

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：痛苦逃避和自我参照惩罚条件下脑电特征对自杀意念的分类效能

作者：孙芳 宋巍 李欢欢 温晓通 欧阳李晟 魏诗洁

第一轮

审稿人 1 意见：

这篇文章结合脑电测量和机器学习的方法，以大学生为研究对象，探索了可以预测自杀意念的因素，考察心理痛苦，尤其是痛苦逃避及痛苦加工相关的脑电成分。该论文研究问题表述清晰，研究方法使用得当，行文流畅，逻辑严谨。但文章存在以下几点问题需要作者进一步解释和改进。

意见 1：图 1 实验流程图中，应标识清楚不同图中的信息，比如上中下三种条件的差异，以及不同面孔的区别（自我、他人）。如果反应不够快，是否也会收到积极反馈？是否反馈的面孔积极与否不依赖于按键反应快慢？

回应：非常感谢并完全接受专家的建议。

（1）为了阐释清楚实验流程，对图 1（实验流程图）进行修改。首先，在上中下三行左侧添加条件信息，分别为“奖励”、“惩罚”和“中性”。其次，在线索提示图片中增加了一列“自我参照”的线索图形，详见修改稿中图 1 所示。

具体来说，SAID 任务开始前，首先告知被试在奖励条件下按键反应够快，则反馈积极面孔，否则反馈中性面孔；在惩罚条件下按键反应够快，则反馈中性面孔，否则反馈消极面孔（即痛苦面孔）；在中性条件下不论反应时快或慢，都反馈中性面孔。以奖励条件为例，当线索期待阶段呈现图形“△”（如图 1 线索提示左列），反馈他人面孔；若呈现“▲”（如图 1 线索提示右列），反馈自我面孔。

在 SAID 任务的线索期待阶段，呈现一个指示激励信息的线索（2500ms），线索“三角形”代表奖励条件，“正方形”代表惩罚条件，“圆形”代表中性条件。短暂注视点后，在目标反应阶段，呈现一个蓝色“+”（随机 500~1000ms），要求被试尽可能快做出反应。结果反馈阶段，

根据反应速度快慢，给被试呈现积极、消极和中性面孔图片（3000ms）。

（2）目标反应阶段，蓝色“+”呈现时间根据自适应算法进行调整，以保持每个被试的命中率为 66.67%（Xie et al., 2014）。因此，是否反馈积极面孔不完全依赖于被试的按键反应绝对快慢，被试反应速度相对不够快可能也会获得积极反馈。

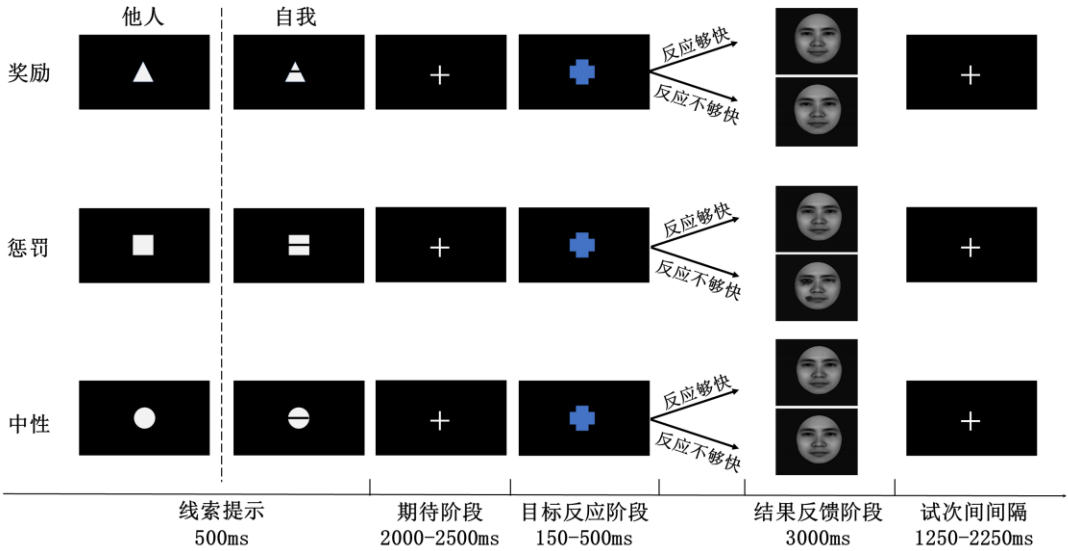


图 1 实验流程图（反馈图片以他人面孔为例）

参考文献

Xie, W., Li, H. H., Luo, X. W., Fu, R., Ying, X. Y., Wang, N., ... Shi, C. (2014). Anhedonia and pain avoidance in the suicidal mind: behavioral evidence for motivational manifestations of suicidal ideation in patients with major depressive disorder. *Journal of Clinical Psychology*, 70(7), 681–692.

意见 2：“并随机将数据集分为训练集（70%）和测试集（30%）。第二步，采用十折交叉验证(10-fold cross validation)对数据集进行分割”这里 70%-30%和 10-fold 验证的关系是什么？是否是在 70%的训练集中进行了 10-fold 验证？

回应：非常感谢专家提问和提醒。

（1）本研究是在 70%的训练集中进行 10-fold 验证。在修改稿中对上述步骤进行补充说明（见 2.5.3 部分第四段第 3~4 行），并提供参考文献。

（2）具体操作方式：首先，将数据集随机分成训练集 A（70%样本）和测试集 B（30%样本）。对训练集 A 做 10-fold 验证，将训练集 A 数据进一步分为等大小、互斥的 10 份，进行 10 次训练。在第 i 次训练中，选择其中 9 份（即第 i 份数据之外的数据）组成该次训练

的训练集，将第 i 份作为该次训练的测试集（Jung, 2018），最终的模型参数为 10 次训练之后得到的平均参数。

（3）为进一步优化和增加本研究中机器学习结果的稳定性和可靠性，修改稿中对机器学习数据分析部分采用 1000 次有放回地随机抽样来测试评估各变量对于分类的重要性。具体步骤补充在修改稿中 2.5.3 部分第四段。

参考文献

Jung, Y. (2018). Multiple predicting K-fold cross-validation for model selection. *Journal of Nonparametric Statistics*, 30(1), 197–215.

意见 3：作者构建了“单模态抑郁模型”和“多模态抑郁模型”，涉及了脑电数据和量表数据，但没有纳入行为指标。请简单讨论原因。

回应：非常感谢专家的建议。

（1）原稿的单模态抑郁模型主要是基于脑电指标构建，多模态抑郁模型中输入变量包括人口学特征（年龄、性别）和临床量表（痛苦逃避、痛苦体验、痛苦唤醒），行为指标中未纳入反应时。未纳入反应时的原因是：在本研究的传统分析中未发现反应时有意义的结果，提示反应时指标可能不稳定，对分类模型解释力相对有限，故未将纳入单模态和多模态抑郁分类模型的输入变量。

（2）考虑到机器学习相对于传统算法的优势，在修改稿中将“反应时”也纳入多模态抑郁模型的输入变量。具体步骤增加在 2.5.3 RFE-SVM 建模流程中的第二段和第三段相应部分。结果发现，自我参照惩罚条件下反应时在多模态抑郁分类模型的特征重要性排序中排名 39，在多模态自杀分类模型的特征重要性排序中排名 64，与传统分析结果能够互相印证。

意见 4：结果部分的内容比较多，作者应考虑把最为重要的有关自杀意念的机器学习的部分放在开端，而其他不直接回答本研究最关键问题的内容放在后面或附录。

回应：非常感谢并完全接受专家的建议。

（1）修改稿中，首先在“结果部分”先呈现 4 个二分类模型结果（详见 3.2 机器学习结果分析），将静息态和任务态数据传统分析结果调整靠后（见 3.3 静息态和任务态数据分析）。

（2）同时，讨论内容的顺序也进行调整，将重点放在自杀意念分类模型（见 4.2~4.5 部分）。

意见 5: 作者汇报了四个分类模型的评估指标（表 6），作者应解释清楚如何选取的四个分类模型，比如痛苦唤醒的特征集为何没有考虑。

回应: 非常感谢并完全接受专家的建议。

（1）修改稿补充了选取痛苦体验和痛苦逃避二分类模型，未选取痛苦唤醒二分类模型的原因，详见 2.5.3 第一段第 3~11 行。

具体为：“由于前期在大样本中学生（ $N=2385$ ，数据未发表）中采用潜在剖面分析（Latent Profile Analysis, LPA），发现痛苦唤醒得分在心理痛苦不同组合模型中无显著差异；并且在抑郁症患者、大学生群体中痛苦唤醒未进入自杀意念、自杀未遂的回归模型（Li et al., 2014; Li et al., 2017）。因此，在本研究样本中，仅纳入痛苦体验和痛苦逃避不同组合。”

（2）其次，在 2.5.3 部分分别补充建立四个分类模型的说明和步骤。

具体为：“为了探索痛苦逃避及痛苦加工脑电特征在自杀意念分类模型中的重要性和特异性，并考察心理痛苦和抑郁对自杀意念分类效能的差异。第一步，需要建立痛苦体验和痛苦逃避分类模型中的重要脑电特征集，探索自我参照惩罚条件下脑电特征对于痛苦逃避二分类模型的重要性。”“第二步，建立以单模态和多模态数据为输入变量的抑郁分类模型，为后续区分抑郁分类模型、自杀意念分类模型的多模态重要特征集差异提供依据。”“第三步，建立单模态和多模态的自杀意念分类模型，并将模型中的重要特征集与痛苦逃避分类模型、抑郁分类模型的重要特征集差异进行比较。”详见 2.5.3 部分前三段前 1~2 行。

意见 6: 抑郁没有显著预测自杀意念，是否和样本不是抑郁群体有关系？作者应简单讨论。

回应: 非常感谢专家的提问和建议。

（1）原稿中多模态的自杀意念分类模型中未纳入 BDI 指标，所以没有发现抑郁对自杀意念分类模型的贡献。根据专家建议，在修改稿中，将 BDI 指标作为输入变量纳入多模态自杀意念分类模型中，结果发现，BDI 在特征重要性中排序第二，仅次于痛苦逃避。

（2）以往研究发现，在非临床群体（大学生）中（Li et al., 2017），抑郁和痛苦逃避均能显著预测自杀意念。而在抑郁症群体中，仅痛苦逃避能预测自杀未遂和最严重时的自杀意念，而 BDI 得分则不能。但 BDI 和痛苦逃避均能显著预测抑郁症患者当前的自杀意念（Li et al., 2014）。与本研究中的机器学习结果相符合。

（3）在修改稿中的讨论部分，增加了 BDI 在自杀意念分类模型的作用和解释。详见 4.4 部分第二段第 2~7 行。

意见 7: 研究结果发现了痛苦逃避对于自杀意念的预测效果。作者应添加讨论，痛苦逃避的预测效果意味着什么，对于自杀干预又有什么指导意义。

回应: 非常感谢并完全接受专家的建议。

(1) 在修改稿中的讨论部分补充讨论痛苦逃避对于自杀预测效果的意义、临床价值和自杀干预的指导意义（见 4.4 部分第二段第 1-9 行）。

不同于上述传统分析（如回归分析、方差分析），本研究首次使用机器学习算法在大学生群体中，整合人口学、临床量表得分、行为学和脑电特征等多模态数据，建立复杂的自杀意念分类模型，结果发现：痛苦逃避在自杀意念分类模型中特征重要性排序第一，高于抑郁。并且，基于痛苦逃避及自我参照惩罚条件下脑电特征的多模态自杀意念分类模型的分类效能显著高于基于脑电特征的单模态自杀意念分类模型。为发展结合心理痛苦三因素模型和机器学习的自杀意念预测模型的临床应用提供了有价值的参考。

同时，基于痛苦逃避对自杀意念、自杀未遂的跨样本（临床和非临床群体）稳定性，未来的自杀干预可针对性的发展识别诱发痛苦情境，挑战痛苦逃避的认知偏差和消极应对方式的认知行为治疗，有助于降低个体的自杀风险。

(2) 由于自杀的难预测性和难干预性，如何建立有效的自杀预测模型是自杀研究领域的重大科学问题。以往研究采用传统算法，发现痛苦逃避在大学生样本（Li et al., 2017）、抑郁症群体（Zou et al., 2017; Song et al., 2020; Sun et al., 2020）、青少年样本（Bao et al., 2020）自杀意念和自杀未遂中起着重要的预测作用，且独立于抑郁。本研究进一步采用机器学习和传统分析结合，为痛苦逃避对自杀的预测效能优于抑郁提供进一步实证证据支持。

主要参考文献

Zou, Y. M., Li, H. H., Shi, C., Lin, Y. X., Zhou, H. Y., & Zhang, J. Q. (2017). Efficacy of psychological pain theory-based cognitive therapy in suicidal patients with major depressive disorder: A pilot study. *Psychiatry Research*, 249, 23–29.

其他意见:

意见 1: 作者是否控制了 multiple comparison correction? 比如表 5 中汇报的结果。

回应: 非常感谢专家的提问和建议。

本研究在频域、时频、时域特征多重比较时，使用 Bonferroni 进行校正，以减少第一类错误带来的误差。另外，进行人口学变量差异分析，事后检验时，方差齐性时使用 Gabriel's 进行校正，方差不齐时使用 Games-Howell 进行校正。对此，在修改稿的 2.5.1 部分第 4~5

行、2.5.2 部分第 4~5 行中进行补充说明，并在相应表格下进行补充说明。

意见 2：第 10 页、“建立多模态加郁和健康分举模型（简称“多模态抑郁模型”）。”多了一个句号。

回应：非常感谢专家指出问题，非常抱歉出现这样的疏漏。修改稿对该错误进行订正。同时，对修改稿全文进行逐字逐句检查和修改。

.....

审稿人 2 意见：

文章《痛苦逃避和自我参照惩罚条件下脑电特征对自杀意念的分类效能》综合使用行为、静息态、任务态数据，特别是采用支持向量机进行预测分类，是一篇难得的文章。但是可惜的是文章存在一些问题提醒作者注意。主要问题：

意见 1：“2.4 脑电数据采集和处理”，“对数据进行 2s 分段”，这对于低频 delta 显然不够、毕竟时频分析会在两侧引入伪迹，因此窗口太短。更糟糕的是，在任务态，“选取-200~0ms 进行基线校正”，这样做对于 ERP 是可以，但是对于时频分析的低频显然太短，无法消除两侧伪迹。因此任务态窗口选择对于时频分析着实有点勉强。

回应：非常感谢并完全接受专家的建议。

通过查阅参考文献，修改稿重新调整了数据的分段、基线校正的时间段。对研究数据重新进行时频分析，并补充时间段划分依据的重要参考文献（见 2.4 第二段第 4~5 行、第三段 4~6 行）。具体如下：

首先，针对静息态数据，静息态脑电信号作为一种连续的时间序列信号，具有非平稳特征（Gao, 2001）。脑电信号在 2s 的短 EEG 段中是相对稳定的（Cao et al., 2004）。在以往自杀和抑郁相关静息态脑电研究中，多采用 2s 对 EEG 连续数据进行分段（如 Dolsen et al., 2017; Hunter et al., 2010; Meerwijk & Weiss, 2016; Mohammadi et al., 2015）。因此，在本研究中，对 EEG 信号进行统计分析之前将按照 2s 的恒定窗口进行分段。

其次，针对任务态时频分析，发现进行小波变换时，由于试次之间的信号值突然转换，使得边缘伪迹对基线产生影响，取较长的基线时间可以降低这种影响（Cohen & Cavanagh, 2011），而低频信号（如 delta 频段）至少需要 1000ms 时长进行转换（Cohen, 2014）。参考前人时频分析相关参数（刘洁 等, 2020），修改稿中选取-900 到-100ms 进行基线校正。

主要参考文献

- Cao, Y., Tung, W. W., Gao, J. B., Protopopescu, V. A., & Hively, L. M. (2004). Detecting dynamical changes in time series using the permutation entropy. *Physical Review E*, 70(4), e046217.
- Cohen, M. X. (2014). *Analyzing Neural Time Series Data: Theory and Practice*. MIT Press.
- Cohen, M. X., & Cavanagh, J. F. (2011). Single-trial regression elucidates the role of prefrontal theta oscillations in response conflict. *Frontiers in Psychology*, 2, 1–12.
- Gao, J. B. (2001). Detecting nonstationarity and state transitions in a time series. *Physical Review E*, 63(6), e066202.
- Hunter, A. M., Leuchter, A. F., Cook, I. A., & Abrams, M. (2010). Brain functional changes (QEEG cordance) and worsening suicidal ideation and mood symptoms during antidepressant treatment. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 122(6), 461–469.
- Liu, J., Li, J. Q., Shen, C. R., Hu, X. H., Zhao, T. H., Guan, Q., & Luo, Y. J. (2020). The neural mechanism of approximate number processing for mathematical anxious individuals: An EEG study. *Acta Psychologica Sinica*, 52(8), 958–970.
- [刘洁, 李瑾琪, 申超然, 胡小惠, 赵庭浩, 关青, 罗跃嘉. (2020). 数学焦虑个体近似数量加工的神经机制: 一项 EEG 研究. *心理学报*, 52(8), 958–970.]
- Mohammadi, M., Al-Azab, F., Raahemi, B., Richards, G., Jaworska, N., Smith, D., ... Knott, V. (2015). Data mining EEG signals in depression for their diagnostic value. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 15(108), 1-14.

意见 2: 既然作者分三组, 为什么不采用多分类标签, 毕竟机器学习算法很多, 没有必要限制于支持向量机。

回应: 非常感谢专家的建议。根据专家建议, 我们尝试了三分类的随机森林 (Random Forest, RF)、朴素贝叶斯 (Naive Bayes, NB) 模型, 修改稿中最终呈现二分类支持向量机模型, 有如下两点原因:

第一, 二分类模型更合考察本研究的研究问题。在临床疾病分类中, 多分类模型可能具有更高的应用价值, 有助于现实情况下的疾病检测, 排除共病情况或具有共同特征但性质不同的疾病 (Rashid & Calhoun, 2020); 而二分类模型则更加侧重于提取分离两类疾病的重要特征, 有助于探究疾病的内在机制。本研究中旨在基于心理痛苦三因素模型, 探索痛苦逃避

及自我参照惩罚条件下脑电特征对自杀意念的分类效能。对于 HC、LSI、HSI 三类标签，我们参考了三分类模型的“one-against-rest”建模原理，通过构建 HSI vs. (HC+LSI)的自杀意念二分类模型检测痛苦逃避及其神经电生理指标对模型的贡献权重，通过构建 HC vs. (LSI+HSI)的抑郁二分类模型检测痛苦体验及其神经电生理指标对模型的贡献权重，以上两个二分类模型能够较好地满足上述研究问题的要求。

第二，本研究通过特征递归消除（RFE）算法提取对模型贡献较大的特征，通过尝试，我们发现三分类模型算法在 RFE 中的应用存在局限。具体而言，我们尝试构建了 RFE-NB、RFE-RF 三分类模型，并以 Kappa 值作为评估指标。结果显示，RFE-NB 三分类模型和 RFE-RF 三分类模型的 Kappa 值分别为 0.63、0.47。一般认为，理想的模型 Kappa 值为 0.8 以上，两个模型的分类效果均不理想。原因可能如下：

（1）三分类机器学习模型的决策过程更为严格。多分类的机器学习模型的构建通常采用“one-against-one”或“one-against-rest”的原理，通过构建多个子二分类器的方式综合得到一个多分类器。以“one-against-rest”构建的三分类器为例，对于 HC、LSI、HSI 三分类标签，模型将分别构建 3 个子二分类器：HC vs. (LSI+HSI)、LSI vs. (HC+HSI)和 HSI vs. (HC+LSI)，每个样本的最终分类将由 3 个子二分类器分别决策后，分别计算 3 个子二分类器将样本划分为 HC、LSI 或 HSI 的概率，以最高的概率值为最终的决策。由于 LSI vs. (HC+HSI)分类器不具有现实意义，样本被正确分类的概率将大为降低。

（2）本研究使用的 RFE 算法思想不适用于多分类机器学习模型。RFE 算法通过多次循环，逐一剔除分类器中重要性权重较低的变量，有助于探究构建高精度分类模型需包含的特征数目及特征信息，减少算法冗余和混淆信息，使用效果将好于传统使用的低方差别除法、相关系数剔除法等特征筛选方法（Chen & Jiong, 2007），结合本研究的研究目的，RFE 是最为适用且效率最高的特征筛选方法之一。但是，在本研究中，由于三分类器报告的变量重要性权重是综合权重（即分离 HC、LSI、HSI 共同的重要变量），被分类器判定为重要性较低、从而被 RFE 算法剔除的变量，可能对单个子二分类器的分类具有重要意义，剔除这样的变量将极大影响对重要特征的筛选，造成模型仅具有数学上的意义，但是可能不能准确反映实际。

审稿专家提出的问题以及针对此问题进行的测试为我们提高分析的稳定性和可靠性提供了启示。因此，在修改稿中，我们改进了二分类模型分析过程，采用 1000 次有放回的随机抽样来获取模型特征重要性和评估指标的平均值（见 2.5.3 第四段第 1~2 行、第 8~10 行），减少模型训练过程中由抽样引起的误差。在未来的研究中，我们将根据更加适合多分类标签

的研究问题，进一步尝试多分类器的建模。

参考文献

Chen, X. W., & Jeong, J. C. (2007). *Enhanced recursive feature elimination*. Sixth International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA 2007) (pp. 429–435). IEEE.

Rashid, B., & Calhoun, V. (2020). Towards a brain-based predictive of mental illness. *Human Brain Mapping, 41*(12), 3468–3535.

意见 3：脑电测量的参考电极为单侧乳突（M1），脑电数据处理参考电极为双侧乳突，但为何选取文中并未提及，请补充说明。特别是时频分析更多情况下采用平均参考。

回应：非常感谢并完全接受专家的建议。

（1）修改稿中对参考电极选取的原因进行了补充说明，详见方法部分 2.4 中第一段第 1~2 行、第二段第 1~3 行。具体如下：

脑电数据处理的参考电极点会影响头皮电位的空间和时间特征，从而导致不同的结果（Yao et al., 2019）。不同的参考方式是根据不同的假设推导出来，并服务于不同的目的。

记录电极选择：以左侧乳突 M1 为零参考电极，以右侧乳突 M2 为记录电极。M1 相对于头皮活动相对较弱，经常用于脑电活动的记录。

（2）处理离线数据时，双侧乳突平均基于假设：双侧乳突上记录的电位的平均值接近于零或中性（Yao et al., 2019）。经常运用于探索头皮中线电极记录的数据，如 Fcz、Fz、F4、C3、Cz、C4、P3、Pz、P4、O1、Oz 和 O2 等。平均参考基于假设：在完美的球形头部模型中神经电流以各向同性方式传播，头部表面上的电位积分为零，即所有电极的平均电位可能趋于零，因而可以作为参考电极。尽管平均参考受单一电极影响较小，但比较依赖于电极点的密度和覆盖面、头部形状、容积传导效应等因素（Yao et al., 2019）。对于偏离球体的真实头部模型，EEG 电位的表面平均电势不为零（Yao, 2017）。因此，平均参考作为零电极点的近似值受到许多条件的限制。基于以上考虑，参考以往时频分析的文章（侯璐璐 等, 2020; 蒋宇宸 等, 2020; 王丽君 等, 2020），以及同时分析时频和时域信号的文章（如 Watts et al., 2017; Webb et al., 2017），本研究采用双侧乳突作为参考电极。

参考文献：

Hou, L. L., Chen, L. R., & Zhou, R. L. (2020). Altered reward processing in women with premenstrual syndrome: Evidence from ERPs and time-frequency analysis. *Acta Psychologica Sinica, 52*(6), 742–757.

[侯璐璐, 陈莅蓉, 周仁来. (2020). 经前期综合征与奖赏进程失调——来自脑电的证据. *心理学报*, 52(6), 742–757.]

Jiang, Y. C., Cai, X., & Zhang, Q. F. (2020). Theta band (4~8 Hz) oscillations reflect syllables processing in Chinese spoken word production. *Acta Psychologica Sinica*, 52(10), 1199–1211.

[蒋宇宸, 蔡笑, 张清芳. (2020). θ 频段(4~8 Hz)的活动反映了汉语口语产生中音节信息的加工. *心理学报*, 52(10), 1199–1211.]

Wang, L. J., Suo, T., & Zhao, G. Q. (2020). The influence of unaware errors on post-error adjustment: Evidence from electrophysiological analysis. *Acta Psychologica Sinica*, 52(10), 1189–1198.

[王丽君, 索涛, 赵国祥. (2020). 未意识到错误影响错误后调整的电生理证据. *心理学报*, 52(10), 1189–1198.]

Watts, A. T. M., Bachman, M. D., & Bernat, E. M. (2017). Expectancy effects in feedback processing are explained primarily by time-frequency delta not theta. *Biological Psychology*, 129, 242–252.

Webb, C. A., Auerbach, R. P., Bondy, E., Stanton, C. H., Foti, D., & Pizzagalli, D. A. (2017). Abnormal neural responses to feedback in depressed adolescents. *Journal of Abnormal Psychology*, 126(1), 19–31.

Yao, D. (2017). Is the surface potential integral of a dipole in a volume conductor always zero? A cloud over the average reference of EEG and ERP. *Brain Topography*, 30(2), 161–171.

Yao, D., Qin, Y., Hu, S., Dong, L., Bringas Vega, M. L., & Valdés Sosa, P. A. (2019). Which reference should we use for EEG and ERP practice? *Brain Topography*, 32(4), 530–549.

意见 4: “delta (Fz)、theta (Fpz)、beta (Cz)”这样选择的依据是什么?

回应: 非常感谢专家的提问。参考以往时频分析文章, 以及不同电极点活动明显的脑区, 在修改稿中对频段和电极点选择依据进行补充说明(见 2.4 部分第二段第 8~9 行)。具体如下:

(1) 阅读以往文献, 发现 delta、theta、beta 频段活动分别在额叶中部(Knyazev, 2007, 2012)、额叶中线(Cook et al., 2014)和中后部(Koshiyama et al., 2020)较为明显。同时, 参考以往自杀相关的静息态脑电研究, 最终取 Fz 电极点 delta、Fpz 电极点 theta、Cz 电极点 beta 频段能量值进行分析。

(2) 查阅自杀、抑郁相关的静息态脑电研究, 发现关注的 EEG 频段集中在 delta、theta、

beta 等频段 (Benschop et al., 2019; Dolsen et al., 2017; Lee et al., 2017)。

其中, 对于 delta 频段而言, 研究发现相对于低自杀意念抑郁症患者, 高自杀意念抑郁症患者在睡眠期间 delta 频段活动降低, 即便控制抑郁症状得分后, 该结论仍成立 (Dolsen et al., 2017), 说明了 delta 频段活动降低是自杀风险的典型特征。

对于 theta 频段而言, 健康被试中 theta 频段能量与自杀意念成正相关, 且相比低自杀意念组, 高自杀意念组额叶中央区的 theta 频段能量显著增加 (Lee et al., 2017)。Theta 频段活动异常也是抑郁症高自杀风险的潜在神经特征 (De Aguiar Neto & Rosa, 2019), 抑郁症患者服抗抑郁药 48h 后, 自杀意念伴随着右侧额中线 theta 活动降低而出现 (Hunter et al., 2010), 说明 theta 活动异常与自杀、抑郁的关系密切。

对于 beta 频段而言, 相对于低自杀意念抑郁症患者, 高自杀意念抑郁症患者在睡眠期间 beta 频段活动边缘显著增加 (Dolsen et al., 2017); 相对于非自杀组, 伴有自杀意念和自杀未遂的抑郁症患者 beta 能量降低 (Benschop et al., 2019), 说明 beta 活动异常与自杀之间关系密切。

尽管早期研究中认为 alpha 频段 (8~12Hz) 与自杀行为关系密切 (Hodgkinson et al., 2016), 但 alpha 频段容易受到年龄、激素和睁眼闭眼条件影响 (Bazanov & Vernon, 2014), 在研究中结果非常不稳定。因此, 在本研究中未关注 alpha 频段活动与自杀、抑郁之间的关系。

主要参考文献

- Bazanov, O. M., & Vernon, D. (2014). Interpreting EEG alpha activity. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 94–110.
- Benschop, L., Baeken, C., Vanderhasselt, M. A., van de Steen, F., van Heeringen, K., & Arns, M. (2019). Electroencephalogram resting state frequency power characteristics of suicidal behavior in female patients with major depressive disorder. *The Journal of Clinical Psychiatry*, 80(6), 18m12661.
- Cook, I. A., Hunter, A. M., Korb, A. S., & Leuchter, A. F. (2014). Do prefrontal midline electrodes provide unique neurophysiologic information in Major Depressive Disorder? *Journal of Psychiatric Research*, 53, 69–75.
- Hodgkinson, S., Steyer, J., Kaschka, W. P., & Jandl, M. (2016). Electroencephalographic risk markers of suicidal behaviour. *Biological Aspects of Suicidal Behavior*, 30, 101–109.
- Hunter, A. M., Leuchter, A. F., Cook, I. A., & Abrams, M. (2010). Brain functional changes

- (QEEG cordance) and worsening suicidal ideation and mood symptoms during antidepressant treatment. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 122(6), 461–469.
- Knyazev, G. G. (2007). Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 31(3), 377–395.
- Knyazev, G. G. (2012). EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(1), 677–695.
- Koshiyama, D., Kirihaara, K., Usui, K., Tada, M., Fujioka, M., Morita, S., ... Kasai, K. (2020). Resting-state EEG beta band power predicts quality of life outcomes in patients with depressive disorders: A longitudinal investigation. *Journal of Affective Disorders*, 265, 416–422.

意见 5: 格式问题，如“还是多模态数据（75%）的自杀意念分类模型准确率显著高于随机水平（50%）和传统算法（0.57）（Burke et al.,2019）”，“的”字字体为黑体、“本研究中 HSI 组的分组标准：①Beck 抑郁问卷得分>7”，序号（①后面不需要加空格、“Beck 自杀意念问卷得分同 LSI 组。”，“。前面不需要加空格，以及”“Smile Closed-0”、“Sad-0”，消极为“Smile Closed-0”、“Sad-0.5”，积极为”Smile Closed-0.5”、“Sad-0”，其余参数保持一致。”段落中多处出现空格等。

回应: 非常感谢专家的指导建议，在修改稿中对上述格式错误进行了逐一订正。同时，对全文进行逐字审读，对全文中多余的空格、字体等问题进行修改。

意见 6: 引言中情感激励延迟范式的出现有些突兀，在前面加一个脑电的任务态研究表明，再介绍一下情感激励延迟范式会好一点。

回应: 非常感谢并完全接受专家的建议。在修改稿中进行了上述修改，并补充阐述情感激励延迟范式的发展和应用价值（见引言部分第六段、第七段第 1~3 行）。具体如下：

以往自杀意念的任务态脑电研究，主要关注高自杀风险抑郁症患者情绪和认知加工过程中的神经电生理特征。研究发现，与无自杀意念者相比，有自杀意念的大学生在观看负性情绪图片时诱发出更高的 LPP 波幅（Kudinova et al., 2015）。在 go/no-go 任务中，与无自杀未遂史个体相比，有自杀未遂史的个体在任务中诱发了更大的 N2 差异波幅（Albanese et al., 2019），提示对负性刺激投入更多的注意资源，难以有效抑制可能是自杀风险者的认知加工特征。然而，上述任务范式与心理痛苦无明显关联，不能用于探索自杀风险者痛苦加工异常

的神经电生理特征。

因此，需要采用更加有效的范式同时分离自杀相关的痛苦加工过程。研究表明，情感激励延迟范式（Affective incentive delay task, AID）为探讨痛苦体验和痛苦逃避动机的神经机制提供了可能。该范式适用于临床抑郁症患者，能够直接和准确地测量被试对不同情绪刺激的动机水平反应及神经基础。在惩罚线索提示下，个体预期击不中时将反馈负性情绪图片，可能诱发被试的负性情绪体验，是痛苦加工的认知唤醒阶段；在目标反应阶段，被试在较短时间进行快速反应以逃避惩罚，是痛苦加工的动机逃避阶段；在结果反馈阶段，接受负性图片反馈后诱发负性情绪体验，对应痛苦加工的情绪体验阶段。该范式及其改进范式自我参照性情感激励延迟范式（Self-referential affective incentive delay task, SAID），已在大学生群体运用，证实有效。

参考文献

Albanese, B. J., Macatee, R. J., Gallyer, A. J., Stanley, I. H., Joiner, T. E., & Schmidt, N. B. (2019).

Impaired conflict detection differentiates suicide attempters from ideating non-attempters: Evidence from Event-Related Potentials. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 4(10), 902–912.

Kudinova, A. Y., Owens, M., Burkhouse, K. L., Barretto, K. M., Bonanno, G. A., & Gibb, B. E.

(2015). Differences in emotion modulation using cognitive reappraisal in individuals with and without suicidal ideation: An ERP study. *Cognition and Emotion*, 30(5), 999–1007.

意见 7：在一些错别字，请仔细校对。

回应：非常感谢专家的指导建议，非常抱歉出现这样的疏漏。为了避免再次出现类似错误，已对全文进行逐字逐句检查错别字，并修改。

意见 8：英文“=、<”前后都有一个空格。

回应：非常感谢专家的指导建议。已对这一问题进行订正。并逐一修订了文中所有符号相关的空格。

意见 9：文章缺少结论部分。

回应：非常感谢并完全接受专家的建议。为了便于读者把握本文的主要结论和贡献，修改稿中增加结论部分，对本研究主要发现和意义进行总结归纳（见 5 结论）。具体如下：

(1) 痛苦逃避和自我参照惩罚条件下的 CNV、LPP 和 P3 是自杀意念分类模型的重要行为学和神经电生理特征。

(2) 痛苦逃避对于自杀意念分类模型的区分效能具有重要性和特异性，且重要性高于抑郁。

(3) 结合机器学习和心理痛苦三因素模型的自杀意念分类模型具有优良的区分效能，今后可拓展该模型在临床中的应用价值。

第二轮

审稿人 1 意见：

意见 1：自我参照性情感激励延迟范式（Self-referential affective incentive delay task, SAID）与情感激励延迟范式（Affective incentive delay task, AID）的区别可以比较一下。

回应：非常感谢并完全接受专家的建议。SAID 和 AID 范式的区别主要在于反馈阶段的情绪图片材料不同，在修改稿的前言中进行补充说明（详见 1 引言部分的第 7 段 2~5 行），并补充相应参考文献。具体如下：

“SAID 的任务规则与 AID 一致，两者区别主要是所选择的情绪图片不同。AID 任务（郭婷 等, 2016）的情绪图片来自国际情绪图片库的正负性情绪图片，而 SAID 任务（宋巍, 2019）中自我参照情绪图片来自被试现场采集，他人参照情绪图片来自中国人情绪图片库（Chinese Affective Picture System, CAPS；龚栩 等, 2011）。”

进一步说明，在 AID 任务中，反馈阶段的激励材料为社会性情绪的面孔，选自国际情绪图片库的情绪图片材料，包括积极、中性和消极图片。与此不同的是，SAID 的反馈刺激分别包括他人面孔和自我面孔。其中，他人面孔选自中国情绪面孔图片库（Chinese Affective Picture System, CAPS）中男女平静面孔各一张（龚栩 等, 2011）；自我面孔，现场采集被试正面、左侧面、右侧面三张照片，并使用 FaceGen 软件合成 3D 头像。最后，通过 FaceGen 软件对情绪参数进行设定，分别为积极、消极和中性图片（详见 2.3 实验材料部分）。因此，在本研究中，考虑到抑郁症患者存在自我参照效应，更偏向于加工自身相关负性信息，采用 SAID 范式可以提高诱发和分离心理痛苦不同加工阶段的生态效度，不仅可以对比不同效价的情绪面孔图片作为激励刺激时所诱发的波幅（或能量）差异，还可以对比不同参照条件（自我 vs. 他人）所诱发的波幅（或能量）差异。

意见 2: RFE-SVM 建模流程中, 为什么以 TDPPS 量表中 17 个条目得分为指标需要说明。

回应: 非常感谢并完全接受专家的建议。修改稿中对该问题进行了补充说明 (详见 2.5.3 第 4~6 行), 具体如下:

“鉴于心理痛苦三因素模型并未在大学生群体中采用 LPA 来验证维度划分的科学性, 即人群中是否存在三个维度的不同组合, 以及分类后各维度内条目是否与构想符合。因此, 本研究以 TDPPS 的 17 个条目得分为指标, 确定最优的心理痛苦组合类别。”

意见 3: 本研究采用 SAID 基于多模态数据的抑郁分类模型与以往 AID 的实验研究应有所比较总结。

回应: 非常感谢并完全接受专家的建议。在修改稿中补充了该部分内容 (详见 4.3 部分第 2 段 4~6 行), 具体如下:

“结合以往 AID 任务的研究结果, 在抑郁症患者中, 惩罚条件正反馈诱发的 feedback-P3 波幅与 BDI 呈显著正相关 (Song et al., 2018), 提示抑郁个体不仅存在对奖赏刺激注意缺陷, 还存在对惩罚刺激的注意偏向。”

意见 4: 相关分析表明, 年龄与 BDI 显著负相关 ($r=-0.31$, $p=0.006$), 与 BSI-C、BSI-W、TDPPS 及其分维度得分相关不显著。为什么会出现这样的差异可以进一步研究说明。

回应: 非常感谢专家的建议。修改稿中在讨论部分对此进行补充说明 (详见 4.1 部分第 1~6 行), 具体如下:

“首先, 本研究中年龄与 BSI-C、BSI-W、TDPPS 及其分维度得分相关不显著, 与以往研究一致 (Xie et al., 2014), 提示个体的自杀意念和心理痛苦水平与年龄不存在明显关联。其次, 年龄与抑郁存在显著负正相关, 提示在本研究的 18~25 岁大学生中, 年龄越大, 抑郁水平越低。以往研究发现, 在成年人中, 抑郁与年龄呈显著正相关, 可能的原因是年龄越大, 社会支持和自我管理能力越低, 抑郁水平越高 (Papadopoulos, Papakonstantinou, & Solomou, 2014)。因此, 本研究中抑郁与年龄呈负相关, 可能的解释是与样本特征有关, 两者关系可能存在其他调节变量的影响。”

参考文献

Papadopoulos, K. D, Papakonstantinou, M, A., & Solomou, A. (2014). Social support and depression of adults with visual impairments. *Research in Developmental Disabilities*, 35,

意见 5: 不同自杀意念水平的抑郁大学生心理痛苦的行为学特征可以列图表进行说明 HSI 组的自杀意念和痛苦逃避得分显著高于 LSI 组和 HC 组。

回应: 非常感谢专家的建议。不同自杀意念水平的抑郁大学生心理痛苦的行为学特征在表 1 中呈现,并在结果部分进行文字说明(详见 3.1 部分第 2~4 行)。

意见 6: 不足与展望中提到 EEG-fMRI 技术可同时获取认知加工过程中的时空信息,可更为有效地建构自杀脑病理机制的分类模型,可以总结一下 EEG-fMRI 技术研究自杀意念的已有结果。

回应: 非常感谢并完全接受专家的建议。在修改稿中对 EEG-fMRI 技术研究抑郁和自杀脑机制研究结果进行了总结(详见 4.6 部分第 2 段 1~9 行),具体如下:

“此外,由于 EEG-fMRI 技术可同时获取认知加工过程中的时空信息,有助于理解复杂的神经机制(Cichy & Oliva, 2020),受到越来越多研究者的关注,并将该技术用于抑郁脑机制的探索。一项基于健康被试的研究发现,腹侧纹状体、扣带回中部和额中回皮层的激活与正反馈诱发的 FRN 波幅正相关,而非负反馈(Becker et al., 2014)。提示奖赏诱发的 FRN 波幅与奖赏相关脑区的激活有关。研究者还将 EEG-fMRI 技术用于探索抑郁症患者的脑机制,结果发现,与健康对照组相比,抑郁症患者脑岛、壳核、杏仁核、左背外侧和腹外侧前额叶皮层与默认网络的连接比与任务相关网络的连接更紧密,且两组之间所有的显著差异都出现在 delta 频段上(Knyazev et al., 2018)。然而,目前鲜有研究涉及采用 EEG-fMRI 技术来探索自杀脑机制。未来可研究在心理痛苦三因素模型基础上,通过 SAID 任务下的 EEG-fMRI 指标来提高自杀分类模型的效能。”

参考文献

- Cichy, R. M., & Oliva, A. (2020). A M/EEG-fMRI fusion primer: Resolving human brain responses in space and time. *Neuron*, 107(5), 772–781.
- Becker, M. P., Nitsch, A. M., Miltner, W. H., & Straube, T. (2014). A single-trial estimation of the feedback-related negativity and its relation to BOLD responses in a time-estimation task. *Journal of Neuroscience*, 34(8), 3005–3012.
- Knyazev, G. G., Savostyanov, A. N., Bocharov, A. V., Brak, I. V., Osipov, E. A., Filimonova, E. A., ... Aftanas, L. I. (2018). Task-positive and task-negative networks in major depressive

disorder: A combined fMRI and EEG study. *Journal of Affective Disorders*, 235, 211–219.

审稿人 2 意见：

作者较好地根据反馈意见，进行了文章的修改，回复及修改清晰，故没有进一步的修改意见。

回应：非常感谢审稿专家对文章修改提出的宝贵意见。

编委意见：

文章反映了领域的最新进展，创新性较强。作者很好地回答了审稿专家的问题，条理清晰，逻辑性强。建议发表

主编意见：

该文在方法和研究思路上具有一定的创新性和启发价值，两位审稿人对该文进行评审并提出详尽的意见，作者对审稿人提出的问题进行了回答，并据之对文章进行认真地修改，在这些修改的基础上，论文的质量得到较大的提升，审稿人对当前稿件质量表示满意。总体来看，论文审稿人的审理过程完整细致，整个流程符合规范，修改后的论文质量已达到发表的水平。同意发表。