
- [秦浩方, 黄蓉, 贾世伟. (2021). 反馈相关负波: 一种抑郁症的生物标记物. *心理科学进展*, 29(3), 404–413.]
- Rainville, P., Duncan, G. H., Price, D. D., Carrier, B., & Bushnell, M. C. (1997). Pain affect encoded in human anterior cingulate but not somatosensory cortex. *Science*, 277(5328), 968–971. <https://doi.org/10.1126/science.277.5328.968>
- Rutledge, R. B., Skandali, N., Dayan, P., & Dolan, R. J. (2014). A computational and neural model of momentary subjective well-being. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(33), 12252–12257. <https://doi.org/10.1073/pnas.1407535111>
- Salcido, C. A., Harris Bozer, A. L., McNabb, C. T., & Fuchs, P. N. (2018). Assessing the aversive nature of pain with an operant approach/avoidance paradigm. *Physiology & Behavior*, 189, 59–63. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.02.053>
- Sato, A., Yasuda, A., Ohira, H., Miyawaki, K., Nishikawa, M., Kumano, H., & Kuboki, T. (2005). Effects of value and reward magnitude on feedback negativity and P300. *Neuroreport*, 16(4), 407–411. <https://doi.org/10.1097/00001756-200503150-00020>
- Schrooten, M. G. S., Wiech, K., & Vlaeyen, J. W. S. (2014). When pain meets ... pain-related choice behavior and pain perception in different goal conflict situations. *The Journal of Pain*, 15(11), 1166–1178. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2014.08.011>
- Scott, D. J., Heitzeg, M. M., Koeppe, R. A., Stohler, C. S., & Zubieta, J.-K. (2006). Variations in the human pain stress experience mediated by ventral and dorsal basal ganglia dopamine activity. *Journal of Neuroscience*, 26(42), 10789–10795. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2577-06.2006>
- Sescousse, G., Redouté, J., & Dreher, J. C. (2010). The architecture of reward value coding in the human orbitofrontal cortex. *The Journal of Neuroscience*, 30(39), 13095–13104. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3501-10.2010>
- Shackman, A. J., Salomons, T. V., Slagter, H. A., Fox, A. S., Winter, J. J., & Davidson, R. J. (2011). The integration of negative affect, pain and cognitive control in the cingulate cortex. *Nature Reviews. Neuroscience*, 12(3), 154–167. <https://doi.org/10.1038/nrn2994>
- Sui, J., & Humphreys, G. W. (2015). The integrative self: How self-reference integrates perception and memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(12), 719–728. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.08.015>
- Taylor, A. M. W., Becker, S., Schweinhardt, P., & Cahill, C. (2016). Mesolimbic dopamine signaling in acute and chronic pain: Implications for motivation, analgesia, and addiction. *Pain*, 157(6), 1194–1198. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000000494>
- Telzer, E. H., Masten, C. L., Berkman, E. T., Lieberman, M. D., & Fuligni, A. J. (2010). Gaining while giving: An fMRI study of the rewards of family assistance among white and Latino youth. *Social Neuroscience*, 5(5-6), 508–518. <https://doi.org/10.1080/17470911003687913>
- Wager, T. D., Rilling, J. K., Smith, E. E., Sokolik, A., Casey, K. L., Davidson, R. J., ... Cohen, J. D. (2004). Placebo-induced changes in fMRI in the anticipation and experience of pain. *Science*, 303(5661), 1162–1167. <https://doi.org/10.1126/science.1093065>
- Wang, C., Bao, C., Gao, J., Gu, Y., & Dong, X. (2020). Pain modulates neural responses to reward in the medial prefrontal cortex. *Human Brain Mapping*, 41(5), 1372–1381. <https://doi.org/10.1002/hbm.24882>
- Wang, C., Gao, J., Ma, Y., Zhu, C., & Dong, X.-W. (2018). Physical pain increases interpersonal trust in females. *European Journal of Pain*, 22(1), 150–160. <https://doi.org/10.1002/ejp.1111>
- Wang, D., Liu, T., & Shi, J. (2020). Neural dynamic responses of monetary and social reward processes in adolescents. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 141. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00141>
- Wang, Z., Li, Q., Nie, L., & Zheng, Y. (2020). Neural dynamics of monetary and social reward processing in social anhedonia. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 15(9), 991–1003. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaa128>
- Wu, Y., & Zhou, X. (2009). The P300 and reward valence, magnitude, and expectancy in outcome evaluation. *Brain Research*, 1286, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.06.032>
- Yeung, N., & Sanfey, A. G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *The Journal of neuroscience*, 24(28), 6258–6264. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4537-03.2004>
- Zaki, J., & Ochsner, K. N. (2012). The neuroscience of empathy: Progress, pitfalls and promise. *Nature Neuroscience*, 15(5), 675–680. <https://doi.org/10.1038/nn.3085>
- Zhang, D., Shen, J., Bi, R., Zhang, Y., Zhou, F., Feng, C., & Gu, R. (2022). Differentiating the abnormalities of social and monetary reward processing associated with depressive symptoms. *Psychological medicine*, 52(11), 2080–2094. <https://doi.org/10.1017/S0033291720003967>
- Zhang, Y., Li, Q., Wang, Z., Liu, X., & Zheng, Y. (2017). Temporal dynamics of reward anticipation in the human brain. *Biological Psychology*, 128, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2017.07.011>
- Zhu, S., Wang, Y., Gao, S., & Jia, S. (2019). The influence of context condition on outcome evaluation in experimental conditions: Even vs. neutral. *International Journal of Psychophysiology*, 141, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.05.001>
- Zubieta, J.-K., Smith, Y. R., Bueller, J. A., Xu, Y., Kilbourn, M. R., Jewett, D. M., Meyer, C. R., & Koeppe, R. A. (2001). Regional mu opioid receptor regulation of sensory and affective dimensions of pain. *Science*, 293(5528), 311–315. <https://doi.org/10.1126/science.1060952>

Acute pain modulates personal and vicarious reward processing: An ERP study

LIU Peihan¹, PENG Weiwei², WANG Jinxia¹, LI Hong¹, LEI Yi¹

(¹ *Institute for Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China*)

(² *School of Psychology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

Abstract

Pain and reward are two fundamental forces that motivate behavior and regulate perceptions in humans. The interactions between these forces drive motivational decision-making. This study employed a modified Monetary Incentive Delay (MID) task combined with Event-Related Potential (ERP) techniques to examine the dynamics of reward processing under acute pain, with particular focus on the stage-specific modulation of self-oriented (personal) and other-oriented (substitute) rewards in healthy individuals.

The results indicate that acute pain can significantly enhance reward-based motivation during the anticipation phase, as reflected by faster reaction times and increased button presses, with a linear increase corresponding to the magnitude of the potential reward. ERP findings reveal that, in the anticipation phase, participants in the pain group exhibited larger cue-P2 and cue-P3 amplitudes; this suggests heightened emotional processing of reward cues and increased attentional allocation to substitute rewards. Greater FRN and P3 amplitudes were observed in the pain group under substitute reward conditions in the outcome phase, indicating enhanced neural responses to socially directed reward feedback.

Together, these results demonstrate a stage-dependent influence of acute pain on reward processing: while motivational responses uniformly increased across reward types, emotional and neural responses were more prominently modulated for substitute rewards. These findings provide novel evidence of the complex interplay between pain and reward systems and suggest a duality in pain-related modulation—motivational convergence and experiential dissociation—within the reward processing framework.

Keywords acute pain, monetary reward, personal reward, substitute reward, reward anticipation stage, reward experience stage, ERP