

前额 P3 幅度调控对情绪调节的促进作用*

李宜伟¹ 汤煜尧¹ 王庭栋¹ 张丹丹^{1,2,3}

(¹ 四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都 610066) (² 成都医学院心理学院, 成都 610500)

(³ 西南财经大学中国行为经济与行为金融研究中心, 成都 611130)

摘要 前额 P3 成分是前额认知控制资源卷入的稳定指标。长期以来, 前额 P3 幅度仅被视为情绪调节等执行控制任务早期阶段前额资源调用程度的神经相关物, 鲜有研究探索主动改变 P3 幅度对执行控制功能的作用。本研究采用神经反馈(neurofeedback, NF)调节前额 P3 幅度, 以考察后者对情绪调节的潜在因果作用。67 名被试被随机分配至实验组(上调 P3, $n = 34$)或对照组(下调 P3, $n = 33$), 并在 NF 训练前后完成情绪调节任务。结果与训练前相比, 实验组通过 NF 训练可成功上调前额 P3 幅度, 表明其可更有效调用前额 P3 指征的执行控制功能, 从而在 NF 训练后的情绪调节中能获得更佳的情绪调节效果——负性情绪自评和反映情绪体验强度的顶区晚正成分(late positive potential, LPP)波幅均显著降低; 对照组则相反: NF 训练后情绪调节期间前额 P3 幅度下降, 情绪调节效果变差。同时结果表明, P3-NF 训练主要通过增加认知重评时前额 P3 幅度以提高情绪调节效果。本研究首次尝试让被试自主调控前额 P3 以改变情绪调节的效果, 研究发现一方面揭示了前额 P3 指征的前额叶执行控制功能对情绪调节的因果作用, 另一方面为临床治疗抑郁症等情绪调节障碍患者提供了无创无副作用的情绪调节能力改善的新思路。

关键词 情绪调节, 神经反馈, 认知重评, 前额 P3, 晚正成分

分类号 B842

1 引言

情绪调节作为维护心理健康的核心能力, 对预防和治疗多种精神疾病具有重要意义(Preece et al., 2023; Velotti et al., 2024)。有效的情绪调节不仅能降低因重大情绪创伤引发的神经生理障碍风险, 还能显著改善个体的社会适应能力和生活质量(Springstein & English, 2024)。情绪调节作为高级认知功能, 涉及复杂的认知控制过程, 通过对情绪信息的有意识调控来改变情绪反应的强度、持续时间和表达方式(Sheppes et al., 2014; Zhang et al., 2025)。认知重评作为最具适应性的情绪调节策略之一, 主要通过改变对情绪刺激的认知解释来调节情绪反应(McRae & Gross, 2020)。大量脑成像研究表明, 情绪调节(尤其是认知重评)主要是涉及前额皮层的认知控制脑区对皮层下情绪反应系统的自

上而下的调控(Morawetz et al., 2025; Zhang et al., 2025)。基于经颅磁刺激和经颅直流电刺激的脑调控研究进一步证实, 激活腹外侧或背外侧前额叶皮层能有效降低个体对负性刺激的情绪体验强度, 并显著抑制情绪反应相关脑区的活动(张丹丹 等, 2019; 莫李澄 等, 2021; He et al., 2023; Li et al., 2022, 2024; Mo et al., 2023; Zhao et al., 2021)。

情绪调节过程的早期阶段主要包括从负性刺激出现到情绪调节策略开始实施之前的时间窗口, 它涉及情绪情境快速评估导致的自顶向下情绪调节的启动以及调节方式和调节策略的选择、构思以及实施准备, 此过程高度依赖前额叶皮层的认知控制功能(Cheng et al., 2024; Ochsner et al., 2012)。ERP 研究为情绪调节的这一早期阶段提供了时间动态证据。首先是负性刺激吸引注意并引发快速评估(早期成分, 小于 300 ms; Olofsson et al., 2008),

收稿日期: 2025-12-27

* 国家自然科学基金(32271102)和深港脑科学创新研究项目(2023SHIBS0003)支持。

通信作者: 张丹丹, E-mail: zhangdd05@gmail.com

紧接着情绪调节启动、认知重评等被选择为调节方式、具体调节策略构思并准备实施,此过程对认知控制资源的调用表现为前额 P3 幅度的显著增大(Bernat et al., 2011; Moser et al., 2014; Yuan et al., 2015, 2023)。前额 P3 是情绪调节等执行控制功能早期阶段认知控制资源调用程度的公认神经标志物(Yuan et al., 2015, 2023; Zhang et al., 2023)。特别的,有研究者对比了主动情绪调节(认知重评)、内隐情绪调节和被动观看三种条件诱发的前额 P3。发现采用主动情绪调节下调负性情绪时,相较于被动观看和内隐情绪调节条件,前额 P3 幅度显著增强,这表明前额投入了更多认知控制资源来支持情绪调节的启动和实施准备(Zhang et al., 2023)。还有研究发现,前额 P3 的增强与情绪调节策略实施后个体体验到的情绪强度的降低相关,这表明早期认知控制资源的投入对情绪调节效果具有一定的预测作用(Yuan et al., 2023)。同时,认知控制功能受损的抑郁症患者和亚临床群体在主动情绪调节时无法有效提升前额 P3 幅度,而且抑郁程度越严重该效应越强(Yuan et al., 2023),这进一步表明了情绪调节时前额 P3 与认知控制资源的紧密联系。综上,不少研究证实了 P3 是情绪调节早期前额认知控制卷入程度的客观指标,但尚未有研究通过直接调节前额 P3 继而观测情绪调节结局的改变,进而揭示前额 P3 指征的认知控制系统在情绪调节启动和实施准备中的作用。

本研究采用神经反馈(neurofeedback, NF)技术解决上述问题。NF 是一种生物反馈技术,它通过实时监测大脑活动,将感兴趣的神经活动模块特征化为指标实时反馈给个体,让个体基于操作性条件反射学习调控该指标,从而达到改变特定神经活动模式的目标(Krause et al., 2024; Lubianiker et al., 2022; Sitaram et al., 2024)。与其他外源性声光电磁神经调控技术相比,NF 作为一种内源性脑调控方式,具有绝对的安全性和零副作用,特别是该技术可以实现对目标神经节点或网络的精准、直接调控(Lubianiker et al., 2022)。在以脑电(electroencephalogram, EEG)为脑监测手段的 NF 中,基于 EEG 节律的 NF 技术已发展得比较成熟,大量研究证实其能有效改善工作记忆更新(theta 频段: Eschmann et al., 2020; Eschmann & Mecklinger, 2022)、抑制控制(alpha 频段: Zhou et al., 2024)以及情绪调节(theta 频段: Li et al., 2025b)等认知功能。相比于 EEG 的自发或引发节律,事件相关电位(event-related potential, ERP)

被认为与具体的认知活动具有更紧密的关系,因此基于 ERP 的 NF 可以为我们了解认知过程提供精确的时空信息。然而目前仅发现了三项 ERP-NF 研究(均为听觉加工领域),其中两项以调增失匹配负波的幅度为 NF 训练目标,成功提高了健康人群的无意识听觉辨别能力(Chang et al., 2014)以及主观认知下降患者的听觉工作记忆(Pei et al., 2020);另有一项 NF 研究尝试训练精神分裂症患者提高其听觉诱发 N100 幅度,但未达到训练效果且并未缓解患者的幻听症状(Rieger et al., 2018)。

鉴于前额 P3 与情绪调节过程认知控制资源卷入的高相关性,本研究通过调控前额 P3 幅度提供前额认知控制功能对情绪调节的因果证据,并为情绪调节障碍患者的无创精准脑治疗提供实证基础。在上述已有的三项 ERP-NF 研究基础上,本研究主要进行了三点改进或补充。第一,考虑到现有研究尚未得到一致的 ERP-NF 训练效果,其原因可能在于假对照组设计的组间效应小导致的假阴性。为此,本研究让两组被试分别上调(实验组)和下调(对照组) P3 幅度。一方面,相反方向调控最大化了 NF 组间效应,并可直接检验 NF 训练的方向是否引起了两组的指标进行反方向的改变。另一方面,两组在训练时均接收真反馈,导致安慰剂效应和练习效应等因素对两组被试的影响程度和方向一致,从而可通过减法原则排除之。第二,我们不仅在前后测中采用了行为指标或主观报告(Chang et al., 2014; Pei et al., 2020; Rieger et al., 2018),还加入了客观的脑观测指标从而更准确评估 NF 训练的效果。本文采用顶区晚正成分(late positive potential, LPP)作为情绪体验强度也即情绪调节效果的客观指标(高可翔等, 2023; Li et al., 2023; Li et al., 2025b; Tang et al., 2025; Zhang et al., 2023; Zhao et al., 2021)。研究发现顶区 LPP 幅度可以排除被试的主观报告偏差,从而更准确地测量情绪体验强度(Zhang et al., 2023)。第三, NF 训练效率的个体差异是 NF 应用领域最为关注的问题(Haugg et al., 2020; Hellrung et al., 2022; Sitaram et al., 2024)。个体能否学会调控特定脑模式? 学习的速度如何? 已有的三项 ERP-NF 研究未就此问题进行报道。根据近期关于 NF 训练个体差异的元分析研究(Alkoby et al., 2018; Haugg et al., 2020)和相关研究文献(Li et al., 2025a),本研究拟考察两个潜在的 NF 训练效率影响因素: 基线阶段的前额 P3 幅度(Alkoby et al., 2018; Haugg et al., 2020)、日常使用认知重评策略的频率(Li et al.,

2025a)。本文假设: P3-NF 可以因果性地改变情绪调节的效果。具体的, 实验组能在 NF 训练期间成功上调前额 P3 幅度, 且该训练效果可显著提高训练后的情绪调节能力(同时反映在情绪主客观指标上), 而对照组则呈现相反模式的改变。同时, ERP-NF 的训练效率或可基于某些因素进行一定程度的预测。

2 方法

2.1 被试

本研究设置实验组和对照组两个组别。在实验设计阶段, 我们使用 G*Power 3.1.9 软件(F tests, ANOVA: repeated measures, within-between interaction) 基于已有相关 NF 研究的核心效应量均值($\eta_p^2 = 0.07$; Eschmann et al., 2020; Eschmann & Mecklinger, 2022; Pei et al., 2020)进行了事前样本量估计。G*Power 中的完整参数设定如下: Effect size $f = 0.28$, $\alpha = 0.05$, 组别数 = 2, 重复测量次数 = 2, 重复测量间相关系数 = 0.5。基于上述参数, 在 Power $(1 - \beta) = 95\%$ 的情况下, 所需最小总样本量为 46 人。当样本量为 64 人时, 研究的统计功效可达 99%。考虑到 NF 训练持续时间较长等原因可能导

致样本流失, 我们招募了 70 名四川师范大学学生参与实验, 实验组和对照组各 35 人。所有参与者均为右利手, 视力正常或矫正后正常, 无神经学或精神病史, 且此前未接受过 NF 相关研究。研究方案经四川师范大学伦理委员会批准, 所有参与者在实验开始前均签署知情同意书。

实验组(1 人)和对照组(2 人)中共 3 名被试未完成全部实验流程(NF 训练期间退出), 将其排除。最终, 实验组包含 34 名被试, 对照组包含 33 名被试。实验开始前, 所有参与者完成以下量表: 贝克抑郁量表 (beck depression inventory second edition, BDI-II; Beck et al., 1996)、斯皮尔伯格特质焦虑量表 (trait form of spielberger's state-trait anxiety inventory, STAI-T; Spielberger et al., 1971)、情绪调节问卷的认知重评子量表(emotion regulation questionnaire, ERQ-R; Gross & John, 2003)。如表 1 所示, 实验组和对照组在年龄、性别和各项问卷得分上均无显著差异。

2.2 实验过程

实验方案见图 1A。首先, 参与者完成预训练任务, 完全掌握 NF 训练要点。接着通过认知重评任务前测, 评估其基线情绪调节表现。随后, 参与者

表 1 本研究两组被试的人口学特征

变量	实验组($n = 34$)	对照组($n = 33$)	统计结果
年龄(岁)	20.15 ± 0.20	20.58 ± 0.27	$t = -1.29, p = 0.202$
性别(女/男)	19/15	21/12	$\chi^2 = 0.42, p = 0.518$
抑郁(BDI-II)	8.12 ± 1.27	9.76 ± 1.380	$t = -0.88, p = 0.384$
特质焦虑(STAI-T)	45.62 ± 1.54	45.12 ± 1.864	$t = 0.21, p = 0.838$
认知重评使用频率(ERQ-R)	31.27 ± 0.86	30.55 ± 1.086	$t = 0.52, p = 0.604$

注: 除性别为卡方检验, 其他为独立样本 t 检验(双尾)。表中的描述统计量表示为均值 $\pm$ 标准误; 缩写: 贝克抑郁量表(beck depression inventory second edition, BDI-II)、斯皮尔伯格特质焦虑量表(trait form of spielberger's state-trait anxiety inventory, STAI-T)、情绪调节问卷的认知重评子量表(emotion regulation questionnaire, ERQ-R)。

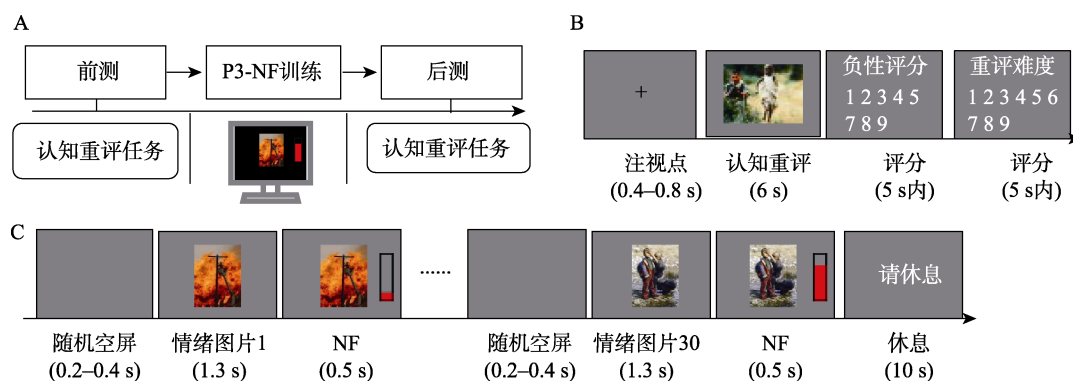


图 1 实验流程。A: 任务流程图。B: 认知重评任务单试次示意图。C: 神经反馈(neurofeedback, NF)单轮次示意图。每经过 30 幅图片(共计 63 s)休息 10 s。被试需升高温度计中红色液体水平。彩图见电子版, 下同。

接受 5 个 sessions 的 P3-NF 训练。训练结束后, 参与者再次完成相同的认知重评任务后测, 以评估 NF 训练带来的情绪调节能力改变。实验刺激呈现使用 Psychtoolbox (版本: 3.0.14; Brainard & Vision, 1997) 工具包。

2.3 情绪调节任务

实验前测和后测任务为认知重评任务。从国际情感图片系统(Lang et al., 1997)中选取 60 张负性图片, 将其分为 2 个子集, 控制 2 个子集图片的效价和唤醒度无差异(效价: $t(58) = 0.00$, $p = 1.000$; 2.48 ± 0.08 vs. 2.48 ± 0.07 ; 唤醒度: $t(58) = -0.17$, $p = 0.87$; 5.31 ± 0.11 vs. 5.34 ± 0.16)。图片匹配流程如下: 1) 纳入 IAPS 图片 100 张, 效价控制在 2.5 分左右, 唤醒度控制在 5 分左右。2) 对于类型相似的图片(例如都是蜘蛛或者都是枪), 每组各分配一张。3) 对各不相同的图片逐一匹配好效价, 分配至两组。4) 计算两组图片的唤醒度 p 值(独立样本 t 检验), 如果有显著差异, 每次从 IAPS 图片库重新选择、替换单组 1~2 张图片, 直到两组图片的唤醒度无显著差异。一半的被试前测使用子集 A, 后测使用子集 B, 另一半被试则相反。实验过程中所有图片呈现在 LCD 屏幕中央, 视角为 $3.0^\circ \times 3.5^\circ$ 。前测前先进行认知重评教学。例如, 面对受伤拳击手的图片时, 被试被提示: 可重新解读为拳击手为荣誉付出巨大努力, 最终战胜了对手。认知重评教学需确保每名被试在至少连续 3 张练习图片情境下能快速口述出认知重评策略。

情绪调节任务每个试次流程见图 1B。每个试次开始时, 呈现 0.4~0.8 s 的注视点。接着, 屏幕呈现负性图片 6 s, 期间被试需运用认知重评策略调节图片带来的情绪反应。考虑到被试已经过充分练习(如: 高可翔 等, 2023; Li et al., 2025a), 6 s 时间足够完成认知重评过程, 同时能节省时间和精力以完成其他实验任务。图片呈现 6 s 后, 参与者需在 5 s 内通过点击鼠标左键报告情绪感受, 采用 9 点评分(“1”表示最轻微负性情绪, “9”表示最强烈负性情绪)。随后, 在 5 s 内报告认知重评任务的困难程度, 同样采用 9 点评分(“1”表示最简单, “9”表示最难)。前后测各包含 30 个试次, 各约 8.3 分钟。实验组最初有 7 名被试、对照组最初有 5 名被试未进行认知重评任务困难程度评分。

2.4 ERP-NF 训练

NF 训练开始前, 由程序随机给被试分组(实验组或对照组)。实验前和实验过程中主试与被试都

未被告知分组信息及其预期效果。两组在反馈形式、任务负荷、奖励规则、实验接触时间上完全等同。NF 训练共包含 5 个阶段(session), 每个阶段包含 5 个轮次(run), 阶段间休息 2 分钟。每个轮次的屏幕呈现内容见图 1C: 首先呈现 0.2~0.4 s 随机空屏, 接着呈现 1.3 s 负性情绪图片, 然后呈现 0.5 s 温度计反馈, 重复 30 次后进入 10 s 休息时间。NF 阶段内的 5 个轮次使用相同的 30 张情绪图片, 但图片呈现顺序在轮次间随机。5 个 NF 阶段采用互不相同的情绪图片。参与者需在观看情绪图片时探索并使用适用于自己的策略(包括但不限于: 调节图片带来的负性情绪, 回忆, 转移注意, 心算, 抑制等高度依赖执行功能的任务), 以提高温度计中红色液体的高度。根据 F3、F4 和 Fz 电极的平均 P3 幅度计算温度计中红色液体的高度(具体见 2.6 节 NF 数据在线分析)。对于实验组, 当前额 P3 幅度增加时, 红色液体高度上升; P3 幅度减少时, 红色液体高度下降。对照组则相反, 红色液体高度随着 P3 幅度上升而下降。整个 NF 训练过程持续约 39 分钟。

从中国情绪图片系统(白露 等, 2005)中选取 150 张负性图片, 将其分为 5 个子集, 控制 5 个子集图片的效价和唤醒度无差异(效价: $F(4, 145) = 0.16$, $p = 0.960$; 2.70 ± 0.06 vs. 2.76 ± 0.07 vs. 2.71 ± 0.05 vs. 2.70 ± 0.07 vs. 2.71 ± 0.06 ; 唤醒度: $F(4, 145) = 0.16$, $p = 0.960$; 5.06 ± 0.07 vs. 5.09 ± 0.08 vs. 5.10 ± 0.07 vs. 5.13 ± 0.06 vs. 5.06 ± 0.07)。每名被试在 5 个 NF 阶段中使用的图片子集顺序通过伪随机序列确定。

2.5 脑电信号采集

使用 32 通道无线脑电放大器(NeuSen. W32, 博睿康科技股份有限公司, 中国常州)采集脑电信号。采样率设置为 1000 Hz, 电极阻抗控制在 5 k Ω 以下, 参考电极为左侧乳突, 地电极位于 Cz。

2.6 NF 数据在线分析

使用 MATLAB (2023a) 中的自定义脚本对实时脑电数据进行在线分析。根据前额 P3 幅度的变化实时更新温度计的显示。P3 幅度计算包括以下步骤: 首先对前额 Fz、F3、F4 电极的脑电信号进行 0.1~30 Hz 的带通滤波, 计算情绪图片呈现后 300~1300 ms 时间窗内信号的平均幅度, 并进行基线校正(减去情绪图片开始前 200 ms 时间窗内信号的平均幅度), 最后计算 Fz、F3、F4 三个电极的平均值。温度计的最大高度为 20 cm, 每个 NF 轮次开始时设定首张图片温度计的红色液体高度为 0 cm, 轮

次进程中根据每张图片诱发的前额 P3 幅度更新相应温度计中红色液体的高度。参考之前两项 ERP-NF 研究(Chang et al., 2014; Pei et al., 2020), 实验组的更新规则为: 每次红色液体高度等于当前图片诱发 P3 幅度和前 5 张图片诱发的平均 P3 幅度之差的 2 倍。即如果 P3 幅度相比之前 5 个 P3 幅度的均值上升 0.5 μV , 则红色液体高度上升 1 cm。每个试次第 2、3、4、5 张图片的红色液体高度根据各自此前的 1、2、3、4 次 P3 幅度的均值进行相应更新。每次红色液体高度上升或下降的范围限制在 -2 到 2 cm 之间, 如单次 P3 幅度增加或减少超过 1 μV , 仍按 2 cm 或 -2 cm 更新色液体高度。对照组按照与实验组完全相反的方向更新红色液体高度。

2.7 离线数据分析

使用 EEGLAB 工具包(2022.0; Delorme & Makeig, 2004)和 MATLAB (2023a)中的自定义脚本对离线脑电数据进行处理。首先将连续记录的原始数据从 1000 Hz 降采样至 250 Hz, 随后使用 0.1~30 Hz 带通滤波器去除低频漂移和低频噪声, 并以双侧乳突电极的均值作为参考电极进行重参考。接着使用独立成分分析识别并半自动化剔除眼动伪迹。

针对 NF 训练和情绪调节任务, 将连续脑电数据按图片呈现前 200 ms 至图片呈现后 1300 ms (NF 训练)或 6000 ms (情绪调节任务)进行分段, 并以图片呈现前 200 ms 作为基线进行基线校正。随后, 采用 $\pm 150 \mu\text{V}$ 的幅度阈值剔除伪迹过大的分段。

本研究的 ERP 分析聚焦于两个关键成分: 前额 P3 和顶区 LPP。参照已有研究, 前额 P3 定义为图片呈现后 300~1300 ms 时间窗内前额电极点(Fz、F3、F4)的平均波幅, 反映自上而下的认知控制和注意资源的分配(Yuan et al., 2023; Zhang et al., 2023)。顶区 LPP 定义为图片呈现后 1500~6000 ms 时间窗内顶区电极点(Pz、P3、P4)的平均波幅, 反映对情绪刺激的持续性加工和情绪唤醒的强度(Li et al., 2022; Zhao et al., 2021)。

2.8 统计方法

使用 RStudio (2021.09.0)和 R (4.2.2)进行统计分析。描述性统计结果以“均值 $\pm$ 标准误(SE)”的形式表示。

为评估 NF 训练的有效性, 采用线性混合效应回归(linear mixed effects regression, LMER)统计检验 NF 训练过程中前额 P3 的幅度, 通过 lme4 工具包实现(Bates et al., 2015)。将所有试次的前额 P3 幅度建模为两个中心化的固定因子(训练阶段和组

别)及其交互作用的函数。编码方式均采用正交对比编码(Wu et al., 2022)。具体如下: 组别采用二项式编码(实验组: +1/2, 对照组: -1/2); 训练阶段采用二项式编码: 将 session 4 (+1/4)、5 (+1/4)与 session 1 (-1/6)、session 2 (-1/6)、session 3 (-1/6)进行比较。此外, 该模型还包含被试的最大随机效应结构(Barr et al., 2013), 后者包括随机截距和训练阶段主效应的随机斜率(见公式 1), 如果 LMER 出现过拟合情况则删除训练阶段主效应的随机斜率以促进拟合。采用 lmerTest 包的 Satterthwaite 近似法计算 p 值(Kuznetsova et al., 2017)。如果存在显著的主效应或者交互作用, 使用 emmeans 包(Fernandez-Duque et al., 2023)进行事后比较, 并采用 FDR 方法调整 p 值以校正多重比较。

情绪调节任务中的负性情绪评分、认知重评难度、前额 P3 幅度、顶区 LPP 幅度同样在试次层面采用 LMER 进行统计检验。模型包含前后测和组别的固定效应及其交互作用。前后测采用二项式编码, 前测任务赋值为 -1/2, 后测任务赋值为 +1/2。被试的随机效应结构包含随机截距和前后测主效应的随机斜率(见公式 2)。

$$Y \sim \text{训练 Session} * \text{组别} + (1 + \text{训练 session} | \text{被试}) \quad (\text{公式 1})$$

$$Y \sim \text{前后测} * \text{组别} + (1 + \text{前后测} | \text{被试}) \quad (\text{公式 2})$$

为检验 NF 训练效率与后续情绪调节改善之间的关系, 将 NF 训练效率量化为前额 P3 在 5 个训练 session 中的简单线性回归斜率(Li et al., 2025a, 2025b)。随后采用 Pearson 相关分析, 将该指标与前后测阶段负性情绪评分、P3 和顶区 LPP 幅度的变化进行相关。同时, 采用 FDR 方法调整所有相关分析的 p 值以校正多重比较。此外, 为确定 NF 训练效率是否通过调节情绪调节期间前额 P3 幅度变化来改变情绪调节效果, 采用 bruceR 工具包(版本: 0.8.9)中的 PROCESS 函数合并两组数据进行中介分析(Bao, 2022)。本研究合并两组数据, 采用 NF 训练效率替代组别作为中介分析的自变量, 在被试层级进行中介分析, 基于以下两点考虑: 第一、NF 学习成功与否, 目前普遍采用训练轮次的回归斜率来衡量(见元分析: Haugg et al., 2020), 大概 50% 的被试不能从 NF 中达到明显训练效果。在本研究中, NF 训练过程中 P3 幅度的调控程度直接影响了情绪调节效果的改变——即使在上调组内, 未能学会上调 P3 的被试(NF 效率低)其情绪调节效果也没有显

著提升。因此,我们认为使用更直接的 NF 效率作为中介分析的自变量更为合理。第二,本研究分为上调和下调组两个相反方向的调控。因此,合并两组的 NF 训练效率数据,不仅在统计上涵盖了实验操纵效应,还因样本量的增加提升了中介分析的统计效力和估计的可靠性。在该分析中,NF 训练效率作为自变量,情绪调节任务中前额 P3 变化(后测减前测)作为中介变量,负性情绪评分或 LPP 幅度变化(后测减前测)作为因变量,并控制组别作为协变量。基于 1000 个马尔可夫链蒙特卡洛样本估算中介效应及其 95%偏差校正置信区间(CI)。最后为了考察 NF 训练效率可能的影响因素,我们建立了包含年龄、性别、ERQ-R、BDI-II、STAI-T 和前测 P3 幅度的多元线性回归模型来预测 NF 训练效率。相关、中介和回归分析剔除了 ± 3 个标准差之外的极端值。

3 结果

3.1 NF 训练期间的 P3 幅度

我们采用 LMER 分析了 5 个 NF 训练阶段

(session)前额 P3 的幅度(图 2)。结果显示,组别的主效应显著, $\beta = 2.17$, $t(65) = 2.51$, $p = 0.015$, 实验组的前额 P3 幅度($3.256 \pm 0.676 \mu\text{V}$)显著高于对照组($1.09 \pm 0.53 \mu\text{V}$)。组别与训练 session 之间存在交互作用, $\beta = 3.14 \mu\text{V}$, $t(65) = 3.06$, $p = 0.002$, 见图 2A。事后成对比较在 session 3、4、5 上发现了实验组的前额 P3 显著高于对照组, 实验组 vs. 对照组: session 3: 3.40 ± 0.77 vs. $0.75 \pm 0.49 \mu\text{V}$; $\beta = 2.65 \mu\text{V}$, $t(65) = 2.76$, $p = 0.006$; session 4: 3.63 ± 0.85 vs. $0.65 \pm 0.49 \mu\text{V}$; $\beta = 2.97 \mu\text{V}$, $t(65) = 3.10$, $p = 0.002$; session 5: 4.08 ± 0.70 vs. $1.15 \pm 0.74 \mu\text{V}$; $\beta = 2.94 \mu\text{V}$, $t(65) = 3.06$, $p = 0.002$ 。对两组被试的 NF 训练效率(计算方式为前额 P3 在 5 个训练 session 中的简单线性回归斜率)进行独立样本 t 检验,结果发现实验组的 NF 训练效率显著高于对照组(实验组: 0.40 ± 0.16 ; 对照组: -0.13 ± 0.13 ; $t(65) = 2.60$, $p = 0.011$; 图 2B)。

此外,口头询问表明被试无法识别其组别。实验结束后,询问被试“您认为自己被分配到实验组还是对照组?”,被试的回答在两组间无显著差异,

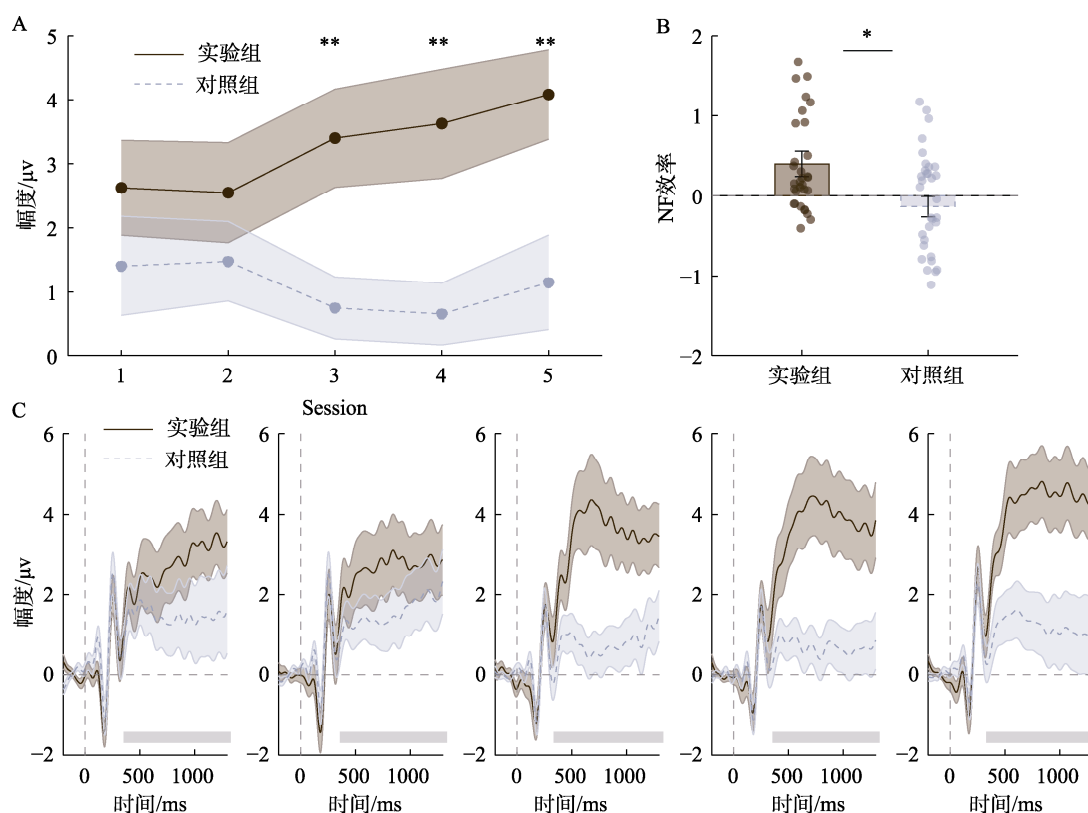


图 2 前额 P3 在神经反馈(neurofeedback, NF)训练中的改变。A: NF 训练期间前额 P3 幅度变化。B: 实验组与对照组 NF 训练效率(前额 P3 在 5 个训练 session 中的简单线性回归斜率)及其独立样本 t 检验结果。C: NF 训练过程中的前额 P3 波形图, 从左到右分别为 session 1 到 session 5 的波形。前额 P3 幅度为电极点 Fz、F3、F4 的幅度均值。图中橙色和蓝色误差范围表示标准误, 灰色条表示 P3 幅度的计算时间窗。显著性水平: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

$\chi^2 = 0.74, p = 0.389$ 。本研究仅在被试完成所有实验任务后才告知其所属的组别。

3.2 情绪调节任务的 P3 幅度

情绪调节任务中前额 P3 幅度的 LMER 分析显示, 组别 $\times$ 前后测交互作用显著, $\beta = 5.29 \mu\text{V}$, $t(65) = 5.40, p < 0.001$, 见图 3A。事后比较显示, 后测阶段, 实验组的前额 P3 幅度($3.49 \pm 0.94 \mu\text{V}$)显著高于对照组, $-2.34 \pm 2.19 \mu\text{V}$; $\beta = 5.68 \mu\text{V}$, $t(65) = 3.56, p < 0.001$ 。前测阶段未观察到组间差异, 实验组: $-0.05 \pm 1.96 \mu\text{V}$ vs. 对照组: $0.77 \pm 1.13 \mu\text{V}$; $\beta = -0.01 \mu\text{V}$, $t(65) = -0.004, p = 0.997$ 。实验组的前额 P3 幅度从训练前(-0.05 ± 1.96)到训练后($3.49 \pm 0.94 \mu\text{V}$)显著增加, $\beta = 2.29 \mu\text{V}$, $t(65) = 3.28, p = 0.001$ 。相反, 对照组的前额 P3 幅度从训练前($0.77 \pm 1.13 \mu\text{V}$)到训练后($-2.34 \pm 2.19 \mu\text{V}$)显著降低, $\beta = -3.01 \mu\text{V}$, $t(65) = -4.37, p < 0.001$ 。相关分析显示, 两组被试的 NF 训练效率与情绪调节任务下的前额 P3 幅度的变化(后测减去前测)显著相关, $r = 0.28, p(\text{FDR}) = 0.034$, 见图 3B。

3.3 情绪调节任务的主观评分和顶区 LPP 幅度

自我报告负性评分的 LMER 分析显示, 组别 $\times$ 前后测交互作用显著, $\beta = -0.59$, $t(65) = -5.32, p < 0.001$, 见图 4A。事后比较显示, 后测阶段, 实验组的负性评分(3.16 ± 0.21)显著低于对照组, 3.83 ± 0.25 ; $\beta = -0.67$, $t(65) = -2.19, p = 0.028$ 。前测阶段未观察到组间差异, 实验组: 3.46 ± 0.20 vs. 对照组: 3.54 ± 0.23 ; $\beta = -0.09$, $t(65) = -0.28, p = 0.777$ 。实验组的负性评分从训练前(3.46 ± 0.20)到训练后(3.16 ± 0.21)显著降低, $\beta = -0.30$, $t(65) = -3.84, p < 0.001$ 。相反, 对照组的负性评分从训练前(3.54 ± 0.23)到训练后(3.83 ± 0.25)显著增加, $\beta = 0.29$, $t(65) = 3.69, p < 0.001$ 。相关分析显示, 两组被试 NF 效

率与负性评分变化呈显著负相关, $r = -0.43, p(\text{FDR}) < 0.001$ 。此外, 两组被试在情绪调节任务前后测的前额 P3 幅值变化与负性评分变化呈显著负相关, $r = -0.47, p(\text{FDR}) < 0.001$, 见图 4C。

情绪调节调节难度评分的 LMER 分析显示, 组别 $\times$ 前后测交互作用显著, $\beta = -0.52$, $t(53) = -3.86, p < 0.001$, 见图 4B。事后比较显示, 实验组的调节难度从训练前(3.39 ± 0.19)到训练后(3.37 ± 0.21)显著降低, $\beta = -0.24$, $t(53) = -2.50, p = 0.012$ 。相反, 对照组的调节难度从训练前(3.14 ± 0.20)到训练后(3.66 ± 0.25)显著增加, $\beta = 0.28$, $t(53) = 2.96, p = 0.003$ 。相关分析显示, 两组被试在情绪调节任务下的前额 P3 幅值的变化与重评难度降低呈显著负相关, $r = -0.42, p(\text{FDR}) = 0.005$ 。但没有发现两组被试 NF 效率与重评难度降低的显著相关, $r = -0.08, p(\text{FDR}) = 0.583$ 。

顶区 LPP 幅度的 LMER 分析显示, 前后测主效应显著, $\beta = -2.23 \mu\text{V}$, $t(65) = -2.58, p = 0.012$ 。被试在后测的 LPP 幅度($2.03 \pm 0.91 \mu\text{V}$)显著低于前测($4.27 \pm 0.76 \mu\text{V}$)。更重要的是, 组别 $\times$ 前后测交互作用显著, $\beta = -4.23 \mu\text{V}$, $t(65) = -2.45, p = 0.017$, 见图 4D。事后比较显示, 后测阶段, 实验组的 LPP 幅度($0.19 \pm 1.31 \mu\text{V}$)显著低于对照组, $3.92 \pm 1.20 \mu\text{V}$, $\beta = -3.62 \mu\text{V}$, $t(65) = -2.06, p = 0.039$ 。前测阶段未观察到显著变化, 实验组: 4.53 ± 1.15 vs. 对照组: $4.00 \pm 1.01 \mu\text{V}$; $\beta = 0.61 \mu\text{V}$, $t(65) = 0.41, p = 0.683$ 。实验组的 LPP 幅度从训练前(4.53 ± 1.15)到训练后($0.19 \pm 1.31 \mu\text{V}$)显著降低, $\beta = -4.34 \mu\text{V}$, $t(65) = -3.56, p < 0.001$ 。相反, 对照组的 LPP 幅度训练前($4.00 \pm 1.01 \mu\text{V}$)和训练后($3.92 \pm 1.20 \mu\text{V}$)没有差异, $\beta = -0.11 \mu\text{V}$, $t(65) = -0.09, p = 0.927$ 。相关分析显示, 两组被试 NF 效率与 LPP 幅度变化呈显

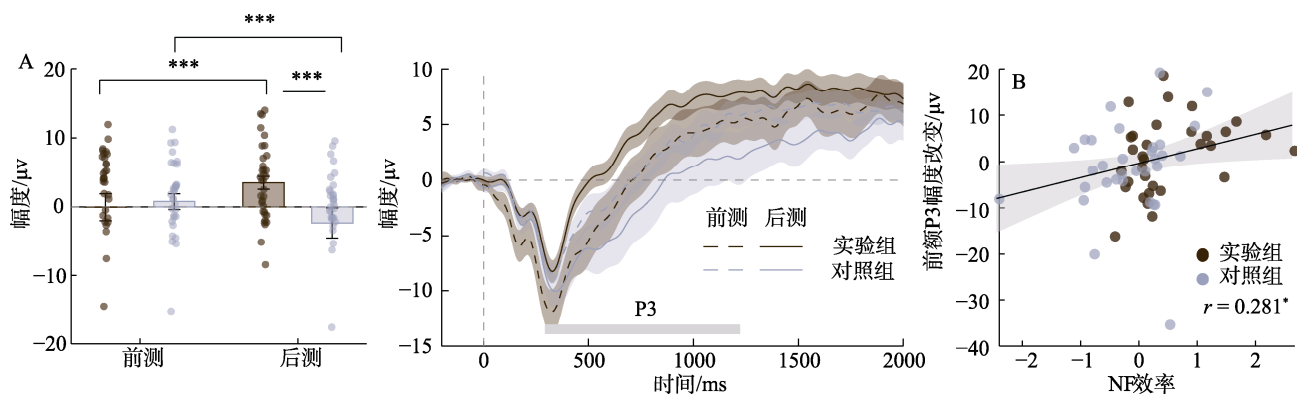


图 3 前额 P3 在情绪调节任务中的改变。A: 前额 P3 幅度和波形。数据为 Fz、F3、F4 的均值。B: NF 训练效率与前额 P3 幅度改变(后测减前测)的相关。显著性水平: * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ 。

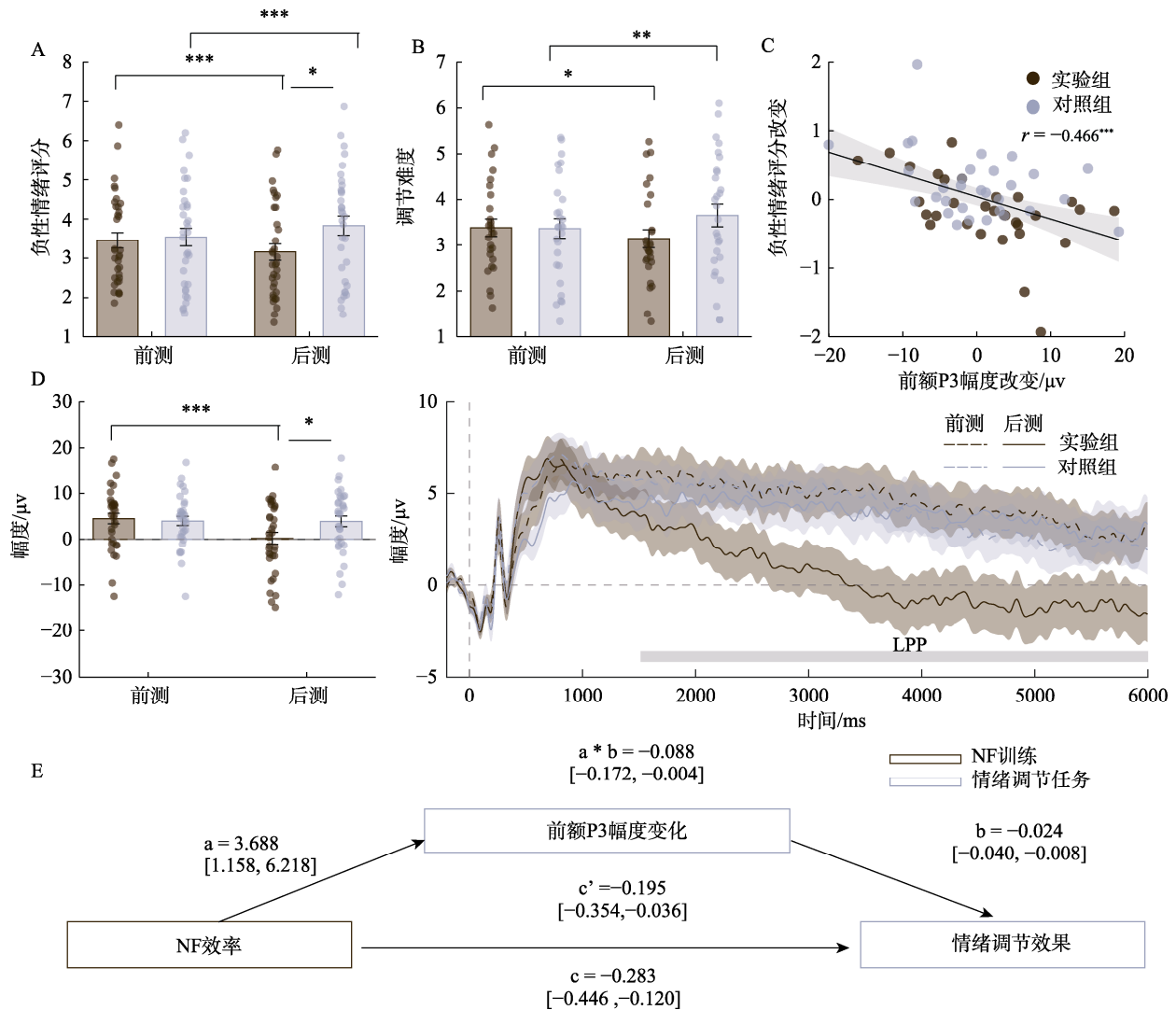


图 4 情绪调节的效果改变。A: 主观负性情绪强度评分。B: 重评难度评分。C: 前额 P3 幅度改变(后测减前测)与负性情绪评分改变(后测减前测)的相关。D: 情绪调节中顶区 LPP 的幅度和波形。数据为 Pz、P3、P4 的均值。E: 中介分析结果: NF 训练效率作为自变量, 情绪调节任务的前额 P3 改变(后测减前测)作为中介变量, 负性情绪评分变化(后测减前测)作为因变量。显著性水平: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。

著负相关, $r = -0.27$, $p(\text{FDR}) = 0.036$ 。此外, 两组被试在情绪调节任务前后测的前额 P3 和 LPP 幅度变化呈显著负相关, $r = -0.32$, $p(\text{FDR}) = 0.019$ 。

3.4 中介分析和回归分析

为了探索 NF 训练效率、情绪调节任务的前额 P3 变化和情绪调节效果之间的关系, 我们对这三个变量进行了中介分析。根据研究假设, 我们认为 NF 训练效率的提高对主观负性情绪强度的影响是通过情绪调节任务的前额 P3 幅度改变来中介的。在该模型中, NF 训练效率作为自变量, 情绪调节任务的前额 P3 变化(后测减前测)作为中介变量, 负性情绪评分或 LPP 幅度变化(后测减前测)作为因变量, 并控制组别作为协变量。因变量为负性情绪评分变化的中介分析结果见图 4E: 总效应显著, $c = -0.28$

± 0.08 , $Z = -3.43$, $p < 0.001$ 。中介效应显著, $a \times b = -0.09 \pm 0.04$, $Z = -2.06$, $p = 0.040$ 。直接效应显著, $c' = -0.20 \pm 0.08$, $Z = -2.42$, $p = 0.016$ 。这些结果表明, 情绪调节过程中的前额 P3 幅度增加在 NF 训练效率提高与情绪调节效果提升之间起部分中介作用。但是, LPP 幅度变化作为因变量进行中介分析没有发现显著的中介效应, $a \times b = -0.59 \pm 0.44$, $Z = -1.35$, $p = 0.176$ 。

最后, 为了探索影响上述自变量——NF 训练效率的潜在因素, 我们建立了包含年龄、性别、认知重评日常使用频率(ERQ-R)、特质焦虑(STAI-T)和抑郁水平(BDI-II)和前测情绪调节 P3 幅度的多元线性回归模型, 用以预测个体的 NF 训练效率。虽然整体模型并未显著, $R^2 = 0.13$, $F = 1.41$, $p = 0.227$,

但 ERQ-R 显示出显著的预测作用, $\beta = 0.30$, $t = 2.32$, $p = 0.024$, 见表 2。其他因素均未显示出显著的预测作用($p > 0.05$)。

4 讨论

本研究首次从两个相反的调控方向考察了 ERP-NF 的训练过程和训练效果, 证实了该技术的科研和应用推广价值。NF 训练期间, 实验组(上调前额 P3)的前额 P3 幅度随训练进程显著上升, 而对照组(下调前额 P3)则呈现下降趋势。值得注意的是, 两组(特别是实验组)均表现出了较典型的非线性学习轨迹: 前三个训练 session 中 P3 幅度变化显著(上调组快速增加, 下调组快速减小), 随后逐渐趋于稳定。这一变化模式与既往 NF 研究观察到的非线性学习曲线高度一致(Eschmann & Mecklinger, 2022; Li et al., 2025b; Sepulveda et al., 2016)。根据强化学习理论框架(Lubianiker et al., 2022), 该学习曲线反映了 NF 的两阶段习得过程: 训练早期, 被试通过试错快速建立特定认知策略与目标 NF 信号之间的关联; 训练后期, 被试进入精细化调整阶段, 通过重复实践巩固并优化有效策略, 最终实现对前额 P3 的稳定调控(Sitaram et al., 2024)。NF 训练后, 实验组在情绪调节任务中的前额 P3 幅度显著增高, 对照组则显著降低, 且 NF 训练效率与情绪调节的前额 P3 幅度变化存在正相关。该结果表明, P3-NF 训练具有迁移效应, 即训练期间习得的神经调控能力能迁移至训练后的情绪调节任务(Li et al., 2025b)。

本研究的主要贡献在于提供了直接的因果证据, 证明前额 P3 所指征的前额叶认知控制资源是情绪调节早期阶段的神经基础。P3-NF 训练后的情绪调节任务中, 实验组的主观负性情绪评分和顶区 LPP 幅度显著降低, 而对照组则增加。同时, 无论是实验组还是对照组, 情绪调节过程中前额 P3 幅度的变化都与情绪调节效果的改变相关。之前的情

绪调节研究已经发现, 情绪调节早期需要认知控制资源的大量投入, 表现为前额 P3 幅度的增加(Yuan et al., 2015, 2023; Zhang et al., 2023)。例如, 相较于内隐情绪调节或被动观看, 当被试采用主动情绪调节策略下调负性情绪时, 前额 P3 幅度显著提升, 这表明前额投入了更多认知控制资源来支持情绪调节的启动和实施准备(Zhang et al., 2023)。进一步研究发现, 前额 P3 的增强可预测情绪调节的效果, 即主观负性情绪强度的降低(Yuan et al., 2023)。但这些研究仅采用了相关的观测性方法, 本研究直接操纵了前额 P3 的幅度变化, 因此证明了前额 P3 所指征的认知控制资源对情绪调节的因果性作用。此外, 中介分析结果表明, NF 训练效率的提高是通过增加情绪调节过程中的前额 P3 幅度来促进情绪调节效果的, 进一步突显了前额 P3 的重要作用。

根据 Gross 团队提出的情绪调节 perception-valuation-action 模型, 在情绪调节的早期阶段, 个体先感知负性刺激(perception)并进行情绪情境评估(valuation)以及情绪调节的准备, 这一阶段涉及注意控制、知觉整合、元认知、自我参照、记忆控制、目标表征和评价等多项认知功能, 高度依赖以前额叶为核心的认知控制系统(Zhang et al., 2025)。经颅磁刺激研究已经支持了前额叶在情绪调节早期阶段的重要作用, 研究者发现在情绪图片呈现后 0、400 或 600 ms 干扰背外侧或腹外侧前额叶的神经活动, 会导致个体的负性情绪体验增强(Cheng et al., 2024)。在此基础上, 本研究采用 NF 技术发现, 调控前额 P3 (300~1300 ms: 反映早期认知控制资源调用程度)会直接改变情绪调节的效果, 且情绪调节的前额 P3 增强与情绪调节效果的提升存在正相关。同时, 在已有的三项 ERP-NF 研究基础上, 我们不仅采用主观报告的情绪指标, 还加入了客观的顶区 LPP 指标, 从而更准确评估 NF 训练对情绪调

表 2 NF 训练效率影响因素的回归分析

模型参数	标准化系数 (β)	SE	t	p	95% CI
$R^2 = 0.13$, $F = 1.41$, $p = 0.227$	性别 = -0.08	0.13	-0.66	0.514	[-0.34, 0.17]
	年龄 = 0.004	0.13	0.03	0.977	[-0.25, 0.26]
	BDI-II = -0.02	0.18	-0.13	0.901	[-0.38, 0.34]
	STAI-T = 0.13	0.18	0.70	0.485	[-0.23, 0.48]
	ERQ-R = 0.30	0.13	2.32	0.024*	[0.04, 0.55]
	前测 P3 幅度 = -0.14	0.13	-1.10	0.277	[-0.39, 0.11]

缩写: 贝克抑郁量表 (beck depression inventory second edition, BDI-II)、斯皮尔伯格特质焦虑量表(trait form of spielberger's state-trait anxiety inventory, STAI-T)、情绪调节问卷的认知重评子量表(emotion regulation questionnaire, ERQ-R)。SE 标准误。显著性水平: * $p < 0.05$ 。

节的作用。这些指标一致表明,前额叶在情绪调节早期阶段就显著参与了调节的准备和启动工作,提高前额叶 P3 的幅度可以稳定提高情绪调节效果。

除了上述主要发现,本研究还考察了 NF 训练效果的个体差异。结果发现,ERP-NF 训练的有效性存在显著的个体差异,并非所有个体都能在 NF 训练中有所获益,这与基于其他脑观测指标的 NF 研究发现一致(Haugg et al., 2020)。NF 过程要求被试实时观察与自己脑活动相关的反馈信号,并通过努力探索和试错多种策略,将反馈信号调控到符合要求或预期的范围内(Sitaram et al., 2024),并不是所有的被试都能成功完成上述目标。我们的结果发现,实验组约 74% 的被试能够成功上调前额 P3 幅值(训练效率为正值),下调组仅有 52% 的被试能够成功下调前额 P3 幅值(训练效率为负值)。探索性分析发现,在以提高情绪调节能力为目标的 NF 训练中,与日常情绪调节习惯相关的特征(例如认知重评的使用频率)能显著预测个体的 NF 训练效率,这之前两项基于腹外侧前额叶的情绪调节 NF 研究的发现一致(Keller et al., 2021; Li et al., 2025a)。基于此,我们提出三条优化策略以应对个体差异带来的挑战:1) 在正式 NF 训练之前安排针对性认知训练(例如练习认知重评等情绪调节策略),激活相关神经回路;2) 建立筛选机制(例如利用自评或他评量表),评估并优先纳入具有神经可塑性潜力的个体,从而提高 NF 训练成功率(Yu et al., 2021);3) 增强个体对 NF 训练的动机以及训练过程中的持续性注意,因为注意分配和动机水平被证明是 NF 效率的调节因素(Kadosh & Staunton, 2019)。

我们的研究对抑郁症等存在情绪调节功能损伤的患者提供了脑调控治疗的新思路。与经颅磁刺激和电刺激等外源性神经调控技术相比,NF 具有显著优势:安全性高、毫无副作用(Krause et al., 2024; Stultz et al., 2020),且患者在掌握了个性化的调控神经活动的技巧和策略后,无需外部设备即可随时、独立进行脑调控训练以维持治疗效果(Ramot et al., 2017)。此外,研究结果表明顶区 LPP 可作为情绪调节效果和能力的客观指标,它能减少患者主观报告偏差对临床疗效评估和治疗方案调整的负面影响(Colagiuri et al., 2015)。除了对情绪调节障碍有治疗启示,本研究证实的前额 P3-NF 训练的有效性还有望帮助注意缺陷多动障碍、阿尔茨海默症等患者改善其症状的核心问题,即前额叶执行控制功能缺陷。

尽管如此,我们建议在解读结果以及计划未来相关研究时考虑本研究的以下局限性。第一,我们只关注了 0.3~1.3 s 的前额 P3 幅度,因此仅能调控前额叶参与情绪调节过程的早期阶段。ERP 的瞬时性和短时程性可以帮助我们精确瞄准某个认知模块,但该技术很难持续测量长时程的动态认知过程全貌。未来基于 EEG-NF 的情绪调节研究应同时关注早期的 ERP 成分(例如前额 P3)以及中晚期的 EEG 振荡特性,从而更全面地解析并调控情绪调节全过程的电生理机制。第二,本研究样本仅包含健康大学生,因此前额 P3-NF 效果能否推广至存在情绪调节缺陷的临床群体仍有待验证。第三,本研究只进行了单次 NF 训练并考察了即时迁移效应。参考已有的情绪调节 NF 研究,虽然无论是单次训练(约 25 分钟: Keller et al., 2021; Paret et al., 2016; Keynan et al., 2016)还是多次训练(4~6 次,每次约 15 分钟: Herwig et al., 2019; Keynan et al., 2019),NF 都能提升情绪调节效果,但 NF 效应会随着训练次数增加而增强(Yu et al., 2021),并且可以持续至少一周(Young et al., 2017)。未来研究应继续考察多次前额 P3-NF 训练并对效果进行数周甚至更长时间的追踪。最后,我们还应继续探索 P3-NF 训练对其他情绪调节策略的影响,如分心和表达抑制,因为这些策略同样需要依赖认知控制资源(Li et al., 2023; Shafir et al., 2015)。

5 结论

本研究采用 NF 训练调控前额 P3 幅度以改变情绪调节能力。情绪调节后测的主观负性评分和顶区 LPP 指标一致表明,上调前额 P3 幅度可显著提升情绪调节效果,而下调 P3 幅度则削弱情绪调节能力和效果。其中,P3-NF 训练对情绪调节的改善主要是通过增加后续情绪调节的前额 P3 幅度来实现的。与以往的脑观测相关性研究不同,我们通过 ERP-NF 脑调控技术证明了前额 P3 所指征的前额叶认知控制资源是情绪调节早期阶段的因果性神经基础。这一发现为理解情绪调节的神经电生理机制提供了新见解,同时对临床治疗前额叶执行控制功能缺陷提供了精准无创脑调控的新思路。

参 考 文 献

- Alkoby, O., Abu-Rmileh, A., Shriki, O., & Todder, D. (2018). Can we predict who will respond to neurofeedback? A review of the inefficacy problem and existing predictors for successful EEG neurofeedback Learning. *Neuroscience*,

- 378, 155–164.
- Bai, L., Ma, H., Huang, Y. X., & Luo, Y. J. (2005). The development of native Chinese affective picture system--A pretest in 46 College Students. *Chinese Mental Health Journal*, 11, 4–7.
- [白露, 马慧, 黄宇霞, 罗跃嘉. (2005). 中国情绪图片系统的编制——在 46 名中国大学生中的试用. *中国心理卫生杂志*, 11, 4–7.]
- Bao, H. W. S. (2022). *BruceR: Broadly useful convenient and efficient R functions*. v0.8 (version 0.8). <https://CRAN.R-project.org/package=bruceR>.
- Barr, D. J., Levy, R., Scheepers, C., & Tily, H. J. (2013). Random effects structure for confirmatory hypothesis testing: Keep it maximal. *Journal of Memory and Language*, 68(3), 255–278.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48.
- Beck, A. T., Steer, R. A., Brown, G. K. (1996). *Beck depression inventory* (2nd ed.). The Psychological Corporation.
- Bernat, E. M., Cadwallader, M., Seo, D., Vizueta, N., & Patrick, C. J. (2011). Effects of instructed emotion regulation on valence, arousal, and attentional measures of affective processing. *Developmental Neuropsychology*, 36(4), 493–518.
- Brainard, D. H., & Vision, S. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial vision*, 10(4), 433–436.
- Chang, M., Iizuka, H., Naruse, Y., Ando, H., & Maeda, T. (2014). Unconscious learning of auditory discrimination using mismatch negativity (MMN) neurofeedback. *Scientific Reports*, 4, 6729.
- Cheng, S., Qiu, X., Mo, L., Li, S., Xu, F., & Zhang, D. (2024). Asynchronous involvement of VLPFC and DLPFC during negative emotion processing: An online transcranial magnetic stimulation study. *Neuroscience*, 551, 237–245.
- Colaguri, B., Schenk, L. A., Kessler, M. D., Dorsey, S. G., & Colloca, L. (2015). The placebo effect: From concepts to genes. *Neuroscience*, 307, 171–190.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1), 9–21.
- Eschmann, K. C. J., Bader, R., & Mecklinger, A. (2020). Improving episodic memory: Frontal-midline theta neurofeedback training increases source memory performance. *Neuroimage*, 222, 117219.
- Eschmann, K. C. J., & Mecklinger, A. (2022). Improving cognitive control: Is theta neurofeedback training associated with proactive rather than reactive control enhancement. *Psychophysiology*, 59(5), e13873.
- Fernandez-Duque, M., Hayakawa, S., & Marian, V. (2023). Speakers of different languages remember visual scenes differently. *Science Advances*, 9(33), e0064.
- Gao, K., Zhang, Y., Li, S., Yuan, J., Li, H., & Zhang, D. (2023). Ventromedial prefrontal cortex plays a critical role on implicit emotion regulation: A tDCS study. *Acta Psychologica Sinica*, 55(2), 210–223.
- [高可翔, 张岳瑶, 李思瑾, 袁加锦, 李红, 张丹丹. (2023). 腹内侧前额叶在内隐认知重评中的因果作用. *心理学报*, 55(2), 210–223.]
- Gross, J. J., & John, O. P. (2003). Individual differences in two emotion regulation processes: Implications for affect, relationships, and well-being. *Journal of Personality and Social Psychology*, 85(2), 348–362.
- Haugg, A., Sladky, R., Skouras, S., McDonald, A., Craddock, C., Kirschner, M., ... Scharnowski, F. (2020). Can we predict real-time fMRI neurofeedback learning success from pretraining brain activity? *Human Brain Mapping*, 41(14), 3839–3854.
- He, Z., Li, S., Mo, L., Zheng, Z., Li, Y., Li, H., & Zhang, D. (2023). The VLPFC-engaged voluntary emotion regulation: Combined TMS-fMRI evidence for the neural circuit of cognitive reappraisal. *The Journal of Neuroscience*, 43(34), 6046–6060.
- Hellrung, L., Kirschner, M., Sulzer, J., Sladky, R., Scharnowski, F., Herdener, M., & Tobler, P. N. (2022). Analysis of individual differences in neurofeedback training illuminates successful self-regulation of the dopaminergic midbrain. *Communications Biology*, 5(1), 845.
- Herwig, U., Lutz, J., Scherpiet, S., Scheerer, H., Kohlberg, J., Opialla, S., ... Brühl, A. B. (2019). Training emotion regulation through real-time fMRI neurofeedback of amygdala activity. *Neuroimage*, 184, 687–696.
- Kadosh, K. C., & Staunton, G. (2019). A systematic review of the psychological factors that influence neurofeedback learning outcomes. *Neuroimage*, 185, 545–555.
- Keller, M., Zwerings, J., Klasen, M., Zvyagintsev, M., Iglesias, J., Mendoza Quiñones, R., & Mathiak, K. (2021). fMRI neurofeedback-enhanced cognitive reappraisal training in depression: A double-blind comparison of left and right vlpfc regulation. *Frontiers in Psychiatry*, 12, 715898.
- Keynan, J. N., Cohen, A., Jackont, G., Green, N., Goldway, N., Davidov, A., ... Hendler, T. (2019). Electrical fingerprint of the amygdala guides neurofeedback training for stress resilience. *Nature Human Behaviour*, 3(1), 63–73.
- Keynan, J. N., Meir-Hasson, Y., Gilam, G., Cohen, A., Jackont, G., Kinreich, S., ... Hendler, T. (2016). Limbic activity modulation guided by functional magnetic resonance imaging-inspired electroencephalography improves implicit emotion regulation. *Biol Psychiatry*, 80(6), 490–496.
- Krause, F., Linden, D. E. J., & Hermans, E. J. (2024). Getting stress-related disorders under control: The untapped potential of neurofeedback. *Trends in Neurosciences*, 47(10), 766–776.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest package: Tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82(13), 1–26.
- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings. *NIMH Center for the Study of Emotion and Attention*, 1(39–58), 3.
- Li, S., Cao, X., Li, Y., Tang, Y., Cheng, S., & Zhang, D. (2024). Enhancing ventrolateral prefrontal cortex activation mitigates social pain and modifies subsequent social attitudes: Insights from TMS and fMRI. *Neuroimage*, 292, 120620.
- Li, S., Chen, J., Gao, K., Xu, F., & Zhang, D. (2023). Excitatory brain stimulation over the left dorsolateral prefrontal cortex enhances voluntary distraction in depressed patients. *Psychological Medicine*, 53(14), 6646–6655.
- Li, S., Xie, H., Zheng, Z., Chen, W., Xu, F., Hu, X., & Zhang, D. (2022). The causal role of the bilateral ventrolateral prefrontal cortices on emotion regulation of social feedback. *Human Brain Mapping*, 43(9), 2898–2910.
- Li, Y., Li, S., Li, H., Tang, Y., & Zhang, D. (2025a). fNIRS neurofeedback facilitates emotion regulation: Exploring individual differences over the ventrolateral prefrontal cortex. *Neuroimage*, 308, 121079.
- Li, Y., Li, S., Tang, Y., Hao, S., & Zhang, D. (2025b). Causal

- evidence for the role of prefrontal theta oscillations in emotion regulation using neurofeedback training. *Neuroimage*, 320, 121457.
- Lubianiker, N., Paret, C., Dayan, P., & Hendler, T. (2022). Neurofeedback through the lens of reinforcement learning. *Trends in Neurosciences*, 45(8), 579–593.
- McRae, K., & Gross, J. J. (2020). Emotion regulation. *Emotion*, 20(1), 1–9.
- Mo, L., Guo T., Zhang, Y., Xu, F., & Zhang, D. (2021). The role of ventrolateral prefrontal cortex on emotional regulation of social pain in depressed patients: A TMS study. *Acta Psychologica Sinica*, 53(5), 494–504.
- [莫李澄, 郭田友, 张岳瑶, 徐锋, 张丹丹. (2021). 激活右腹外侧前额叶提高抑郁患者对社会疼痛的情绪调节能力: 一项 TMS 研究. *心理学报*, 53(5), 494–504.]
- Mo, L., Li, S., Cheng, S., Li, Y., Xu, F., & Zhang, D. (2023). Emotion regulation of social pain: Double dissociation of lateral prefrontal cortices supporting reappraisal and distraction. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 18(1), 43.
- Morawetz, C., Hemetsberger, F. J., Laird, A. R., & Kohn, N. (2025). Emotion regulation: From neural circuits to a transdiagnostic perspective. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 168, 105960.
- Moser, J. S., Hartwig, R., Moran, T. P., Jendrusina, A. A., & Kross, E. (2014). Neural markers of positive reappraisal and their associations with trait reappraisal and worry. *Journal of Abnormal Psychology*, 123(1), 91–105.
- Ochsner, K. N., Silvers, J. A., & Buhle, J. T. (2012). Functional imaging studies of emotion regulation: A synthetic review and evolving model of the cognitive control of emotion. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1251, E1–E24.
- Olofsson, J. K., Nordin, S., Sequeira, H., & Polich, J. (2008). Affective picture processing: An integrative review of ERP findings. *Biological Psychology*, 77(3), 247–265.
- Paret, C., Kluetsch, R., Zaehring, J., Ruf, M., Demirakca, T., Bohus, ... Schmah, C. (2016). Alterations of amygdala-prefrontal connectivity with real-time fMRI neurofeedback in BPD patients. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11(6), 952–960.
- Pei, G., Yang, R., Shi, Z., Guo, G., Wang, S., Liu, M., ... Yan, T. (2020). Enhancing working memory based on mismatch negativity neurofeedback in subjective cognitive decline patients: A preliminary study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 12, 263.
- Preece, D. A., Mehta, A., Petrova, K., Sikka, P., Bjureberg, J., Becerra, R., & Gross, J. J. (2023). Alexithymia and emotion regulation. *Journal of Affective Disorders*, 324, 232–238.
- Ramot, M., Kimmich, S., Gonzalez-Castillo, J., Roopchansingh, V., Popal, H., White, E., ... Martin, A. (2017). Direct modulation of aberrant brain network connectivity through real-time neurofeedback. *eLife*, 6, e28974.
- Rieger, K., Rarra, M. H., Diaz Hernandez, L., Hubl, D., & Koenig, T. (2018). Neurofeedback-based enhancement of single-trial auditory evoked potentials: Treatment of auditory verbal hallucinations in schizophrenia. *Clinical EEG and Neuroscience*, 49(6), 367–378.
- Sepulveda, P., Sitaram, R., Rana, M., Montalba, C., Tejos, C., & Ruiz, S. (2016). How feedback, motor imagery, and reward influence brain self-regulation using real-time fMRI. *Human Brain Mapping*, 37(9), 3153–3171.
- Shafir, R., Schwartz, N., Blechert, J., & Sheppes, G. (2015). Emotional intensity influences pre-implementation and implementation of distraction and reappraisal. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 10(10), 1329–1337.
- Sheppes, G., Scheibe, S., Suri, G., Radu, P., Blechert, J., & Gross, J. J. (2014). Emotion regulation choice: A conceptual framework and supporting evidence. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(1), 163–181.
- Sitaram, R., Sanchez-Corzo, A., Vargas, G., Cortese, A., El-Deredy, W., Jackson, A., & Fetz, E. (2024). Mechanisms of brain self-regulation: Psychological factors, mechanistic models and neural substrates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 379(1915), 20230093.
- Spielberger, C. D., Gonzalez-Reigosa, F., Martinez-Urrutia, A., Natalicio, L. F., & Natalicio, D. S. (1971). The state-trait anxiety inventory. *Revista Interamericana de Psicologia/ Interamerican Journal of Psychology*, 5, 3–4.
- Springstein, T., & English, T. (2024). Distinguishing emotion regulation success in daily life from maladaptive regulation and dysregulation. *Personality and Social Psychology Review*, 28(2), 209–224.
- Stultz, D. J., Osburn, S., Burns, T., Pawlowska-Wajswol, S., & Walton, R. (2020). Transcranial magnetic stimulation (TMS) safety with respect to seizures: A literature review. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 16, 2989–3000.
- Tang, Y., Mo, L., Peng, Z., Li, Y., & Zhang, D. (2025). Causal enhancement of cognitive reappraisal through synchronized dorsolateral and ventrolateral prefrontal cortex activity. *Emotion*, 25(6), 1418–1428.
- Velotti, P., Bruno, S., Rogier, G., Beomonte Zobel, S., Vacchino, M., Garofalo, C., & Kossou, D. S. (2024). Psychopathy and impairments in emotion regulation: A systematic review and Meta-analysis. *Clinical Psychology Review*, 113, 102482.
- Wu, Y. J., Hou, X., Peng, C., Yu, W., Oppenheim, G. M., Thierry, G., & Zhang, D. (2022). Rapid learning of a phonemic discrimination in the first hours of life. *Nature Human Behaviour*, 6(8), 1169–1179.
- Young, K. D., Siegle, G. J., Zotev, V., Phillips, R., Misaki, M., Yuan, H., Drevets, W. C., & Bodurka, J. (2017). Randomized clinical trial of real-time fMRI amygdala neurofeedback for major depressive disorder: Effects on symptoms and autobiographical memory recall. *The American Journal of Psychiatry*, 174(8), 748–755.
- Yu, L., Long, Q., Tang, Y., Yin, S., Chen, Z., Zhu, C., & Chen, A. (2021). Improving emotion regulation through real-time neurofeedback training on the right dorsolateral prefrontal cortex: Evidence from behavioral and brain network analyses. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 620342.
- Yuan, J., Long, Q., Ding, N., Lou, Y., Liu, Y., & Yang, J. (2015). Suppression dampens unpleasant emotion faster than reappraisal: Neural dynamics in a Chinese sample. *Science China. Life sciences*, 58(5), 480–491.
- Yuan, J., Zhang, Y., Zhao, Y., Gao, K., Tan, S., & Zhang, D. (2023). The emotion-regulation benefits of implicit reappraisal in clinical depression: Behavioral and electrophysiological evidence. *Neuroscience Bulletin*, 39(6), 973–983.
- Zhang, D., Liu, Z., Chen, Y., & Mai, X. (2019). The role of right ventrolateral prefrontal cortex on social emotional regulation in subclinical depression: An tDCS study. *Acta Psychologica Sinica*, 51(2), 207–215.
- [张丹丹, 刘珍莉, 陈钰, 买晓琴. (2019). 右腹外侧前额叶对高抑郁水平成年人社会情绪调节的作用: 一项 tDCS 研究. *心理学报*, 51(2), 207–215.]
- Zhang, J. X., Bo, K., Wager, T. D., & Gross, J. J. (2025). The brain bases of emotion generation and emotion regulation. *Trends in Cognitive Sciences*, 29(10), 879–891.

Zhang, Y., Li, S., Gao, K., Li, Y., Yuan, J., & Zhang, D. (2023). Implicit, but not explicit, emotion regulation relieves unpleasant neural responses evoked by high-intensity negative images. *Neuroscience Bulletin*, 39(8), 1278–1288.

Zhao, J., Mo, L., Bi, R., He, Z., Chen, Y., Xu, F., Xie, H., &

Zhang, D. (2021). The VLPFC versus the DLPFC in downregulating social pain using reappraisal and distraction strategies. *The Journal of Neuroscience*, 41(6), 1331–1339.

Zhou, W., Nan, W., Xiong, K., & Ku, Y. (2024). Alpha neurofeedback training improves visual working memory in healthy individuals. *NPJ Science of Learning*, 9(1), 32.

The facilitating effect of frontal P3 amplitude regulation on emotion regulation

LI Yiwei¹, TANG Yuyao¹, WANG Tingdong¹, ZHANG Dandan^{1,2,3}

(¹ Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

(² School of Psychology, Chengdu Medical College, Chengdu 610500, China)

(³ China Center for Behavioral Economics and Finance & School of Economics, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 611130, China)

Abstract

The frontal P3 component is a reliable electrophysiological marker of the engagement of prefrontal cognitive control resources. In previous studies, frontal P3 amplitude has typically been regarded as a neural correlate of early-stage resource recruitment during executive control tasks, including emotion regulation. However, this correlational interpretation leaves an important question unresolved: whether actively changing frontal P3 amplitude can causally influence the executive control processes that support emotion regulation. To address this question, the present study used neurofeedback (NF) training to modulate frontal P3 amplitude and examined its potential causal role in emotion regulation.

Sixty-seven participants were randomly assigned to either an experimental group, which was trained to upregulate frontal P3 amplitude ($n = 34$), or a control group, which was trained to downregulate frontal P3 amplitude ($n = 33$). All participants completed an emotion regulation task before and after NF training. During the task, participants were instructed to use cognitive reappraisal to reinterpret negative emotional stimuli and reduce their emotional impact. Emotion regulation effectiveness was assessed using both subjective ratings of negative emotion and the parietal late positive potential (LPP), an electrophysiological index of emotional experience intensity.

Compared with the pre-training baseline, participants in the experimental group successfully increased frontal P3 amplitude through NF training. This training effect indicated that they were able to more effectively recruit the executive control function indexed by frontal P3. Critically, after NF training, the experimental group showed improved emotion regulation effectiveness, as reflected by significant reductions in both self-reported negative emotion and parietal LPP amplitude during emotion regulation. In contrast, the control group showed the opposite pattern. After training, frontal P3 amplitude during emotion regulation decreased, and emotion regulation effectiveness was reduced, suggesting that weakening the neural activity indexed by frontal P3 impaired the regulatory process.

Further analyses indicated that the beneficial effect of P3-NF training on emotion regulation was primarily achieved by increasing frontal P3 amplitude during cognitive reappraisal itself. This finding suggests that frontal P3 is not merely a passive neural marker of prefrontal resource engagement, but may reflect an executive control process that directly contributes to successful emotion regulation. Unlike previous correlational neuroimaging studies, we utilized ERP-NF neuromodulation technology to causally demonstrate that the prefrontal cognitive control resources indexed by frontal P3 constitute the causal neural foundation for the early stages of emotion regulation. These findings provide novel insights into the neurophysiological mechanisms underlying emotion regulation and offer a new approach for precise, non-invasive brain modulation to treat prefrontal executive control deficits in clinical populations.

Keywords emotion regulation, neurofeedback, cognitive reappraisal, frontal P3, late positive potential