

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：去抑制的认知神经机制：一项事件相关电位研究

作者：陈霁雯，买晓琴，李富洪

第一轮

审稿人 1 意见：

本研究作者探讨了去抑制的认知神经机制，采用了改编的停止信号任务以及事件相关电位的技术，重点关注了 P1, N1, N2/P3 等脑电成分。研究的特色之一是采用了 ERP 残差迭代分解技术更好地分离刺激和反应诱发的不同的脑电活动。研究的结果发现去抑制过程表现在后部电极较大的 P1 和较小的 N1 波幅，以及较小的 N2/P3 波幅以及较长的 P3/R-cluster 潜伏期，作者认为这些脑电成分的结果分别表明注意门控机制在去抑制早期过程中的作用以及后续的自上而下的认知控制加工以及运动反应控制过程。该研究实验设计思路新颖，研究方法合适，研究结果清楚，较好地探测了研究的假设。然而在论文的写作过程中也存在一些问题需要澄清或修改。具体问题如下：

意见 1: 本研究采用了所谓的“ERP 残差迭代分解技术”，作者需要在前言中对该技术进行更详细的解释，首先要说明为何这种技术的使用有助于本研究中的 ERP 数据分析；其次，“S-簇”、“R-簇”以及“C-簇”仅仅是数据驱动的划分，还是有不同的心理意义，在认知控制有关的领域是否有前人研究探讨过等。

回应: 根据您的意见，我们在修改稿中增加了“1.4 ERP 残差迭代分解技术”，对该技术进行更详细的解释。（第 22 页，第 3 段蓝色部分，下同）

1.4 ERP 残差迭代分解技术

ERP 残差迭代分解技术(Residue iteration decomposition, RIDE)的核心优势在于可以减少个体内差异和噪声影响，更清晰地揭示不同认知过程的脑电成分(Ouyang et al., 2011; Ouyang et al., 2015a; Ouyang et al., 2015b)。传统的 ERP 分析通过平均波幅法获取不同的 ERP 成分，该方法假设所有试次的潜伏期起点与刺激呈现的起点是同步的，并认为单试次数据与平均值之间的残差仅仅是噪声。实际上，单试次之间的潜伏期和波幅存在差异，直接平均这些数据会导致成分的重叠和模糊(Ouyang et al., 2011)。RIDE 使用了一种迭代程序处理平均 ERP 的残差，通过 L1 范数最小化(L1-norm minimization)来分解 ERP 成分，分解过程针对每一个电

极单独进行，能减少由于数据噪声引起的残差误差，降低个体内变异性。

RIDE 分解出的 S-簇是基于刺激开始，反映由感知和注意机制引发的脑电活动；R-簇基于反应时间，与动作反应过程相关，常在运动皮层覆盖的电极(如 C3 和 C4)上进行量化；C-簇被假设为刺激和反应的一个中间过程，其潜伏期在单次试验中是可变的，不与刺激开始或反应时间锁定(Ouyang et al., 2011; Ouyang et al., 2015a)。为了提取 C-簇的时间标记，可以使用刺激开始和反应时的时间标记，自优化迭代方案用于潜伏期的估算。计算 RIDE 成分(S-簇、R-簇、C-簇)还需使用时间窗口函数，旨在覆盖每个成分中最大活动范围的时间段。

适用该技术的实验设计需涉及连续的刺激呈现和动作反应，能够明确引发不同的认知过程，从而在 ERP 信号中产生可区分的成分。例如，任务切换、停止信号任务或双任务范式等设计，可以引发感知、注意、响应选择等不同的认知过程。关于 RIDE 技术的更多细节可以参考 Ouyang 等(2011)的研究。近年来，认知控制领域的多项研究均采用 RIDE 技术对脑电信号进行分析(Giller & Beste, 2019; Giller et al., 2020; Giller et al., 2019; Zhang, Stock, Fischer, et al., 2016)。本研究使用 RIDE 技术能够更准确地分析去抑制过程中涉及的特定认知机制。

意见 2：有 13 名被试的数据被剔除，这个 40 个试次的标准有何依据？

回应：本文主要采用的 RIDE 技术来源于 Ouyang 等(2011)的文章《Residue iteration decomposition (RIDE): A new method to separate ERP components on the basis of latency variability in single trials》。文中提到，为了获得可靠的 ERP 信号，通常建议使用 30 至 60 次试次来平均同一实验条件下的 EEG 数据，这种做法有助于减少信噪比问题，并更好地解析事件相关电位的成分，因此 40 次的标准是合理且较为保守的选择。事实上，13 名被试中还包含 9 名因设备问题残缺的脑电数据。我们在正文中补充了这一细节。(第 24 页，第 1 段)

意见 3：离线的滤波参数是 1-40Hz，这种带宽是否在该领域常见？

回应：1-40Hz 的滤波参数是认知控制领域研究中的常见设置，主要目的是为了去除低频漂移和高频噪声，同时保留感兴趣的 ERP 成分。1Hz 以下的低频信号通常受到电极阻抗变化和皮肤电阻变化的影响，而 40Hz 以上的高频成分容易受到肌电伪迹和电磁干扰的影响。因此，1-40Hz 的带宽滤波有助于提高数据的信噪比，确保分析的准确性和可靠性。认知控制领域常关注的 P1、N1 等早期感知和注意成分通常在 1-30Hz 范围内，P3 等晚期成分也在此

范围内(Luck, 2014)。因此，过往认知控制领域研究常选用 1-40Hz 或者近似该范围的参数设置(李雄 等, 2020; 张弘弛 等, 2023; Mayr et al., 2003)，这样可以涵盖大多数感兴趣的 ERP 成分，又能有效去除不需要的噪声信号。

李雄, 李祚山, 向滨洋 & 孟景. (2020). 注意线索对自闭特质个体疼痛共情的影响: 来自事件相关电位的证据. *心理学报*, 52(03), 294-306.

张弘弛, 成旋 & 毛伟宾. (2023). 奖赏预测误差对时间顺序记忆和来源记忆的影响. *心理学报*, 55(07), 1049-1062.

Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique* (2nd ed.). MIT Press.

Mayr, S., Niedeggen, M., Buchner, A., & Pietrowsky, R. (2003). ERP correlates of auditory negative priming. *Cognition*, 90(2), 11-21.

意见 4: ERP 每个脑电成分的时间窗口的选择看起来有点奇怪，没有选择峰值附近的时间窗来计算幅值，为何？

回应: 对于时间窗的选择，我们基于数据的峰值所在时间窗并参考了 Giller & Beste (2019) 和 Giller et al. (2019)的研究中使用的时间窗口。这些研究采用了 BI 范式，对被试的内隐去抑制过程进行了探究，并使用 ERP 残差迭代分解(RIDE)技术对脑电信号进行分析。此外，由于我们的研究主要考察去抑制过程，即 N-1 抑制条件下重复与切换在脑电信号中的差异，因此，我们也根据这两种条件下差异波的波幅变化对时间窗进行了调整，最终确定了不同成分的时间窗，以确保能够捕捉到 N-1 抑制条件下重复与切换在脑电信号中的差异。我们在正文中补充了这一细节。（第 26 页，第 2 段）

意见 5: 文中呈现的脑电波形结果图是经过了残差迭代分解技术处理后的结果，原始的 ERP 波形图也需要呈现出来做对比。

回应: 根据您的建议，我们在文中加上了原始波形图。

意见 6: 图 5 中在计算脑电结果与行为数据的相关时，需要交代横纵坐标上的数据时如何计算的

回应: 根据您的建议，我们修改了图 5 的图例，增加了横纵坐标轴的数据计算信息，如下：

图 5. 行为与脑电指标数据分布特征及相关结果图(去抑制代价: 抑制后重复 RT-抑制后切换 RT; 去抑制速度: 去抑制代价持续的试次数; P3 潜伏期去抑制代价: 抑制后重复 P3 潜伏期-抑制后切换 P3 潜伏期; R-簇潜伏期去抑制代价: 抑制后重复 R-簇潜伏期-抑制后切换 R-簇潜伏期)

意见 7：表 1 不是三线表的形式。

回应：已在文中修改，如下图：

表 1 不同条件下的反应时(ms)和正确率(%)

	反应时($M \pm SD$)	正确率($M \pm SD$)
N-1 无抑制切换	611 \pm 73	98.9 \pm 1.3
N-1 无抑制重复	616 \pm 76	98.8 \pm 1.5
N-1 抑制后切换	559 \pm 68	98.5 \pm 1.9
N-1 抑制后重复	574 \pm 69	98.8 \pm 1.6

意见 8：作者提到：“以往研究主要关注内隐的认知抑制相关的去抑制过程，极少考察与外显的反应抑制相关的去抑制过程。”本研究的结果发现中哪些可能是外显的去抑制过程特有的？

回应：非常感谢您的意见，在此我们需要澄清一点，我们研究的目的并不是希望考察反应抑制特有的去抑制过程。去抑制过程是一个依赖于强烈的抑制后效所产生的认知过程(Chen et al., 2023)。过往研究涉及的内隐抑制不能产生如反应抑制那般强烈的抑制后效，因此我们认为当采用涉及反应抑制的范式时，可以更清晰地揭示去抑制过程的认知神经机制。Giller & Beste(2019)采用涉及内隐抑制的 BI 范式发现，去抑制主要会在 P1 和 P3 上体现，而 Giller 等人同年采用同样研究范式的另一项研究却发现去抑制过程会在 P1、N1、N2 还有 R-簇上体现，而在 P3 上无结果。此外，该团队使用相同范式的几项研究都有类似，但却不完全一样的 ERP 结果(Wolff et al., 2018; Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2017)。

与采用 BI 范式的去抑制的神经加工结果相比，本研究采用改编范式得到的去抑制神经加工结果更加清晰稳定。首先，我们发现去抑制过程与早期注意机制相关的 P1/N1 成分有关联，支持了 Giller 团队的主要结论。此外，去抑制过程中 N2/P3 波幅的减小和 P3b 潜伏期的增加，也验证了前人结果，这些结果揭示了去抑制过程在注意调节、冲突监控和认知背景更新方面的独特特征。本研究还发现去抑制与 R-簇潜伏期有关，且 R-簇和 P3b 潜伏期均与行为结果有很强的相关性，反映了去抑制的个体差异，该结果表明强烈的抑制后效可能使去抑制过程在神经信号上的变化变得更加敏锐。

.....

审稿人 2 意见：

本文采用停止信号任务的变式探究去抑制的认知神经机制。结果发现在去抑制加工中的早期反映了注意门控机制在去抑制的作用，支持去抑制代价理论，而在晚期反映了自上而下的认知控制加工以及运动反应控制过程，支持情景记忆检索论。本文揭示了去抑制加工不同阶段的神经机制，但是还存在以下问题：

意见 1：在“1.1 去抑制的研究范式”的第二段中，“Verbruggen 和 Logan(2008b)呈现两种形状刺激(圆形和方形)，要求被试对不同形状做出不同的按键反应。结果发现当 N-1 是停止信号试次时，N 试次反应显著变慢，即产生停止后效。”但是为什么本文的研究结果是当 N-1 是停止信号试次时，N 试次的反应变快呢？文中也没有对该问题进行讨论。

回应：非常感谢您提出的宝贵意见。在修改稿中我们增加对此问题的讨论如下（第 32 页，第 2 段）：

本研究的一个意外发现是 N-1 有抑制条件的 N1 波幅显著大于 N-1 无抑制条件，且在行为上表现为当 N-1 是停止信号试次时，N 试次的反应变快，这可能反映了 N-1 试次的认知(反应)冲突对当前试次注意控制的调节。关于冲突适应的研究表明，N-1 试次的冲突可以触发冲突调控机制，致使 N 试次的认知控制水平提高(Botvinick et al., 1999; Botvinick et al., 2001; Gratton et al., 1992; Notebaert & Verguts, 2006; Verbruggen et al., 2006)。在本研究中，先前试次的停止信号会诱发反应冲突(Kok et al., 2004; Ramautar et al., 2006)，进而诱发冲突适应，提高认知控制，因此在进行当前任务时会更加容易对刺激进行识别，从而使得 N-1 有抑制条件比 N-1 无抑制条件反应更快，且伴随着更大的 N1(Beyer et al., 2012)。需要注意的是，与 Verbruggen 和 Logan(2008b)采用的经典停止信号范式相比，本研究改编范式的停止信号出现的时间是固定的，且在本研究中没有两个连续的停止信号试次。尽管实验中未告知被试该实验设定，但他们可能自发地察觉到这一规律，并因此采用了某种认知策略或形成了预期。当被试意识到如果 N-1 是抑制试次，那么接下来的试次必然是“go”试次，他们在看到 N 试次的刺激时会迅速做出反应。相反，如果 N-1 是无抑制试次，被试可能会预期 N 试次可能出现停止信号(约 30%的概率)，因此会在做出反应前短暂等待(约 200 毫秒)，以确认是否出现停止信号。这一策略可能导致被试在 N-1 停止后主动提高了注意，从而提高了反应速度且伴随着 N1 波幅的增大(Eason et al., 1969; Eimer & Schröger, 1998; Lijffijt et al., 2009; Vogel & Luck, 2000)。

意见 2：在“2.4 行为数据分析”第二段中，“如果在 N 试次中不存在去抑制代价”，这个定义是指什么呢？是当 N-1 试次是一个停止信号试次时，当前的刺激重复试次的反应时与切换试次两者 RT 之差为 0 吗？

回应：“N 试次中不存在去抑制代价”指的是：当 N-1 试次是一个停止信号试次时，不会出现刺激重复试次的反应时大于刺激切换的反应时这种情况，即当前的刺激重复试次的反应时减去切换试次的反应时小于或等于 0，该指标的设定来源于 Chen et al. (2023)的研究。我们在文中增加了这一细节。（第 25 页，第 2 段）

Chen, J., Cao, B., & Li, F. (2023). Do after "not to do": Deinhibition in cognitive control. *Memory & Cognition*, 51(6), 1388-1403.

意见 3：文中还对不同 ERP 成分的潜伏期进行了分析，计算的是峰值潜伏期？还是起始潜伏期？请在文中详细说明。

回应：本研究对不同 ERP 成分的潜伏期进行分析时，计算的是峰值潜伏期，我们在方法部分增加了细节描述（第 26 页，第 2 段）：

... 本研究对每一成分的波幅以及峰值潜伏期进行 2(N-1 抑制: 无 vs.有) × 2(切换类型: 切换 vs.重复)重复测量方差分析。

意见 4：在结果部分的 t 检验应补充自由度和效应量。

回应：根据您的意见，我们在结果部分补充了简单效应分析的自由度和效应量。

意见 5：“2.2 材料和设计”部分中“实验总试次数为 414，其中停止信号试次占三分之一，其余每种条件各 66 个试次。”试次数计算是否存在误差？

回应：我们对这句话进行了修改（第 24 页，第 3 段）：

... 实验总试次数为 414，其中停止信号试次数为 150，约占三分之一，其余每种条件各 66 个试次。

意见 6：在“2.5 EEG 记录即分析部分”方法部分，不同 ERP 成分的时间窗是否有参考依据？

回应：对于时间窗的选择，我们主要参考了 Giller & Beste (2019)和 Giller et al. (2019)的研究。这些研究采用了 BI 范式，对被试的内隐去抑制过程进行了探究，并使用 ERP 残差迭代分解 (RIDE)技术对脑电信号进行分析。此外，由于我们的研究主要考察去抑制过程，即 N-1 抑制条件下重复与切换在脑电信号中的差异，我们也根据这两种条件下差异波的波幅变化对时

间窗进行了调整，最终确定了不同成分的时间窗，以确保能够捕捉到 N-1 抑制条件下重复与切换在脑电信号中的差异。我们在文章的方法部分增加了这一细节。（第 26 页，第 2 段）

意见 7：图 5 中需要统一轴标签的位置和字体大小。

回应：根据您的建议我们统一了图 5 的字体大小。

.....

审稿人 3 意见：

作者利用 ERP 技术研究了受试者在经过修改的停止信号任务中的认知神经机制，结果显示，在去抑制过程中，后部电极记录到的 P1 波幅增大，而 N1 波幅减小，这反映了在去抑制的早期阶段注意门控机制的作用。此外，去抑制过程还表现为较小的 N2/P3 波幅和较长的 P3/R-cluster 潜伏期，这反映了自上而下的认知控制加工和运动反应控制过程。尽管该研究具有一定创新性，但在写作和样本量方面存在较大局限性。

意见 1：摘要部分：-在介绍采用的 ERP 残差迭代分解技术时，可以简要说明该技术的原理和适用范围，以帮助读者更好地理解研究方法。-缺乏被试信息描述。-在描述研究结果之前，作者应介绍去抑制在停止信号任务中的具体表现。在关键词中，作者提到了“去抑制代价”，这个概念在摘要中并没有提及，请加以解释。

回应：根据您的建议，我们在摘要中增加了去抑制代价、RIDE 技术、被试信息以及去抑制在任务中的具体表现的描述，修改后的摘要如下：

个体在不同任务间进行灵活切换时，不仅需要抑制任务无关信息，也需要在适当的时候解除先前的抑制，即去抑制，该过程产生的代价称为去抑制代价。尽管研究者采用多种范式研究了去抑制的认知过程，但其神经机制并不清楚。本研究采用 ERP 残差迭代分解技术考察了 41 名大学生被试在改编的停止信号任务中去抑制的认知神经机制，该技术可以减少个体内差异和噪声影响，更清晰地揭示不同认知过程的脑电成分。在任务中，当 N-1 试次出现停止信号时，N 试次在刺激重复条件下的反应时长于刺激切换条件，反映了去抑制代价。脑电结果发现，去抑制效应最早出现于 P1 和 N1 成分，反映了注意门控机制在去抑制中的作用；去抑制过程也诱发了较小的 N2/P3 波幅以及较长的 P3/R-cluster 潜伏期，反映了自上而下的认知控制以及运动反应过程。

意见 2：引言中提到的去抑制代价的理论解释，可以进一步阐述不同理论观点之间的区别和争议，以及这些理论对研究结果的影响。这样可以使读者对研究背后的理论框架有更深入的理解。

回应：根据您的建议，我们在“1.2 去抑制代价的理论解释”加入了一段文字进一步阐述不同理论观点之间的区别和争议（第 20 页，第 5 段）：

抑制论和情景记忆检索论之间的主要区别在于抑制论关注的是抑制过程本身的持续影响，强调了任务设置的惯性效应，即任务切换后，先前的任务设置仍然存在，并对新任务产生干扰。情景记忆检索论则关注任务线索与记忆表征之间的匹配和冲突，认为 BI 范式中大部分的去抑制代价可以通过非抑制过程来解释(Grange et al., 2017)。两种理论框架的差异可能导致对实验结果的不同解释，通过进一步探讨去抑制过程的神经机制，我们可以更深入地理解去抑制代价的理论框架。

此外，关于这些理论对研究结果的影响，我们在“1.5 本研究目的与假设”的第二段进行了阐述（第 23 页，第 3 段）：

第二，去抑制代价的理论解释存在争议。根据抑制论，去抑制代价的产生是抑制残留的结果；但根据情景记忆检索论，去抑制代价源于刺激反应与记忆中的信息不匹配，因此需要进行自上而下的主动性控制加工去除先前抑制并重构新的刺激-反应联结。考察去抑制的脑电成分可以检验上述理论。与注意抑制门控机制关联的 P1 波幅的变化可以很好地说明是否有抑制残留，如果 P1 波幅在去抑制条件下增大，则体现了先前试次中抑制的残留对当前试次的影响。相反，如果没有 P1 波幅的增大，而是 P3b 波幅的减小，则表明去抑制是主动性的自上而下的认知控制过程，因为 P3b 与主动的认知背景更新相关(Polich, 2007; Upton et al., 2010)。我们假设，如果去抑制过程伴随 P1 波幅的增大，则支持抑制论；如果去抑制过程伴随 P3b 波幅的减小，则支持记忆检索论。

意见 3：对去抑制的 ERP 成分介绍需要进一步细化，比如 N2 和 P3 的潜伏期和定位在哪？这些脑电成分是由什么刺激诱发？

回应：根据您的建议，我们增加了前言中介绍去抑制的 ERP 成分的位置和刺激细节部分，修改后的内容如下（第 21 页，第 2、3 段）：

... Giller 和 Beste(2019)采用的 BI 范式包含三种线索任务：正方形、菱形和三角形...

... Zhang 等(2016)采用与 Giller 和 Beste(2019)一样的实验范式，发现 BI 条件比基线条件在

中部电极诱发了更小的 N2 波幅。后续 Giller 等(2020)的研究采用了相同范式，在前额叶区域发现了相同结果。研究者认为 BI 条件下，额中区域较小的 N2 波幅可能反映了特异性的抑制释放过程(Giller et al., 2020; Giller et al., 2019; Zhang, Stock, Fischer, et al., 2016)。Upton 等(2010)发现前额区域 N2 波幅在停止信号试次后增大...

... 采用线索-目标分离的 BI 范式发现已抑制的词汇线索会在中部和顶部诱发更大的 P3 波幅 (Sinai et al., 2007)。此外，无论负启动范式采用听觉线索还是视觉线索，去抑制过程均伴随着顶叶 P3 波幅的增大(Kathmann et al., 2006; Mayr et al., 2003)。关于外显的反应抑制的研究发现，去抑制与顶叶 P3 波幅降低相关...

意见 4: 为什么去抑制会诱发 P1、N1、N2、P3 等脑电成分？是否说明去抑制是一个动态变化的过程？

回应: 去抑制过程会诱发 P1、N1、N2、P3 等脑电成分，这表明去抑制过程需要不同的认知活动参与，而不是说明去抑制是一个动态变化的过程。具体而言：在去抑制过程中，首先调动了早期的注意机制，对 N-1 试次中残留的抑制进行调节，即对已抑制的刺激重新进行反应时，会自动激活注意门控机制，以便让无需继续抑制的刺激重新获得更多注意，主要反映在 P1 和 N1 成分上。接着，由于刺激重复冲突监控需求降低，因此表现出较小的 N2 成分。最后，对已抑制刺激的刺激-反应映射需要重新建立，重新评估刺激和更新情景记忆会更加困难，所以诱发较小的 P3b 波幅和更长的峰值潜伏期，并导致反应伴随的 R-簇也有更长的潜伏期。

意见 5: 作者对脑成像和脑电的去抑制相关研究进行了详细的文献罗列，但还缺乏一个清晰而简要的总结。

回应: 根据您的建议，我们在前言的“1.3 去抑制的脑机制”加了一个简要的总结段（第 22 页，第 2 段）：

综上，去抑制过程涉及额叶和顶叶的脑区活动，并与早期注意控制、情境更新和反应选择的脑电成分相关，这些发现初步揭示了去抑制过程的神经机制。

意见 6: 作者指出“以往研究更多关注内隐的认知抑制相关的去抑制过程，极少考察与外显的反应抑制相关的去抑制过程。”但是作者并没有告诉我们为什么要考察与外显的反应抑制相关的去抑制过程？研究的少不代表这个研究就有意义。回答这个问题可以使读者对研究的

重要性和意义有更清晰的认识。

回应：去抑制过程依赖于抑制后效，若没有强烈的抑制后效则很难产生去抑制过程。因此，我们在 1.5 节的第一段有下列表述：过往研究发现，外显的反应抑制会比内隐的认知抑制多诱发一个 LPP 成分，LPP 可能反映了反应抑制比认知抑制需要更多认知资源用于抑制反应冲动的过程(Dejong et al., 1995; Kan et al., 2021; Mostofsky & Simmonds, 2008)。由于去抑制的形成依赖于较强的抑制后效，而反应抑制可能比认知抑制产生更强的抑制后效，因此，对反应抑制的探究可以更清晰地揭示去抑制的认知神经机制。

根据您的建议，我们在 1.5 节加入了以下内容，更清晰地阐述了研究的现实意义（第 23 页，第 1 段）：

... 此外，与内隐认知抑制过程不同，外显抑制涉及的是个体对显性任务的直接反应控制，这对于理解日常行为背后的认知神经机制也具有重要意义。例如，个体驾驶中常常需要在停止某个行为后又进行该行为，这种解除抑制的能力直接关系到安全和效率。因此，探究外显反应抑制的去抑制过程能为理解和改善人类行为控制提供重要的理论和实践应用价值。

意见 7：在介绍专业术语和缩写词时，确保提供清晰的解释或定义，以帮助非专业读者理解。比如在介绍采用的 ERP 残差迭代分解技术时，可以简要说明该技术的原理和适用范围，以帮助读者更好地理解研究方法。

回应：按照您的建议，我们在前言部分增加一节了对于 ERP 残差迭代分解技术的介绍（第 22 页，第 3 段）：

1.4 ERP 残差迭代分解技术

ERP 残差迭代分解技术(Residue iteration decomposition, RIDE)的核心优势在于可以减少个体内差异和噪声影响，更清晰地揭示不同认知过程的脑电成分(Ouyang et al., 2011; Ouyang et al., 2015a; Ouyang et al., 2015b)。传统的 ERP 分析通过平均波幅法获取不同的 ERP 成分，该方法假设所有试次的潜伏期起点与刺激呈现的起点是同步的，并认为单试次数据与平均值之间的残差仅仅是噪声。实际上，单试次之间的潜伏期和波幅存在差异，直接平均这些数据会导致成分的重叠和模糊(Ouyang et al., 2011)。RIDE 使用了一种迭代程序处理平均 ERP 的残差，通过 L1 范数最小化(L1-norm minimization)来分解 ERP 成分，分解过程针对每一个电极单独进行，能减少由于数据噪声引起的残差误差，降低个体内变异性。

RIDE 分解出的 S-簇是基于刺激开始，反映由感知和注意机制引发的脑电活动；R-簇基

于反应时间，与动作反应过程相关，常在运动皮层覆盖的电极(如 C3 和 C4)上进行量化；C-簇被假设为刺激和反应的一个中间过程，其潜伏期在单次试验中是可变的，不与刺激开始或反应时间锁定(Ouyang et al., 2011; Ouyang et al., 2015a)。为了提取 C-簇的时间标记，可以使用刺激开始和反应时的时间标记，自优化迭代方案用于潜伏期的估算。计算 RIDE 成分(S-簇、R-簇、C-簇)还需使用时间窗口函数，旨在覆盖每个成分中最大活动范围的时间段。

适用该技术的实验设计需涉及连续的刺激呈现和动作反应，能够明确引发不同的认知过程，从而在 ERP 信号中产生可区分的成分。例如，任务切换、停止信号任务或双任务范式等设计，可以引发感知、注意、响应选择等不同的认知过程。关于 RIDE 技术的更多细节可以参考 Ouyang 等(2011)的研究。近年来，认知控制领域的多项研究均采用 RIDE 技术对脑电信号进行分析(Giller & Beste, 2019; Giller et al., 2020; Giller et al., 2019; Zhang, Stock, Fischer, et al., 2016)。本研究使用 RIDE 技术能够更准确地分析去抑制过程中涉及的特定认知机制。

意见 8: 对 LPP 成分缺乏假设。

回应: 本研究中并不涉及对 LPP 成分的探究，在前言中提及的 LPP 成分是为了说明反应抑制会比认知抑制消耗更多的认知资源用于抑制反应冲动，因此反应抑制可能比认知抑制产生更强的抑制后效。去抑制过程依赖于强烈的抑制后效，因此，本研究采用涉及反应抑制的范式，可以更清晰地揭示去抑制的认知神经机制。

意见 9: 请作者给出效应量和期望功效值的原因。-样本量过小，请补充被试。

回应: 我们重新参考了认知控制领域的研究的功率量设定(吴建校 等, 2022)，使用中等的效果量($\eta_p^2 = .25$)，期望的功效值($1 - \beta = 0.80$)以及显著性水平($\alpha = .05$)，计算需要被试样本量为 24，实际样本量符合要求。此外，与以往采用 BI 范式的内隐抑制解除研究相比(Giller et al., 2020; Zhang et al., 2016)，我们的实际样本量也符合要求。

吴建校, 曹碧华, 陈云, 李子夏, 李富洪. (2022). 认知控制的层级性: 来自任务切换的脑电证据. *心理学报*, 54(10), 1167-1180.

Giller, F., Mückschel, M., Ziemssen, T., & Beste, C. (2020). A possible role of the norepinephrine system during sequential cognitive flexibility-Evidence from EEG and pupil diameter data. *Cortex*, 128, 22-34.

Zhang, R., Stock, A. K., Fischer, R., & Beste, C. (2016). The system neurophysiological basis of backward inhibition. *Brain Structure & Function*, 221(9), 4575-4587.

意见 10: 对于使用 RIDE 工具箱的部分, 需要更详细地介绍该方法的原理、在脑电数据处理中的优势, 以及该方法如何被应用于本研究中。提供先前研究对该方法的验证和支持, 以及实验设计如何符合该方法的使用条件。

回应: 该部分的修改和意见 7 一样, 根据您的意见, 我们在前言部分增加了一节“1.4 ERP 残差迭代分解技术”。

意见 11: 除了反应时之外, 还可以比较抑制条件和无抑制条件下的错误率。抑制条件下的错误率通常会高于无抑制条件, 这个差异也是抑制代价的一个指标。但是目前作者并未提及这个指标。

回应: 正确率的重复测量方差结果无任何主效应和交互作用的发现, 由于任务十分简单, 因此四种条件下的正确率均接近 100%, 有天花板效应。因此, 未报告这一指标。

意见 12: 停止信号反应时间 (SSRT) 是在停止信号任务中常用的一个指标, 它表示当被试接收到停止信号时, 需要多长时间才能成功抑制原先已经启动的运动反应。和去抑制代 SSRT 价都是研究抑制控制功能的重要指标。作者可以同时考虑这两个指标, 以全面了解被试在抑制控制任务中的表现和认知加工过程。

回应: SSRT 主要反映的是抑制控制能力, 但本研究中改编的停止信号任务是用来探究去抑制过程的, 去抑制和抑制控制是两个不一样的加工过程(Chen et al., 2022; Chen et al., 2023), 两者虽有关联, 但去抑制却不是衡量抑制控制功能的指标。此外, 本研究采用的是 Chen et al. (2023) 研究中专门用来考察去抑制的范式, 根据此范式计算的 SSRT 反映出的抑制控制能力是不准确的。虽然抑制控制不是本研究的问题, 但将来可以使用标准的停止信号范式来准确测量 SSRT, 并进一步比较抑制控制与去抑制之间的关系。

意见 13: 行为结果中缺乏去抑制速度与去抑制代价的描述性统计。

回应: 感谢您的建议, 我们在修改稿中已增加相应结果的描述 (第 27 页, 第 1 段):
平均去抑制代价为 15ms, 平均去抑制速度为 1.51 ± 1.03 个试次。

意见 14: 脑电结果中缺乏去抑制速度和去抑制代价的描述性统计。

回应: 去抑制速度是行为指标, 脑电结果部分已增加去抑制代价相应的结果描述:
... P1 波幅的去抑制代价为 $1.01\mu\text{V}$... N1 波幅的去抑制代价为 $0.90\mu\text{V}$... N2 波幅的去抑制代

[价为 0.71 \$\mu\$ V... P3 波幅的去抑制代价为-1.22 \$\mu\$ V... P3 潜伏期的去抑制代价为 19ms... R-簇潜伏期的去抑制代价为 27ms...](#)

意见 15：作者在方法学部分并未提及相关分析，而且也没有介绍相关分析的目的。此外，在结果部分进行相关分析前，需要先检测数据是否成正态分布，如果不符合则不能进行皮尔逊相关分析。

回应：根据您的建议，我们在方法部分增加了相关分析的描述（第 26 页，第 2 段）：

[最后，为探究脑电去抑制指标与行为去抑制指标的关联，在对数据进行正态分布检测后，进行斯皮尔曼等级相关分析。](#)

由于数据不服从正态分布，我们重新进行了斯皮尔曼等级相关分析，统计结果的 r 值和 p 值有轻微变化，但变量间的相关结果与皮尔逊相关分析结果一样，未有改变，我们在文章中修改了相关分析的结果部分（第 30 页，第 1 段）：

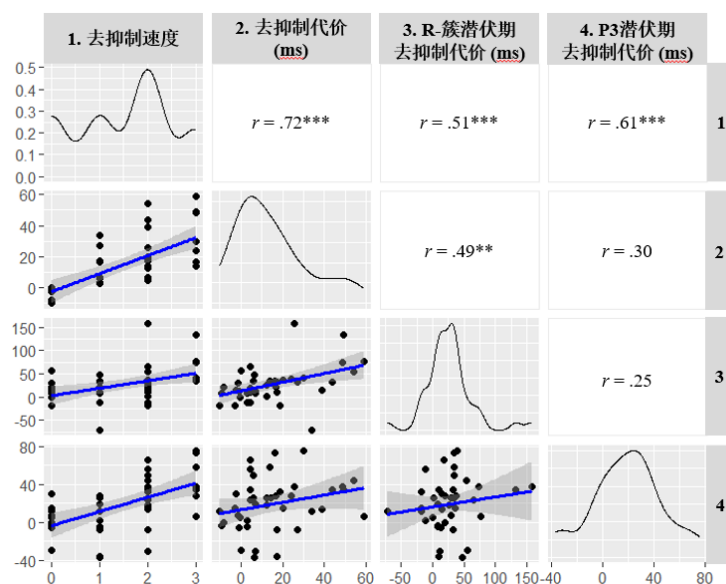


图 5. 行为与脑电指标数据分布特征及相关结果图(去抑制代价：抑制后重复 RT-抑制后切换 RT；去抑制速度：去抑制代价持续的试次数；P3 潜伏期去抑制代价：抑制后重复 P3 潜伏期-抑制后切换 P3 潜伏期；R-簇潜伏期去抑制代价：抑制后重复 R-簇潜伏期-抑制后切换 R-簇潜伏期)

意见 16：缺乏对图 6d 的结果描述。

回应：根据您的意见 15，我们重新进行了相关分析，并修改了结果图，同上。

意见 17：作者提到 P1 波幅增大可能反映了注意门控机制的调节，可以进一步阐述 P1 波幅增大如何与其他神经机制（如注意、工作记忆、认知控制等）相互作用，以及这种相互作用如何影响去抑制过程。

回应：根据您的建议，我们在 4.1 部分加入了 P1 成分与工作记忆、认知控制相互作用的如下讨论（第 31 页，第 1 段）：

... 这种早期的注意调节有助于确保个体对目标刺激的及时识别和分类，为后续的认知处理提供基础。

...本研究所发现的去抑制过程伴随 P1 波幅增大的结果支持了抑制论(Allport et al., 1994; Klimesch, 2011; Mayr & Keele, 2000)，表明个体的工作记忆中维持着特定刺激的抑制信息，并将其与当前情境的任务需求进行整合(Baddeley, 2012)，这种整合过程使得工作记忆需要更高效地管理和调度注意资源，导致 P1 波幅的增大。此外，由于注意力机制与认知控制需求关联密切(Hopfinger et al., 2000; Luck & Hillyard, 1994; Miller & Cohen, 2001)，P1 波幅的增大也预示着后续认知控制需求的增加，个体可能需要更多的认知资源来进行去抑制过程 ...

Hopfinger, J. B., Buonocore, M. H., & Mangun, G. R. (2000). The neural mechanisms of top-down attentional control. *Nature Neuroscience*, 3(3), 284-291. <https://doi.org/10.1038/72999>

Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Effects of spatial cuing on luminance detectability: psychophysical and electrophysiological evidence for early selection. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, 20(5), 1000-1014. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.20.5.1000>

Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>

意见 18：关于 N1 波幅变化的讨论，一些研究发现去抑制伴随着 N1 波幅的减小，而另一些研究却得到相反的结果。但目前还缺乏对这些研究结果之间差异的可能的原因的讨论。

回应：根据您的建议，我们在对 N1 成分的结果进行讨论的时候加入了以下内容（第 31 页，第 3 段）：

然而，当一些研究者重复使用 BI 范式时并没有在去抑制条件下发现更大的 N1 波幅 (Giller & Beste, 2019; Wolff et al., 2018)。研究结果之间的差异可能源于两个方面：第一，任务设置的不同。Giller 团队的几项研究均采用 Koch et al. (2004)的研究范式，在该范式中任务线索出现 100ms 后再出现目标刺激且线索不消失。因此，目标刺激诱发的较大 N1 波幅可能反映了线索准备之后与主动性控制关联的注意投入。但由于线索和目标仅仅间隔 100ms，会导致线索与目标诱发的早期 ERP 成分产生混淆，因此即使是同样的范式也没有稳定的 N1 结果产生(Giller & Beste, 2019; Wolff et al., 2018)。第二，抑制后效强度的原因。去抑制过程的产生依赖于强烈的抑制后效，内隐抑制的抑制后效强度较弱，这可能导致去抑制过程诱发的 ERP 成分并不稳定，因而导致相同范式有不同的 N1 结果 ...

意见 19: N2 是一个经典的冲突检测成分。作者可以进一步引用其他范式下的 N2 研究来进一步讨论去抑制条件下 N2 波幅减小的意义。

回应: 根据您的建议我们在对 N2 结果进行讨论时, 加入了其他经典范式下的与冲突监测相关的 N2 结果 (第 33 页, 第 1 段):

... 认知控制领域的经典研究表明, 涉及冲突监控的实验范式往往包含反应准备与执行的冲突, 如停止信号任务和 Go/No-Go 范式, 或是刺激/反应的切换, 如任务切换范式。在停止信号任务中, 当突然出现停止信号时, 被试需立即抑制已准备好的反应, 此时往往伴随着较大的 N2 波幅(Endrass et al., 2005; Ramautar et al., 2006)。同样, 在 Go/No-Go 任务中, No-Go 线索的出现会诱发更大的 N2 波幅(Kropotov et al., 2011; Smith et al., 2010), 这均反映了反应准备与执行的冲突。此外, 在任务切换范式中, 与任务重复相比, 刺激或反应的切换会诱发前部和中部更负的 N2 波幅, 反映了任务冲突监测与干扰控制的过程(Karayanidis et al., 2003; Nicholson et al., 2005; 吴建校 et al., 2022) ...

意见 20: 作者虽然进行了相关分析, 但在讨论部分并未加以呈现。

回应: 我们对 4.2 最后一段关于相关分析的讨论进行了扩充, 如下 (第 34 页, 第 2 段):

... 行为与脑电的相关分析结果发现, 行为上的去抑制指标(去抑制代价、去抑制速度)与 R-簇和 P3b 潜伏期上的去抑制代价呈正相关。相关分析表明去抑制存在个体差异, 如果一个被试在去抑制的任务中诱发的 P3b 潜伏期和 R-簇潜伏期更长, 反映了其在去抑制条件下认知背景更新与反应选择上遇到困难和延迟, 因而所需的时间更长, 导致其行为上的去抑制代价更大。另外, 去抑制速度反映了抑制效应对被试影响的持续时长, 当一个被试的去抑制速度越小, 表明该被试受抑制效应的影响较小, 因而表现出 R-簇与 P3b 潜伏期上较小的去抑制代价。

意见 21: 缺乏对整个实验结果部分的综合讨论。

回应: 我们在 4.3 的第一段增加对实验结果的总体综合论述 (第 34 页, 第 3 段):

本研究首次探究了外显去抑制过程的神经机制。行为结果显示, 抑制后重复条件的反应时显著长于抑制后切换条件的反应时, 这证明了去抑制代价的存在。ERP 结果进一步揭示了去抑制的神经加工过程, 包括早期的注意机制(P1/N1)、冲突监控(N2)以及认知背景更新(P3b)。去抑制过程中 P1 波幅的增大支持了抑制论, N1 波幅的减小表明去抑制过程需要调

动早期的注意调节机制，N2 波幅的减小则反映了去抑制过程中冲突监控需求的降低。此外，P3b 成分的波幅减小和潜伏期延长揭示了去抑制过程中背景更新困难和认知需求增加，支持了情景记忆检索论。整体来看，本研究结合行为和脑电结果，系统地描绘了去抑制的神经加工过程...

意见 22：结论的描写过于模糊，比如“去抑制过程与后顶叶 P1、N1 的波幅变化相关”，什么样的“变化”？

回应：根据您的意见，我们增加了结论部分的细节描述，修改段落如下（第 35 页，第 1 段）：

本研究使用脑电成分的残差迭代分解技术，探讨了去抑制过程的神经机制。结果发现，去抑制过程伴随着后顶叶 P1 波幅的增加与 N1 波幅的减小，反映了注意门控机制在去抑制的早期过程中的作用；去抑制过程也伴随前额叶 N2 波幅与顶叶 P3b 波幅的减小以及 P3b 成分和 R-簇成分峰值潜伏期的增加，表明去抑制需要更多的自上而下的认知控制以及动作反应控制。这些结果既支持了抑制论，也支持了情景记忆检索论。

第二轮

审稿人 1 意见：作者已经很好地回答我上一轮审稿中的疑问，目前我没有其他问题了。

.....

审稿人 2 意见：作者的修回稿已经很好地处理了我之前的提问，建议发表。

.....

编委意见：建议发表。

.....

主编意见：

意见 1：引言中应该着重分析去抑制机制及其存在问题；"ERP 残差迭代分解技术"似乎不是特异性方法，应该放在"方法"中简要说明。

回应：感谢主编的意见，我们对引言进行了修改，将去抑制涉及的认知机制与理论解释相联系，并明确指出已有研究存在的问题（第 23、24 页，蓝色部分）：

... 这两者的区别对于理解去抑制机制至关重要，但已有研究未能明确指出哪种理论更

具解释力。事实上，去抑制代价的产生可能并非单一因素所致，而是多种认知机制作用的结果。例如，在任务切换的研究中，情境记忆的检索可能需要与已抑制的任务信息进行匹配，而这种匹配过程本身也可能依赖于抑制的有效性(Berger et al., 2024; Grange et al., 2019; Han et al., 2019; Kowalczyk & Grange, 2020; Wu et al., 2022)。因此，抑制残留与情境记忆检索并不冲突，两者可能共同影响了去抑制过程，进一步探究去抑制过程的神经机制，可以检验相关理论观点。

... 已有研究显示去抑制过程与负责执行控制和决策过程的额叶区域的激活相关(Dreher & Berman, 2002; Mayr et al., 2006; Picazio et al., 2020)，这表明去抑制过程可能与主动的认知加工有关。比如，Dreher 和 Berman(2002)采用 BI 范式，要求被试根据三种不同的颜色线索对字母进行判断：元音/辅音、大写/小写或字母“m”的前/后，结果显示对已抑制的任务进行重新反应时，会伴随更强的右前额叶的激活，研究者认为这可能表明去抑制过程涉及对抑制的主动解除。Picazio 等(2020)使用连续 theta 爆发刺激(continuous theta burst stimulation, cTBS)激活被试额叶的前辅助运动区(pre-supplementary motor area, SMA)，结果显示 BI 效应消失，表明此区域的激活增强了去抑制能力。除前额叶之外，顶叶皮层也在去抑制过程中发挥作用(Sdoia et al., 2020)，该区域与注意和信息整合密切相关 ...

事件相关电位(event-related potential, ERP)研究表明，去抑制过程与早期注意机制相关(Giller & Beste, 2019; Giller et al., 2019; Zhang, Stock, Fischer, et al., 2016; Zhang et al., 2017)，可能反映了早期注意加工机制在处理残存抑制时的重要作用...

综上，去抑制过程可能涉及早期注意加工、中后期的冲突监测与情境更新，以及反应选择等神经加工机制。然而，以上结论大多来源于内隐的认知抑制的实验设计，且存在研究结果的不一致，因此去抑制过程涉及的神经加工机制还有待进一步探讨。

此外，“1.4 ERP 残差迭代分解技术”这一节的内容是我们按照之前审稿专家的意见在“引言”部分加入的。根据主编的意见，这一节的内容确实放在“方法”部分会更加合适，因此我们将这部分内容进行简化，并调整到了“方法”部分（第 28 页，第 3 段蓝色部分）。

意见 2：文中给出的假设（“我们假设，如果去抑制过程伴随 P1 波幅的增大，则支持抑制论；如果去抑制过程伴随 P3b 波幅的减小，则支持记忆检索论。”）是一个结果预期，缺少一个整体的“理论假设”。

回应：非常感谢主编的意见，我们在引言的“1.4 本研究的目的与假设”部分加入了明确的理论假设，具体修改内容如下（第 26 页，第 2 段蓝色部分）：

另外，关于去抑制代价的理论解释存在争议。根据抑制论，去抑制代价的产生是抑制残留的结果；但根据情境记忆检索论，去抑制代价源于刺激反应与记忆中的信息不匹配，需要进行自上而下的主动性控制加工去除先前抑制，并重构新的刺激-反应联结。本研究尝试采用时间分辨率高的 ERP 技术检验上述理论。我们认为，先前抑制的残留对当前任务的影响发生在早期时间窗口，若早期时间窗口中的 ERP 成分在去抑制条件与控制条件之间出现波形分离，比如 P1 波幅在去抑制条件下增大，则体现了先前试次中抑制的残留对当前试次的影响。相反，如果 P1 在去抑制条件和控制条件之间无差异，则可否定抑制论。情境记忆的过程包括记忆检索、信息匹配和重构新联结，发生于较晚的时间窗口，通常与 P3b 成分相关(Polich, 2007; Upton et al., 2010; Zhang et al., 2019)，若去抑制与控制条件之间的波形分离发生于此时窗，比如 P3b 波幅在去抑制条件下明显减小，则表明去抑制是一个自上而下的主动性控制加工过程。简言之，如果仅在任务的早期时窗(P1)发现去抑制效应则支持抑制论，如果仅在较晚时窗(P3b)发现去抑制效应则支持情境记忆检索论，如果在两个时窗都存在去抑制效应，则表明上述两种理论皆支持。

我们在讨论部分也增加了相关论述（第 37 页，第 2 段蓝色部分）：

综上所述，去抑制过程不仅涉及到早期注意加工，还包括中后期的情境更新以及反应选择。在此，我们提出动态抑制-记忆整合论(Dynamic Inhibition-Memory Integration Theory, DIMIT)，该理论融合了抑制论和情境记忆检索论的核心观点，认为去抑制代价并非由单一机制引发，而是早期抑制残留与晚期情境更新两个过程共同作用的结果。具体而言，去抑制的初期效应可能源于抑制残留，这一效应会在任务的早期阶段显现；而在后续阶段，去抑制效应可能反映了自上而下的情境记忆检索过程，此时大脑需主动调整并重构新刺激-反应联结以应对新任务的要求。这一整合理论提供了一个更为复杂和动态的视角，强调了抑制和情境记忆检索之间的协同作用。

意见 3：缺少 R-簇 ERP 波形图。

回应：我们在结果部分补充了 R-簇的 ERP 波形图（第 32 页）

意见 4: 图 5 中的相关系数应该放在相应的图上。

回应: 我们对相关散点图进行了修改 (第 33 页)

意见 5: 文字表述存在口语化倾向, 如很多地方有“结果发现”等。

回应: 我们对全文进行了细致的检查, 将“结果发现”调整为“结果显示”, 并修改了多处文字表述。