



OpEN

数据描述符

用于情绪感知和判断的统一人类多模态数据集

赛新[✉], 曹润南, Ueli Rutishauser, 于荣军 & 王硕

面部感知是人类社会互动的一个基本方面，但大多数关于该主题的研究都集中在面部感知的单一模式和特定方面。在这里，我们提出了一个全面的多模态数据集，用于检查面部情绪感知和判断。该数据集包括来自 8 个实验的 97 名独特神经典型参与者的脑电图数据、来自 19 名神经典型参与者的 fMRI 数据、来自 16 名神经外科患者（22 个疗程）的单神经元数据、来自 24 名神经典型参与者的眼动追踪数据、来自 18 名参与者的行为和眼动追踪数据患有自闭症谱系障碍（ASD）和 15 名匹配对照者，以及 3 名患有局灶性双侧杏仁核病变的罕见患者的行为数据。值得注意的是，来自所有模式的参与者都执行了相同的任务。总的来说，这个多模态数据集提供了对面部情绪感知的全面探索，强调了整合多种模态以获得对这一复杂认知过程的整体理解的重要性。该数据集是人类神经影像学和神经生理学文献之间缺失的关键环节，并促进了神经精神病学人群的研究。

背景与总结

面孔是人们在日常生活中看到的最普遍的社交刺激物之一。尽管有大量研究人类面部感知的文献，但大多数研究都集中在使用单峰方法的面部感知的单一方面。为了全面理解面部感知，我们强调了多模式认知神经科学方法对于研究面部感知的重要性。例如，通过结合神经元放电、局部场电位和人类杏仁核的血流动力学活动，可以全面描述对恐惧面孔的反应。在这里，我们提出了一个用于研究情绪感知和判断的多模态数据集。我们数据集的一个关键优势是，所有参与者都执行相同的情绪判断任务（即，两种选择的强制选择任务），并沿恐惧-快乐维度呈现变形面孔的梯度。我们获得了以下行为和神经数据：

- (1) 脑电图 (EEG)：通过一系列 8 项实验获得了 97 名独特神经典型参与者的数据。一个示例结果是晚期正电位 (LPP)，它编码面部情绪模糊性。通过一系列实验，我们详细描述了 LPP 的特征，并表明它与对模糊选择的行为判断特别相关。这一结果与文献一致，表明 LPP 对各种类型的模糊性敏感，包括模糊的面部表情、种族模糊的面孔、社会相关概念、情感图片和刺激不确定性。
- (2) 功能磁共振成像 (fMRI)：获取了 19 名神经典型参与者的数据。示例结果包括针对面部恐惧/快乐程度激活左侧杏仁核，以及针对刺激的类别模糊性激活右侧杏仁核、背内侧前额叶皮层 (dmPFC) 和腹内侧前额叶皮层 (vmPFC)。这些结果与杏仁核在情绪处理，特别是恐惧处理中的作用，以及它在检测中的作用是一致的。

1 东北大学跨学科科学前沿研究所，仙台，980-8578，日本。研究

东北大学电气通信研究所，仙台，980-8577，日本。华盛顿大学放射科，圣路易斯，密苏里州圣路易斯，63110，美国。神经外科和神经内科，Cedars-Sinai 医疗中心，洛杉矶，90048，加利福尼亚州，美国。香港浸会大学管理、市场营销及信息系统系，中国香港。✉电子邮箱：sun.sai.e2@tohoku.ac.jp；shuowang@wustl.edu

模糊的刺激并相应地调节警惕性和注意力。此外，虽然前扣带皮层（ACC）具有功能隔离（详见详情），但其大部分功能涉及以某种形式处理模糊性，这需要冲突解决、持续的行动监控、认知控制的动态调整，并且与置信度成反比。判断（另见 和 模糊刺激的直接结果），与我们的结果一致。

- (3) 单神经元记录：我们有独特的机会直接记录神经外科患者的人脑单神经元活动，这些患者正在接受监测以定位其癫痫发作。通过使用深度电极记录 16 名神经外科患者（总共 22 次），我们发现杏仁核中的神经元参数化地编码面部恐惧/快乐的程度以及刺激的类别模糊性，而 dmPFC 中的神经元编码刺激的绝对模糊性。这些结果与上述fMRI结果一致。
- (4) 眼动追踪：我们从 24 名神经正常的参与者那里获取了眼动追踪数据。可以在任务条件之间比较注视点（例如，模糊程度和面部大小）；和面部感兴趣区域（ROI）已经被勾画出来。此外，我们可以比较自闭症谱系障碍 (ASD) 患者与对照组的眼球运动（见下文）。
- (5) 自闭症谱系障碍 (ASD)：我们从 18 名患有 ASD 的参与者和 15 名匹配的对照者那里获取了行为和眼球追踪数据。我们发现患有自闭症谱系障碍的参与者情绪判断的特异性降低了。对于眼球追踪，与类似的注视模式相比，我们发现患有自闭症谱系障碍的参与者在情绪判断过程中瞳孔振荡减少。这些结果与显示 ASD 情绪识别缺陷的研究一致（参见 参考资料）。
- (6) 杏仁核病变：我们获得了 3 名患有局灶性双侧杏仁核病变的罕见患者的行为数据。我们发现这些患者对恐惧的行为敏感性有所增加。这一结果与其他关于杏仁核损伤的研究一致，这些研究表明情绪识别和判断发生了改变。

有了这个数据集，可以进行进一步的分析来比较不同的参与者组（例如，病变与自闭症）和不同的神经信号（例如，脑电图与功能磁共振成像与单神经元）。该数据集的示例用法包括置信度数据库、解释自闭症行为的单神经元活动的计算建模以及多模式功能连接分析。与其他多模态人脸数据集（例如）一起，我们当前的数据集将有助于更全面地理解人脸感知。

方法

详细方法已在我们之前的研究中描述过。下面，我们概述了我们的方法。

参与者

在这项研究中，我们招募了男女成年参与者。没有根据年龄（仅限成人）、性别、种族或民族来选择参与者。每个实验的样本量是根据先前文献凭经验确定的。尽管我们没有进行正式的功效分析来估计样本量，但考虑到我们之前的结果，我们的数据被认为足以检测任务效果并使用不同的方法进行比较。

在带有恐惧-快乐变形情绪的面部判断任务中，23名神经典型参与者参加了脑电图实验，19名神经典型参与者参加了fMRI实验，24名神经典型参与者参加了眼动追踪实验，16名神经外科患者（22次）参加了单神经元记录实验，18 名患有自闭症谱系障碍 (ASD) 的高功能参与者和 15 名匹配对照者（独立于进行眼动追踪实验的 24 名神经典型参与者；请参阅下面的更多详细信息）参加了眼动追踪实验，并且 3 罕见的双侧杏仁核局灶性病变患者参与了行为实验（详见表1）。此外，16名参与者参加了脑电图控制实验1，并做出了快速反应（1a：情绪判断；1b：性别判断；1c：财富判断），32名参与者参加了调节模糊情境的脑电图控制实验2，11名参与者参加了在脑电图控制实验 3 中，有愤怒-厌恶的情绪变化，15 名参与者参加了脑电图控制实验 4，其中（4a）自由观看和（4b）明确的决定（详细信息参见表 1）。

具体而言，所有 18 名 ASD 参与者均符合 DSM-V/ICD-10 自闭症谱系障碍诊断标准，并符合自闭症诊断观察表 2 (ADOS-2) 模块 4 修订评分系统中 ASD 的截止分数，并且在有知情人的情况下，进行自闭症诊断访谈修订版 (ADI-R) 或社交沟通问卷 (SCQ)。ADOS-2 根据最新算法进行评分，我们还得出了探索性相关分析的严重性评分（社会情感 (SA)：12.1 ± 4.22（平均值 ± SD），限制和重复行为 (RRB)：3.13 ± 1.36，社会情感严重性评分 (CSS SA)：8.00 ± 1.71；限制和重复行为严重性评分 (CSS RRB)：7.13 ± 1.36，社会情感加上限制和重复行为的严重程度评分 (CSS All)：7.88 ± 1.54)。自闭症谱系障碍组的全量表智商 (FSIQ) 为 105 ± 13.3（来自韦克斯勒智力缩写量表-2），平均年龄为 30.8 ± 7.40 岁，平均自闭症谱商 (AQ) 为 29.3 ± 8.28，平均 SRS-2 成人自我报告 (SRS-A-SR) 为 84.6 ± 21.5，平均 Benton 评分为 46.1 ± 3.89（Benton 评分 41-54 属于正常范围）。两名参与者无法获得 ADOS 项目评分，因此我们无法利用修订后的评分系统。但这些人最初的 ADOS 算法分数都符合 ASD 的截止分数。招募 15 名神经和精神健康、无 ASD 家族史的参与者（11 名男性）作为对照。对照组的可比 FSIQ 为 107 ± 8.69（双尾 t 检验，P = 0.74），可比平均年龄为 35.1 ± 11.4 岁（P = 0.20），但 AQ 较低（17.7 ± 4.29，P = 4.62 × 10）和 SRS-A-SR（51.0 ± 30.3，P = 0.0039）如预期。对照组还对性别、种族和教育程度进行了匹配。

实验	刺激	Task	Type	n	Sex (男/女)	Age (平均值±标准差 年)	CR	试炼	Test 地点	语言
主要实验	恐惧快乐变形	恐惧-快乐的审判	EEG	23	6/17	22.4±2.17	N	252 次试验 in 2 块	SCNU	中国人
			fMRI	19	4/15	20.9±2.02	N	168 次试验 in 2 块		
			眼动追踪	24	8/16	22.3±3.39	Y	252 次试验 in 3 块		
			神经外科	16	11/5	42.3±17.0	12Y/4N	176 到 440 次试验 2 至 5 内 块	华润上华& HMH	英语
			ASD	18	15/3	30.8±7.40	11年/7年	252 次试验 in 3 块	CIT	英语
			自闭症控制	15	11/4	35.1±11.4	Y	252 次试验 in 3 块		
			杏仁核病变	3	0/3	36.3±6.35	Y	352次试验 in 4 块	CIT	英语
控制 实验1a	恐惧快乐变形	加速恐惧-快乐 判断	EEG	16	5/11	19.6±0.96	Y	280 次试验 in 2 块	SCNU	中国人
控制 实验1b		加速男-女 (性别) 判断								
控制 实验1c		快速的贫富判断								
控制 实验2	恐惧快乐变形	上下文调制		32	17/15	20.6±1.79	N	320 次试验 in 3 块		
控制 实验3	愤怒-厌恶变形	愤怒-厌恶判断		11	2/9	20.6±2.80	N	252 次试验 in 2 块		
控制 实验4a	恐惧快乐变形	被动观看		15	6/9	20.7±1.61	N	168 次试验 in 1 堵塞		
控制 实验4b	愤怒-厌恶的变形面孔和猫狗 变形动物	明确的决定						252 次试验 in 2 块		

表 1. 实验和参与者摘要。CR：信心等级。华南师范大学：华南师范大学。CSMC：雪松西奈医疗中心。HMH：亨廷顿纪念医院。CIT：加州理工学院。

AP、AM 和 BG 是三位因 Urbach-Wiethe 病而出现选择性双侧杏仁核病变的患者。AM 和 BG 是同卵双胞胎，两者的基底外侧杏仁核均被完全破坏，头侧的前杏仁核和腹侧皮质杏仁部分以及尾侧的中央杏仁核和杏仁海马区的外侧和内侧部分略有保留水平。这些患者的神经心理学评估的细节之前已经描述过。病变的解剖扫描显示在我们之前的报告中。

所有参与者的视力均正常或矫正至正常。参与者根据华南师范大学 (SCNU) 机构审查委员会 (IRB)、亨廷顿纪念医院 (HMH)、雪松-西奈医疗中心 (CSMC) 和加州理工学院 (CIT) 批准的方案提供了书面知情同意书)。

刺激。刺激是恐惧和快乐表情范例之间的表情连续体的变形（示例见图 1a）。四个人（两名女性）是从 STOIC 数据库中选出的，这是一个表达高度可识别情绪的面部图像数据库。面部表情通过计算机算法进行变形；因此，它们不是真实的面孔。对于每个人，我们都选择了明确的恐惧和快乐表情的范例，并使用数据库创建者提供的规范评级数据进行评估。为了生成本实验的变形表达连续体，我们使用手动选择的控制点的 Delaunay 曲面细分上的分段三次样条变换，在恐惧样本脸和快乐样本脸之间插值像素值和位置。我们创建了五个级别的恐惧快乐变形，范围从 30% 恐惧/70% 快乐到 70% 恐惧/30% 快乐，步长为 10%。SHINE 工具箱均衡了低级图像属性（该工具箱具有指定傅立叶振幅谱（旋转平均值）、标准化和缩放平均亮度和对比度以及针对感知视觉质量优化的精确直方图规范的功能）。

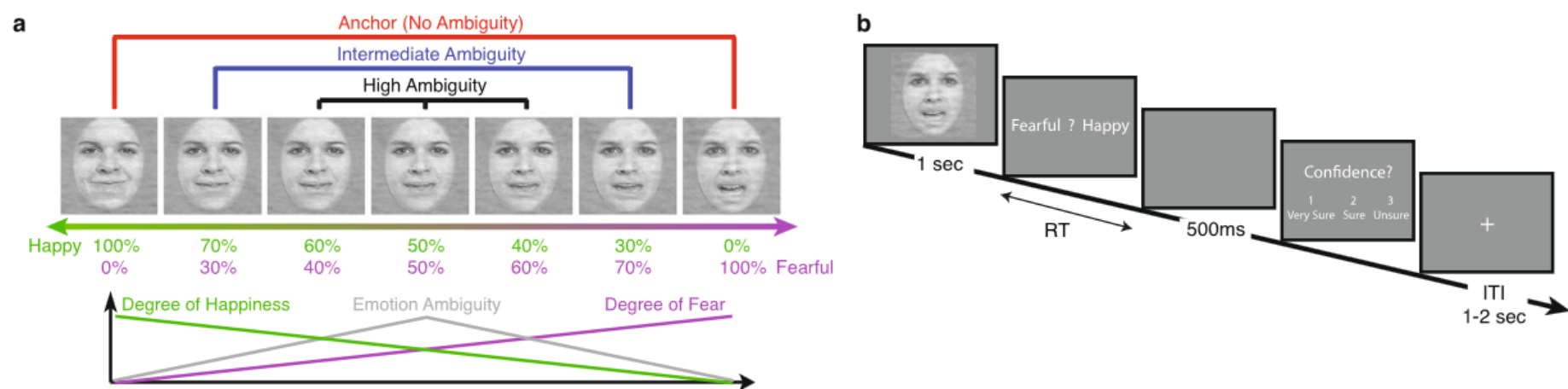


图 1 刺激和任务。(a) 一名女性身份的刺激样本，范围从 0% 恐惧/100% 快乐到 100% 恐惧/0% 快乐。(b) 任务。呈现一张面孔 1 秒，然后提出一个问题，要求参与者识别面部情绪（恐惧或快乐）。在 500 毫秒的空白屏幕后，参与者被要求表明他们对自己决定的信心（“1”代表“非常确定”，“2”代表“确定”，或“3”代表“不确定”）。面孔未按比例显示。

愤怒-厌恶变形是由 FaceGen Modeller (<http://facegen.com/>) 创建的。与恐惧快乐变形类似，我们还选择了 4 个身份（来自 3D 人脸模型的 2 名男性和 2 名女性；两个亚洲人（1 名男性和 1 名女性）和 2 个白人），每个身份有 2 个明确的面孔和 5 个变形级别。变形范围从 30% 愤怒/70% 厌恶到 70% 愤怒/30% 厌恶，步长为 10%。

任务

在恐惧-快乐判断任务中（图 1b），每次试验中，一张脸都会出现 1 秒，然后出现一个问题提示，要求参与者对面部情绪做出最佳猜测。参与者通过按下键盘或响应框上的按钮来报告恐惧或快乐的面孔。刺激抵消后，参与者有 2 秒的时间做出反应，否则试验将中止并放弃。参与者被要求仅在刺激抵消后做出反应。没有显示反馈消息，每个参与者的面孔顺序完全随机。在判断情绪后，参与者被要求通过按下按钮“1”表示“非常确定”，“2”表示“确定”，或“3”表示“不确定”，以表明他们的判断信心。与情绪判断一样，参与者有 2 秒的时间做出反应，然后试验被中止，并且没有显示任何反馈信息。脑电图参与者、功能磁共振成像参与者、7 名实验室内 ASD 参与者和 4 名实验室内 ASD 对照参与者的置信度评级被省略。除 fMRI 参与者的 2-8 秒外，所有参与者的试验间间隔 (ITI) 均随机抖动，均匀分布在 1 至 2 秒之间。

我们对脑电图参与者进行了以下对照实验，每个实验都与上述恐惧-快乐判断任务在刺激或反应上有所不同。表 1 提供了每个实验的摘要，我们在下面的描述中强调了它们的区别。

脑电图控制实验 1 的反应速度很快：参与者被要求尽快做出反应。刺激物一直保留在屏幕上，直到按下按钮。同样，参与者有 2 秒钟的时间做出反应，否则试验将中止并被放弃。值得注意的是，在这项任务中，问题提示要求参与者在刺激之前对面部情绪做出最佳猜测，并持续 500 毫秒。在脑电图控制实验 1a 中，参与者被要求判断恐惧-快乐变形刺激的情绪。在脑电图控制实验 1b 中，参与者被要求判断刺激的性别。这项任务没有任何歧义，因为所有四个面部模型都具有清晰可辨的性别。在脑电图控制实验 1c 中，参与者被要求猜测面部模型的财富（贫穷与富有）。这项任务的模糊性最高，因为在没有任何先验的情况下无法判断面部模型是贫还是富。

EEG 控制实验 2 调节了模糊性背景：参与者仅判断第一块和第三块（各 64 次试验）中的锚定面孔（即明确的面孔），并判断第二块中的锚定面孔和变形面孔（192 次试验）。

脑电图控制实验 3 使用愤怒-厌恶的变形情绪。该任务与恐惧-快乐判断任务相同。

EEG 控制实验 4 调节判断反应/决定。在脑电图控制实验 4a（自由观看）中，参与者被要求自由观看恐惧快乐的变形面孔，而无需按任何按钮。在脑电图控制实验 4b（明确决定）中，参与者被要求使用模糊的愤怒-厌恶变形面孔和猫狗变形动物来区分刺激物是人类还是动物。

脑电图 (EEG)

参与者舒适地坐在灯光昏暗、电磁屏蔽的房间内，距离电脑屏幕前约 1.1 m。实验在 19 英寸的机器上进行。（屏幕尺寸 37.7×30.1 厘米）IBM LCD 显示屏（屏幕分辨率 1280×1024）。使用 E-prime 呈现刺激。根据国际 10-20 系统，使用安装在弹性帽 (NeuroScan 4.5) 中的锡电极，使用数字交流放大器记录 32 个头皮部位的脑电图。从以下部位记录脑电图：额叶：FP1、FP2、F7、F3、Fz、F4、F8；额叶-中央：FC3、FCz、FC4；中央：C3、Cz、C4；中央顶叶：CP3、CPz、CP4；顶叶：P7、P3、Pz、P4、P8；额叶-颞叶-顶叶：FT7、TP7、T7、T8、TP8、FT8；枕骨：O1、Oz、O2。从左眼眶上和眼下电极记录垂直眼图 (VEOG)。水平眼电图 (HEOG) 是通过放置在左眼和右眼外眼角侧面的电极测量的。接地电极放置在额头上。一个参考电极放置在左乳突，另一个放置在右乳突，所有记录均参考右乳突。全部

阻抗保持在5K Ω 以下。EEG和眼电图(EOG)使用0.05–70 Hz带通滤波器进行放大,并以500 Hz的频率对每个通道进行连续采样。在对照实验4中,使用数字交流放大器记录了64个头皮部位的脑电图。

EEG数据使用EEGLABand内部MATLAB函数进行处理。连续脑电图数据重新参考左右外乳突信号的平均值,以避免数据偏向一个半球。使用0.5–30 Hz的数字零相移带通滤波器对数据进行滤波,斜率为24 dB/倍频程。然后将连续EEG数据分为3秒段(相对于刺激开始的–1000至2000毫秒;长周期,用于时频分析)或1秒段(相对于刺激开始的–200至800毫秒;短周期,用于事件相关电位[ERP]分析)。从–400到–200 ms的刺激前间隔用作长时期的基线(与时频分析一致),从–200到0 ms的刺激前间隔用作短时期的基线。通过减去基线期间的平均活动对数据进行基线校正。

使用ERPlab(<http://erpinfo.org/erplab>)的眨眼检测工具排除在片段任何部分出现眨眼的试验,其中在整个过程中检测到超过归一化交叉方差阈值0.7的垂直眼部伪影。纪元。我们拒绝了这些试验,因为眨眼不仅可能改变该试验的感觉输入,而且还会污染脑电图信号,尤其是来自额叶通道的信号。尽管我们没有明确指示参与者在面部呈现期间不要探索面部,但刺激之前的注视交叉可以减少眼球运动和与眼球运动相关的伪影。使用阶梯式伪影检测功能检测并丢弃具有扫视眼球运动的时期,其中在整个时期内以200 ms移动窗口和50 ms增量步长检测到幅度超过70 μ V的水平眼部伪影。此功能适用于检测眼跳运动,这些运动通常由突然的、阶梯状的电压变化组成。在特定的中线电极上使用移动窗口峰峰值伪影检测方法进一步检测剩余的伪影。如果峰峰值电压(最大值和最小值之间的差)超过100 μ V的阈值,则排除该元。使用周围电极的平均电压对不良通道进行插值。值得注意的是,我们使用独立成分分析(ICA)重复了伪影剔除,并且在定性上得出了相同的结果。

在每个参与者中,计算每个变形/模糊水平的平均波形,时间锁定到刺激的开始。随后对单个参与者的平均波形进行平均以获得组级平均波形。在这里,我们根据顶中央(Pz)电极刺激开始后400至700毫秒的时间窗口测量了LPP(整个波形)。重要的是,高模糊性和明确刺激之间的差异波形的头皮形貌在该时间窗口中的Pz处显示出最明显的差异。

功能磁共振成像(fMRI)。

MRI扫描是在华南师范大学使用标准12通道头部线圈系统的3-Tesla Tim Trio 磁共振成像扫描仪(德国西门子)进行的。使用MATLAB和心理物理学工具箱在背投屏幕上向参与者呈现刺激。使用连接到MRI头部线圈的镜子来呈现刺激。全脑数据通过回波平面T2*加权成像(EPI)获取,对血氧水平依赖性(BOLD)信号对比度敏感(31个斜轴切片,3毫米厚;TR = 2000 ms; TE = 30 ms; 翻转角 = 90°; FOV = 224 mm; 体素尺寸: 3 \times 3 \times 3 mm)。以1 \times 1 \times 1 mm的分辨率获取T1加权结构图像。

使用SPM12(www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/)对神经影像数据进行预处理和分析。丢弃前4个体积以使MR信号达到稳态平衡。EPI图像及时进行正弦插值以校正切片时序差异,并通过刚体变换重新对齐到第一次扫描以校正头部运动。利用线性和非线性变换以及半高全宽6 mm的高斯核的平滑,EPI和结构图像被配准到T1 MNI 152模板(蒙特利尔神经学研究所,国际脑图谱联盟)。通过截止时间为128秒的高通时间滤波来消除全局变化,以消除信号中的低频漂移。

我们使用了与事件相关的设计。在一般线性模型(GLM)设计矩阵中,对于每个参与者,我们估计具有自回归阶1[AR(1)]的GLM和以下回归量(R):面部呈现时的R1;面部呈现时的R2由恐惧水平调节:100%、70%、60%、50%、40%、30%、0%;面部呈现的R3由模糊度级别调节:明确、30%/70%变形(中度模糊度)、40–60%变形(高度模糊度);和R4在注视演示中。对于所有GLM分析,将基于SPM重新对齐估计例程的六个头部运动回归量添加到模型中(与每次扫描的第一个切片对齐)。然后运行多重线性回归来生成每个体素的每个回归器的参数估计。将第一级分析的对比(β 值差异)图像输入到使用随机效应统计模型进行的第二级组分析的单样本t检验中。

单神经元记录。

我们从药物难治性癫痫患者的杏仁核和dmPFC(包括背侧前扣带皮层[dACC]和前补充运动区[pre-SMA])中植入深度电极进行双侧记录。使用植入后结构MRI验证目标位置。在每个部位,我们记录了插入临床电极的八根40 μ m微丝,如前所述。使用八根微丝之一作为参考,以32 kHz采样并连续存储双极宽带录音(0.1–9 kHz),以便使用Neuralynx系统(Digital Cheetah; Neuralynx, Inc.)进行离线分析。使用零相位滞后300–3 kHz带通滤波器对原始信号进行滤波,并使用半自动模板匹配算法对尖峰进行排序。仔细分离单元并定量评估穗分选质量。

为了分析单个神经元的反应，我们只考虑平均放电率至少为 0.2 Hz 的单个单元（整个任务）。试验根据面部发作进行调整，并在面部发作之前以 1 秒的空白屏幕间隔计算基线放电率。为了选择与情绪模糊程度显着逐次试验相关的神经元，我们根据刺激开始后 250 毫秒开始的 1.5 秒窗口中的尖峰数量量化每个神经元的反应。周刺激时间直方图 (PSTH) 通过计算连续 250 ms 区间内试验的峰值来计算。PSTH 中的变形/模糊度水平之间的比较是使用 $P < 0.05$ 的单向方差分析和 Bonferroni 校正来进行跨箱的多重比较。

眼球追踪。

在华南师范大学针对神经典型参与者进行的眼动追踪实验中（表 1），我们使用了两个眼动追踪系统。使用头部支撑的非侵入式红外 EyeLink 1000 系统（SR Research）对 14 名参与者进行了记录。使用 MATLAB 和心理物理学工具箱呈现刺激。其中一只眼睛的追踪频率为 1000 Hz。参与者坐在一间光线昏暗、声音衰减的房间内，距离电脑屏幕 60 厘米。实验在 20 英寸（40 × 30 厘米屏幕尺寸）联想 CRT 显示器（1024 × 768 屏幕分辨率）上进行。在每个块的开始处使用内置的 9 点网格方法对眼动仪进行校准。使用 EyeLink 眼动追踪系统附带的软件进行注视提取。扫视检测需要 $>0.1^\circ$ 的偏转，最小速度为 $30^\circ/\text{s}$ ，最小加速度为 $8000^\circ/\text{s}$ 。注视被定义为扫视的补充，即没有扫视的时期，并且注视位置是使用 EyeLink 事件解析器确定的。使用远程无创红外 Tobii T120 系统对 10 名健康参与者进行记录，该系统以 120 Hz 的频率记录双眼注视。使用 Matlab 和心理物理学工具箱呈现刺激。使用 Tobii 可视化软件（Tobii Studio 2.2）记录眼球运动并进行注视分析。由 Tobii Studio 中实现的 Tobii Fixation Filter 检测注视。Tobii Fixation Filter 是 Olsson 提出的一种分类算法，使用滑动窗口平均方法检测注视点的快速变化。在我们的研究中，速度阈值设置为 35 像素/样本，距离阈值设置为 35 像素。

在 CIT 进行的专注于研究自闭症谱系障碍 (ASD) 的眼动追踪实验中（表 1），使用非侵入式红外远程 Tobii TX300 系统记录了 18 名患有自闭症谱系障碍的参与者和 15 名匹配的对照组，该系统能够记录眼球运动和瞳孔大小以及视觉注视检测（滑动窗口平均法；速度阈值 = 35 像素/样本）。我们排除了仅跟踪一只眼睛的所有试验，这表明头部转动可能会因环境光暴露而引入误差。Tobii Studio 检测到眨眼并标记为缺失数据，因此我们从分析中排除了所有眨眼。

为了定量比较面部某些部位的注视特性，我们定义了三个感兴趣区域 (ROI)：眼睛、嘴巴和中心。每个 ROI 都是一个矩形，眼睛和嘴巴的 ROI 大小相同。为了计算注视密度图，使用标准差为 10 像素的 40 像素 2D 高斯核对注视位置进行平滑处理。注视密度图表示注视给定位置（以任意单位）的概率，该概率是根据注视的数量和持续时间计算的，并确保每个参与者的贡献相等以及参与者之间的统计独立性。计算每个参与者和整个刺激期间每个变形水平的 ROI 内的平均注视密度。然后进行统计比较，以比较恐惧/模糊程度之间的平均注视密度、总注视持续时间、平均注视持续时间、注视次数百分比以及首次注视落入 ROI 的潜伏期是否存在差异。每个投资回报率。

数据记录

根据数据格式和实验情况，将数据和代码整理在不同的目录中。变量的详细说明以及数据和代码的使用可以在相应的“README.txt”中找到。

每个数据目录中都有一个 docx 文件。

刺激。

本研究使用的刺激存储在“/01 Stimuli/”目录中。此外，来自华南师范大学的 10 名参与者组成的独立小组提供了恐惧-快乐刺激的效价和唤醒评级。每张脸都按照从 1 到 10 的等级进行五次评分。对于效价，参与者被要求对面部所表现出的情绪的愉快程度进行评分，1 代表“非常不愉快”，10 代表“非常愉快”。对于唤醒/强度，参与者被要求对面部所表现出的情绪的强度进行评分，1 代表“非常温和/平静”，10 代表“非常强烈/兴奋”。每个参与者的原始行为数据存储在相应的“.DAT”文件中，其中“v_”代表效价评级，“a_”代表唤醒评级。此外，评级的组摘要存储在文件“FaceRatingSummary.xlsx”中。

行为数据。

所有参与者的行为数据（EEG、fMRI、眼动追踪、ASD、ASD 匹配对照、单神经元、病变）都存储在“/02 行为数据和代码/”目录中的“behaviorData.mat”文件中。结构体数组的每个元素对应于一个特定的参与者。七个恐惧级别的代码（范围从最恐惧的 1 到最快乐的 7）存储在字段“codeL”中。人脸身份的代码存储在“codeI”字段中。按钮按下响应，其中 1 代表恐惧响应，2 代表快乐响应，存储在“vResp”字段中。响应时间被记录并存储在“RT”字段中。置信度评级存储在“vCR”字段中。置信度评级的响应时间存储在“RT_CR”字段中。值得注意的是，脑电图和功能磁共振成像参与者以及 ASD、ASD 对照和单神经元参与者的子集没有提供置信度评级。

脑电图数据。

预处理后的脑电数据和代码存放在“/03 EEG Data and Code/”目录下。使用长周期（相对于刺激开始的 1000 至 2000 毫秒）进行伪影抑制后的 EEG 数据存储在文件“Data_FearHappy_LongEpoch.zip”中。长历元更适合时频分析。

此外，使用短历元（相对于刺激开始的 200 至 800 毫秒）进行伪影拒绝后的 EEG 数据存储在文件“Data_FearHappy_ShortEpoch.zip”中。短纪元更适合 ERP 分析。在这里，我们根据顶中央 (Pz) 电极刺激开始后 400 至 700 ms 的时间窗口来关注 LPP，因为高模糊性和明确刺激之间的差异波形的头皮地形在 Pz 处显示出最明显的差异在这个时间窗口内。对于长历元数据，可以通过运行脚本“LPP_plots_3levels_ambiguity_longepoch.m”，对于短历元数据，可以通过运行脚本“LPP_plots_3levels_ambiguity_shortepoch.m”来获得三个模糊度级别的LPP波形。LPP 的平均振幅和峰值振幅分别存储在文件“LPP_long.mat”和“LPP_short.mat”中。可以使用脚本“LPP_bars_longepoch.m”和“LPP_bars_shortepoch.m”绘制三个模糊度级别的平均值和峰值幅度，它们分别加载文件“LPP_long.mat”和“LPP_short.mat”。此外，可以使用脚本“N170_plots_3levels_ambiguity_shortepoch.m”对 N170 组件执行类似的分析。对照实验的数据和代码以类似的格式存储在单一目录中。每个对照实验都存储在单独的 zip 文件中。

功能磁共振成像数据。

预处理后的 fMRI 数据存储在“/04 fMRI Data and Code/”目录中的两个文件中：“sub1-10.zip”和“sub11-19.zip”。文件“onsets.zip”包含为参数化设计提取刺激起始点所需的所有行为数据和代码。脚本“step1_firstlevel_model_face_fear_ambiguity3.m”为每个参与者生成第一级参数模型。脚本“step2_firstlevel_contrasts_face_para3.m”为每个参与者生成第一级对比度。脚本“step3_secondlevel_model_face_para3.m”生成第二级（组平均值）对比度。文件“rfx_face_emotion_para3.zip”包含所有组平均对比度。这些步骤是使用 MATLAB 中的 SPM12 执行的。文件“大脑激活”。docx’ 记录了激活的大脑区域的所有坐标。

单神经元数据。

来自杏仁核和 MFC 的单神经元数据分别存储在“/05 Single-neuron Recordings Data and Code/”目录中的文件“FiringRate_Amygdala.mat”和“FiringRate_MFC.mat”中。每个神经元在不同时间窗口内估计的放电率存储在变量“FR”中。对于每个神经元，时间戳（以μs为单位）、会话ID、通道ID、簇ID和记录大脑区域存储在变量'timestampsOfCellAll'、'vCell'、'vCh'、'vClusterID'和'areaCell'中，分别（注意这些变量都是匹配的）。“sessions”包含与“vCell”中的索引相对应的会话标识符。变量“beh”存储每个记录会话的行为（与上面“行为数据”部分中描述的格式相同），变量“sessions”存储详细的参与者信息。文件“plotRastersEachCell.m”提供了给定神经元的光栅图的演示。文件“plotGroupPSTH.m”提供了组 PSTH 的演示和组平均值的点图。

眼动追踪数据。

眼动追踪数据存储在文件“/06 Eye-tracking Data”和“Code/ET_Data_All”中。每次试验的眼动追踪数据都与图像坐标对齐，然后提取并以矩阵格式存储在变量“EM”中。在每个矩阵中，每行代表一次注视，随后的眼跳和列（总共 28 列）代表以下属性：1—试验索引，2—注视索引，3—水平方向的注视坐标（与图像对齐）坐标，4—垂直方向的注视坐标，5—注视开始时间（以毫秒为单位，相对于图像开始），6—注视结束时间，7—刺激类型（这里我们只包含类型“1”，表示恐惧-快乐变形），8—注视点所在的 ROI，9—每个 ROI 中注视的顺序，10—空（未使用），11—空（未使用），12—注视持续时间，13—眼跳指数，14—水平方向扫视起始位置，15—垂直方向扫视起始位置，16—水平方向扫视结束位置，17—垂直方向扫视结束位置，18—扫视开始时间，19—扫视结束时间，20—扫视持续时间，21—扫视距离（以视角为单位），22—扫视峰值速度（以每秒视觉度为单位），23—扫视起始 ROI（1：眼睛，2：嘴，3：鼻子，0：其他），24—扫视结束 ROI，25—在该 ROI 中开始位置的扫视序列（例如，“2”表示本次试验中的第二次扫视，在该 ROI 中开始位置），26—在该 ROI 中结束位置的扫视序列顺序该 ROI，以及 27——扫视方向（例如，数字“12”表示从眼睛到嘴部的扫视；请注意，此处使用数字 4 而不是 0 来表示其他部分）。请注意，使用 Tobii 眼动仪记录的数据没有可用的扫视信息。此外，变量“vSub”表示参与者类别，变量“beh”存储行为（与上面“行为数据”部分中描述的格式相同），变量“sessions”存储详细的参与者信息。值得注意的是，所有这些变量都对应于“EM”。此外，变量“ROI_E”、“ROI_M”和“ROI_C”分别表示眼睛、嘴巴和中心的 ROI 坐标。文件“analyzeFixationDensityDemo”绘制了每个参与者组的注视密度图，文件“analyzeFixationAttributesDemo”绘制了每个 ROI 的注视次数百分比、总注视持续时间、平均注视持续时间和首次注视延迟。文件“analyzeFixationAttributesDemo”还演示了参与者组之间、跨变形/刺激级别以及跨模糊级别的比较。

技术验证

行为。

我们首先评估了行为数据的质量，并证明可以从参与者的选择中得出平滑的心理测量曲线。此外，我们还表明，反应时间（RT）和参与者对其决策的信心根据刺激的不同而变化。对于每个参与者，我们将行为量化为被确定为恐惧的试验的比例，作为形态水平的函数（图2a）。我们发现，对于所有参与者组来说，将面部识别为恐惧的可能性与变形面部的恐惧之间存在单调递增关系（图 2a；请注意，这里我们使用 EEG、fMRI 和眼动追踪参与者举例说明了结果，但我们对所有其他的都得出类似的结果

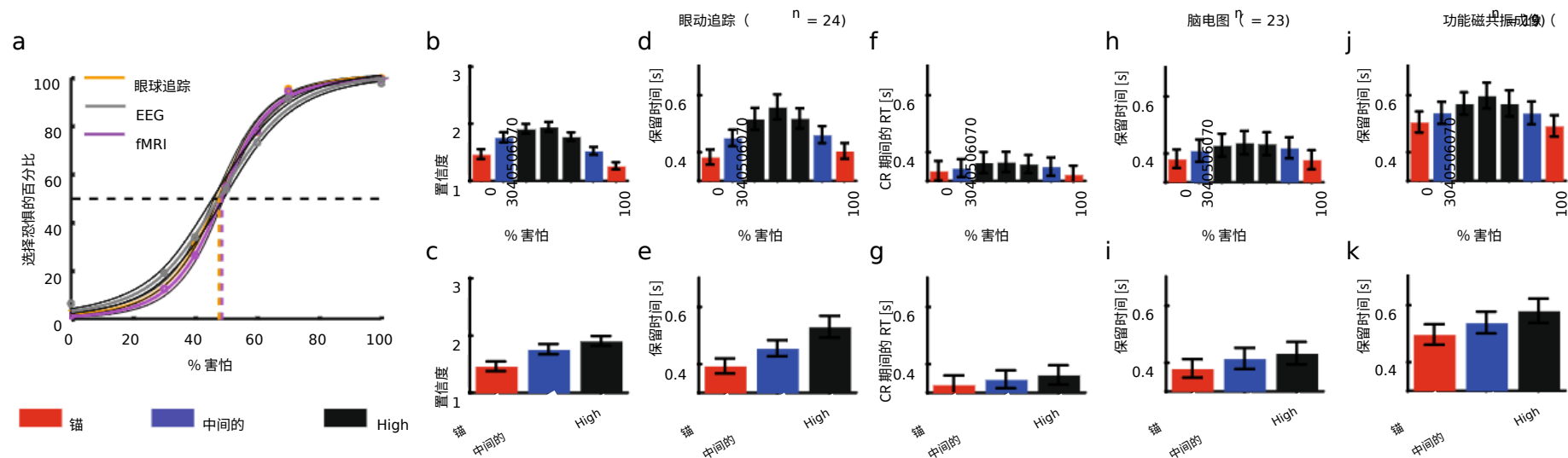


图 2 行为结果。(a) 心理测量曲线的组平均值。我们拟合了逻辑函数以获得平滑的心理测量曲线。阴影面积表示参与者的±SEM。(b) 置信度 (CR) 作为恐惧程度的函数。(c) 作为模糊度函数的置信度评级。(d,h,j) 恐惧/快乐决定的反应时间 (RT) 作为恐惧水平的函数。(e,i,k) RT 作为模糊级别的函数。(f) 置信度评估期间的 RT 作为恐惧水平的函数。(g) 置信度评级期间的 RT 作为模糊度的函数。误差线表示参与者的±SEM。

参与团体；另请注意，患有自闭症谱系障碍的参与者的心理测量曲线更平坦，而杏仁核病变患者的心理测量曲线发生了变化）。

我们发现，与每个参与者组的模糊面孔相比，锚面孔（即明确的面孔）的 RT 更快（变形水平的单向重复测量方差分析；眼动追踪 [图 2d]： $F(6,138) = 19.0$, $P < 0.001$, $\eta = 0.45$ ； EEG [图 2h]： $F(6,132) = 5.14$, $P < 0.001$, $\eta = 0.19$ ； fMRI [图 2j]： $F(6,102) = 8.71$, $P < 0.001$, $\eta = 0.33$ ）。当将所有试验分为三个模糊级别时，每组参与者显示锚定面孔（无模糊性）的最短 RT 和高模糊性面孔的最长 RT（模糊性水平的单向重复测量方差分析；眼动追踪 [图 1]。 2e]： $F(2,46) = 31.7$, $P < 0.001$, $\eta = 0.58$ ； EEG [图 2i]： $F(2,44) = 11.0$, $P < 0.001$, $\eta = 0.33$ ； $F(2,36) = 11.3$, $P < 0.001$, $\eta = 0.39$ ）。

眼动追踪参与者在报告一张脸感到恐惧或高兴后，报告了他们对自己决定的信心。他们报告说，与模糊面孔相比，锚面孔的置信度明显更高（变形水平的单向重复测量方差分析： $F(6,138) = 42.0$, $P < 0.001$, $\eta = 0.65$ ；图 2b；单向重复-测量模糊度水平的方差分析： $F(2,46) = 72.6$, $P < 0.001$, $\eta = 0.76$ ；图 2c）。置信度评级期间的 RT 作为模糊度水平的函数略有变化（变形水平的单向重复测量方差分析： $F(6,138) = 2.17$, $P = 0.094$, $\eta = 0.086$ ；图 2f；单向重复测量方差分析模糊度等级： $F(2,46) = 3.72$, $P = 0.046$, $\eta = 0.139$ ；图 2g）。

EEG.

接下来我们评估了每个实验的脑电图数据的质量。具体来说，我们通过实验验证了 LPP 是情感模糊决策的重要指标。

- (1) 在恐惧-快乐判断任务中（图3a），我们发现LPP与刺激的模糊程度呈现出参数关系。我们的结果通过平均 LPP 幅度（模糊度水平的单向重复测量方差分析， $F(2,44) = 11.1$, $P = 1.27 \times 10^{-3}$, $\eta = 0.34$ ）得到进一步证实，事后 t 检验显示锚点（ $5.56 \pm 1.87 \mu\text{V}$ ；平均值 ± SD）和中间模糊度（ $4.45 \pm 1.36 \mu\text{V}$ ；配对双尾 t 检验， $t(22) = 3.17$, $P = 0.004$, Cohen's $d = 0.66$ ）之间存在显著差异，并且中模糊度和高模糊度之间的边际差异（ $4.05 \pm 1.42 \mu\text{V}$ ； $t(22) = 1.73$, $P = 0.098$, $d = 0.36$ ）。除了 LPP 之外，我们还在电极 TP7 和 TP8 中观察到 N170 成分对情绪面部图像的反应。然而，N170 对不同程度的情感模糊性（ $F(2,44) = 0.406$, $P = 0.669$, $\eta = 0.018$ ）或效应（ $F(2,44) = 0.659$, $P = 0.522$, $\eta = 0.029$ ）不敏感。）。
- (2) 在控制实验 1a（任务的全速版本；图 3b）中，我们复制了恐惧-快乐判断任务中的结果： LPP 幅度可以指示情绪模糊程度。我们的结果得到了平均 LPP 幅度的证实（ $F(2,30) = 48.0$, $P = 4.48 \times 10^{-5}$, $\eta = 0.76$ ）。
- (3) 在控制实验1b（加速性别判断任务；图3c）中，虽然LPP仍然可以区分刺激模糊性的水平（ $F(2,30) = 8.48$, $P = 0.0012$, $\eta = 0.36$ ），但刺激模糊性的编码为与情绪判断任务相比相对较弱。
- (4) 在控制实验 1c（快速财富判断任务；图 3d）中，我们发现 LPP 可以区分刺激模糊程度（ $F(2,30) = 33.3$, $P = 2.41 \times 10^{-5}$, $\eta = 0.69$ ）。
- (5) 在控制实验2（上下文调制；图3e）中，我们设计了一个3块实验：在第一个块中，参与者仅判断明确的面孔；在第一个块中，参与者仅判断明确的面孔；在第二个区块中，参与者对明确的面孔和变形的面孔进行判断；在第三个区块中，参与者再次只判断明确的面孔。在第二个块中，我们仍然观察到一个独特的 LPP，它区分了歧义程度。然而，当没有模糊试验时，与明确面孔相关的 LPP 在第一和第三块中要弱得多。这表明模糊刺激的背景影响了 LPP 的调节。通过事后 t 检验分析平均 LPP 幅度揭示了第一个和第二个块中明确面孔之间的显著差异（配对双尾 t 检验， $t(31) = 3.01$, $P = 0.0052$, $d = 0.55$ ），

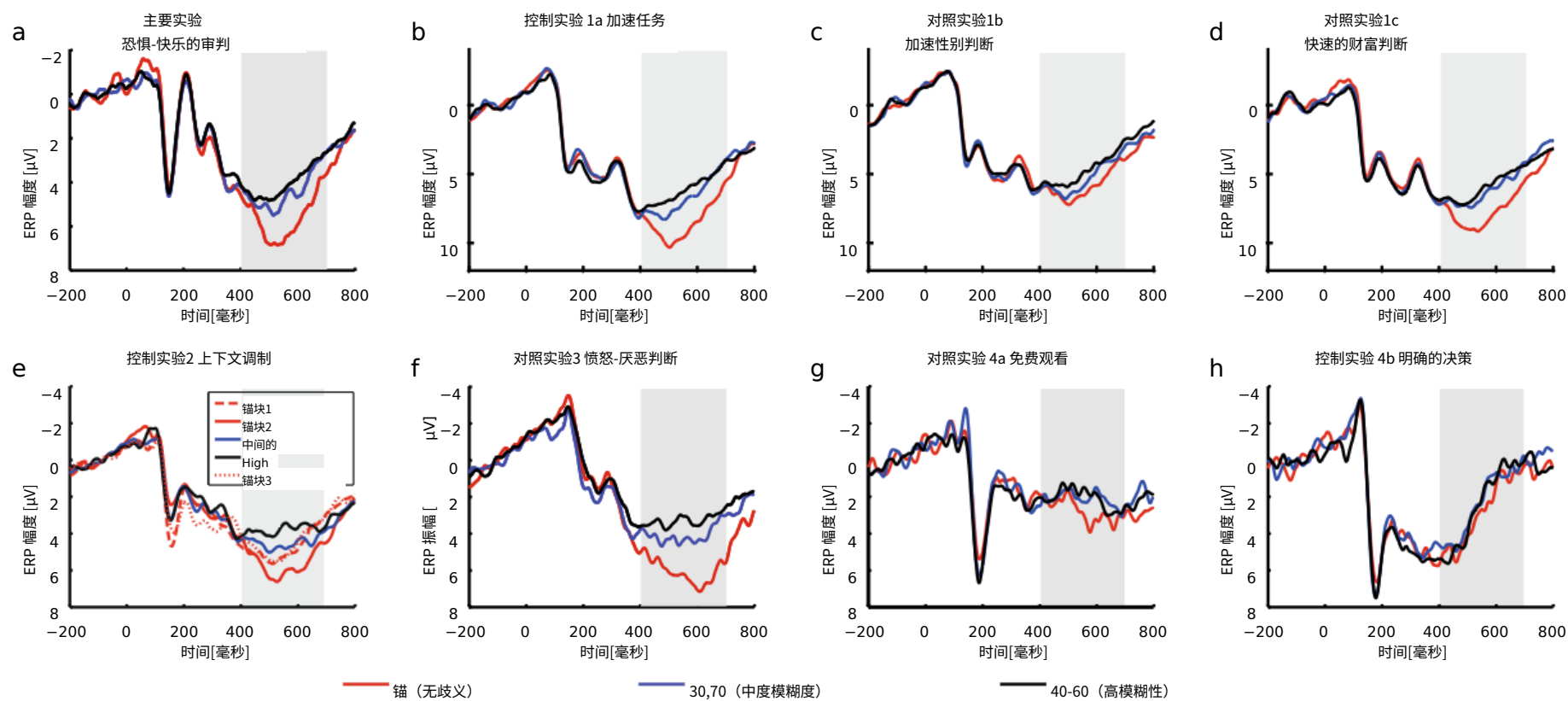


图3 脑电图结果。我们绘制了电极 Pz 处的事件相关电位 (ERP) 作为模糊度水平的函数。灰色阴影区域表示 LPP。(a) 恐惧快乐判断任务。(b) 控制实验 1a：加速任务。在加速任务中也得出了类似的 LPP 结果。(c) 对照实验 1b：带有性别判断的加速任务。LPP 仍然可以区分刺激措施的模糊程度，但程度较小。(d) 控制实验 1c：带有财富判断的加速任务。LPP 可以区分刺激模糊性的程度。(e) 控制实验 2：上下文调制。LPP 不仅受到模糊程度的调节，还受到模糊刺激的背景的调节。(f) 控制实验3：愤怒-厌恶判断任务。愤怒-厌恶的变形面孔会引发类似的 LPP 信号来应对模糊性。(g) 对照实验 4a：自由观看刺激。当参与者自由地观察面孔而不判断情绪时，LPP 就被废除了。(h) 对照实验 4b：做出明确决定的判断。当参与者判断刺激是人脸还是动物（刺激的明确方面）时，LPP 被废除。

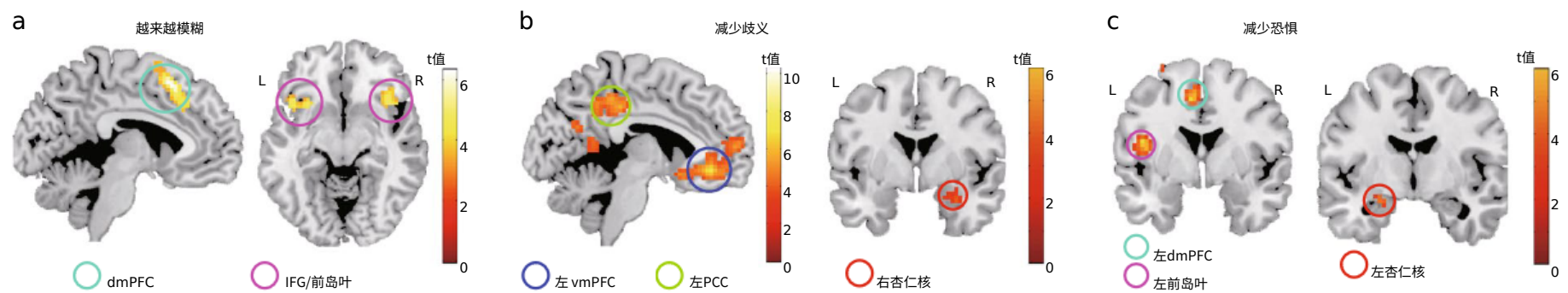


图4 功能磁共振成像结果。(a) 模糊性的增加与双侧背内侧前额叶皮质 (dmPFC) 和额下回 (IFG)/前岛叶 BOLD 活动的增加相关。生成的统计参数图叠加在标准化 MNI T1 加权大脑模板的解剖切片上。左：左。答：对。(b) 模糊性的减少与右侧杏仁核、左侧腹内侧前额叶皮层 (vmPFC) 和后扣带皮层 (PCC) 的 BOLD 活动增加相关。(c) 恐惧的减少与左杏仁核、左 dmPFC 和左岛叶 BOLD 活动的增加相关。

- 以及第二和第三块之间 ($t(31) = 3.05$, $P = 0.0046$, $d = 0.55$)。然而，第一块和第三块之间的明确面孔没有显著差异 ($t(31) = 0.39$, $P = 0.70$, $d = 0.07$)，这表明第二块中的模糊刺激的影响是短暂的并且没有影响。结转到第三块。值得注意的是，第二个块中的平均 LPP 幅度根据不同的模糊程度而变化 ($F(2,62) = 21.27$, $P = 9.22 \times 10^{-6}$, $\eta^2 = 0.407$)。因此，LPP 不仅受到模糊程度的影响，而且还受到模糊刺激的背景的影响。
- (6) 在控制实验 3 (愤怒-厌恶情绪; 图 3f) 中，我们获得了与恐惧-快乐判断任务类似的 LPP 结果。这一观察结果得到了平均 LPP 幅度的证实 ($F(2,20) = 10.59$, $P = 0.001$, $\eta^2 = 0.51$)。
 - (7) 在控制实验 4a (被动观看; 图 3g) 中，参与者被动地观看面部，而不对面部情绪做出任何决定。我们甚至没有发现 LPP，并且使用平均幅度 ($F(2,28) = 0.63$, $P = 0.54$, $\eta^2 = 0.04$) 确认模糊度水平的 LPP 区间没有显著差异。
 - (8) 在控制实验 4b (明确的决定; 图 3h) 中，参与者判断刺激物是人脸还是动物。尽管面部和动物刺激都是模糊的，但对动物或人类面部的决定/判断是确定的。同样，对于两种类型的刺激，我们都没有发现 LPP，并且使用平均振幅 ($F(2,28) = 0.45$, $P = 0.64$, $\eta^2 = 0.03$) 确认模糊度水平的 LPP 区间没有显著差异。

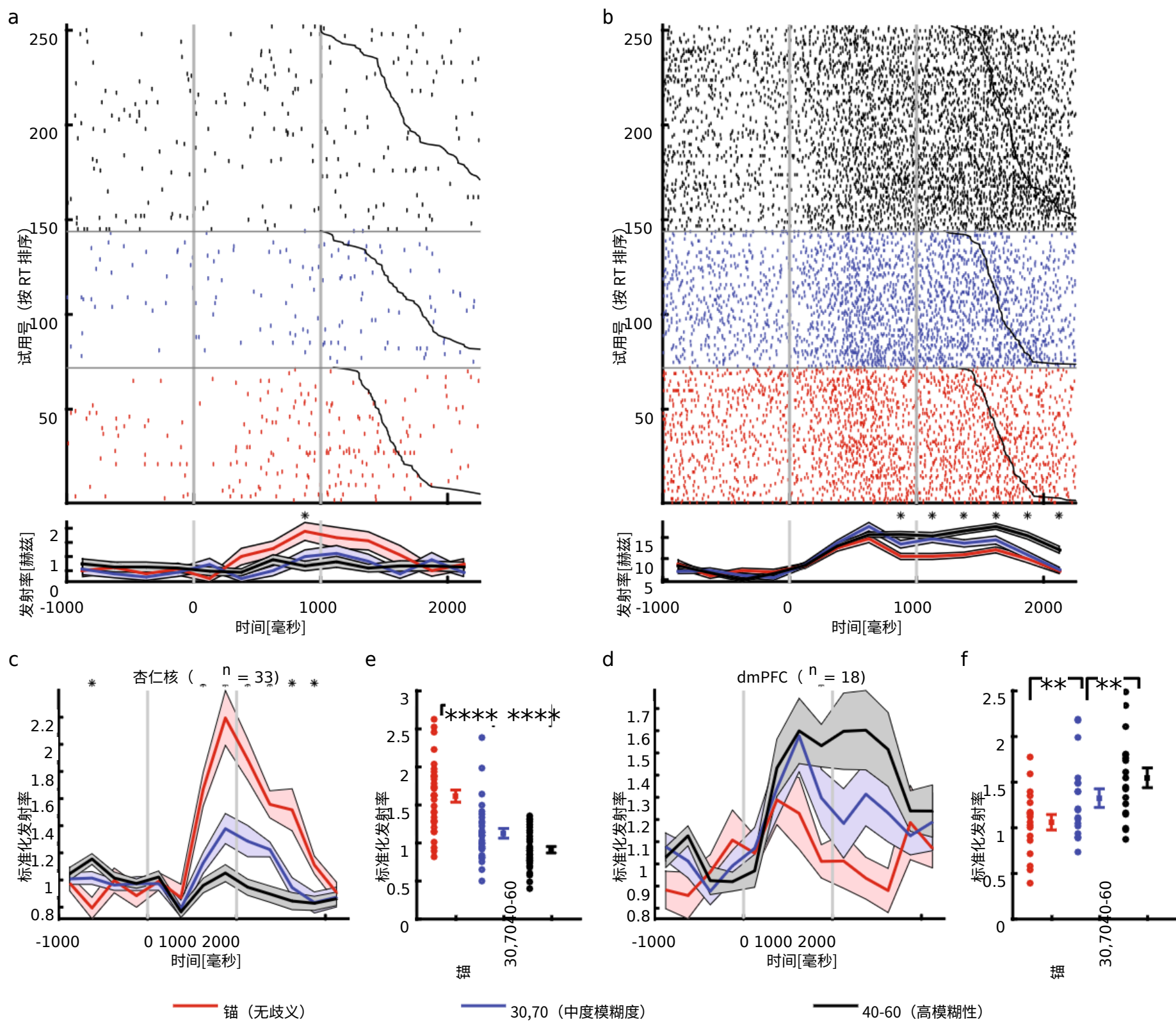


图 5 单神经元结果。(a) 一个杏仁核神经元示例，它对明确的面孔激发最多，对最模糊的面孔激发最少（线性回归： $P < 0.05$ ）。(b) 背内侧前额叶皮层 (dmPFC) 神经元示例，它对最模糊的面孔激发最多，对明确的面孔激发最少（线性回归： $P < 0.05$ ）。栅格（顶部）和 PSTH（底部）根据指示的模糊度级别进行颜色编码。试验与面部刺激开始（左侧灰条，固定 1 秒持续时间）对齐，并按反应时间（黑线）排序。PSTH bin 大小为 250 毫秒。阴影面积和误差线表示各试验的 \pm SEM。星号表示该箱中的条件之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ，单向方差分析，Bonferroni 校正）。(c, d) 模糊编码神经元的平均标准化放电率。星号表示该箱中的条件之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ，单向方差分析，Bonferroni 校正）。(e, f) 模糊水平下的平均标准化发射率。每个模糊度级别显示每个单元的归一化发射率（左）和各个单元的平均值 \pm SEM（右）。平均放电率是在刺激开始后 250 至 1750 毫秒的时间窗口（与神经元选择相同的时间窗口）内计算的。星号表示使用配对双尾 t 检验的条件之间存在显著差异。 $**P < 0.01$ 和 $****P < 0.0001$ 。(c, e) 杏仁核中的神经元增加了对最不模糊的面孔的放电率 ($n = 33$)。 (d, f) dmPFC 中的神经元增加了对最模糊面孔的放电率 ($n = 18$)。

值得注意的是，在一些实验中，基线活动有所增加，这可能是由于对刺激的预期。然而，考虑到 LPP 的时间窗口，基线中的这种斜坡活动不太可能影响我们对结果的解释。特别是，我们观察到基线条件下没有显著差异。

功能磁共振成像。

接下来我们验证了功能磁共振成像数据。我们证明了以下 BOLD-fMRI 激活：(1) 双侧额下回 (IFG) /前岛叶和背内侧前额皮质 (dmPFC) /背侧前扣带皮层 (dACC) 中 BOLD 信号显著增加，作为情绪模糊性增加 (图4a)，(2) 右侧杏仁核、左腹侧ACC (vACC)、后扣带皮层 (PCC)、背外侧前额叶皮层 (dlPFC)、顶下小叶 (IPL) 的BOLD信号显著增加，以及右后中央

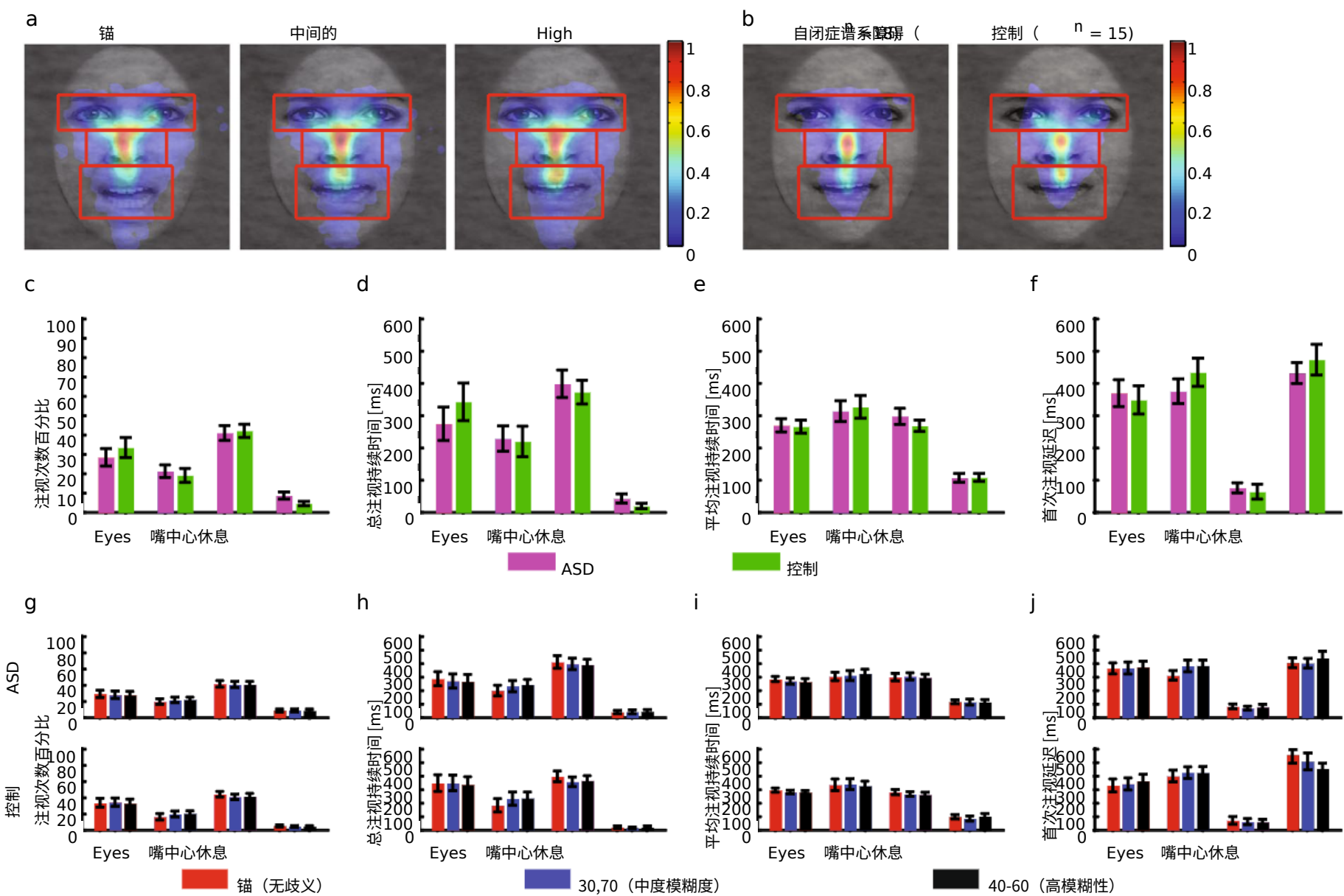


图 6 眼动追踪结果。(a) 注视密度图，用于量化每个模糊级别的眼球运动。(b) 凝视密度图，用于量化自闭症谱系障碍 (ASD) 参与者和匹配对照的眼球运动。每张图都显示了刺激开始后 1 秒内固定给定位置的概率。用于分析的 ROI (眼睛、嘴巴、中心) 显示为红色 (未向参与者显示)。(c-f) 患有自闭症谱系障碍 (ASD) 的参与者与匹配对照者之间的比较。(g-j) 每个参与者组的歧义水平比较 (上行: ASD; 下行: 对照)。(c,g) 每个 ROI 中注视次数的百分比。(d,h) 每个 ROI 中的总注视持续时间。(e,i) 每个 ROI 的平均注视持续时间。(f,j) 第一次注视每个 ROI 的延迟。误差线表示参与者的 \pm SEM。

脑回作为降低情绪模糊性的函数 (图 4b)，以及 (3) 左杏仁核、dmPFC 和岛叶中 BOLD 信号的显着增加作为降低恐惧强度的函数 (图 4c)。总之，我们的数据揭示了编码情绪模糊性和恐惧强度的大脑区域网络。

单神经元记录。

我们记录了杏仁核中的 321 个神经元 (21 个会话) 和 dmPFC 中的 236 个神经元 (15 个会话; 总体放电率大于 0.2 Hz)。为了验证我们的数据，我们证明杏仁核和 dmPFC 神经元的反应受到情绪模糊程度的调节。具体来说，我们使用线性回归来识别神经元，其放电率与三个情绪模糊性水平逐次试验相关。我们发现 36 个杏仁核神经元 (11.2%; 二项式 $P = 2.58 \times 10^{-5}$; 参见图 5a 为示例，图 5c、e 为组结果) 和 29 个 dmPFC 神经元 (12.3%; 二项式 $P = 3.09 \times 10^{-5}$; 参见图 5)。图 5b 为示例，图 5d,f 为组结果)，显示出显着的逐项试验相关性。总之，我们的数据揭示了杏仁核和 dmPFC 中编码情绪模糊程度的神经元。

眼球追踪。

我们最后验证了眼动追踪数据。我们证明了不同模糊度水平之间无法区分的注视密度 (图 6a)，其中参与者注视眼睛 (模糊度水平的单向重复测量方差分析， $P = 0.91$)、嘴 ($P = 0.62$) 和中心的可能性相同。ROI ($P = 0.95$)，表明参与者以相似的方式看待面孔，无论面孔是否模糊。此外，我们发现患有 ASD 的人与匹配的对照组有相似的注视模式 (图 6b)。每个 ROI 的相似百分比的注视次数 (图 6c)、总注视持续时间 (图 6d)、平均注视持续时间 (图 6e) 和首次注视潜伏期 (图 6f) 进一步证实了这些结果。对于每个 ROI 和参与者组来说，这些注视属性在模糊性水平上是相似的 (图 6g-j)。

使用说明

用于分析每种数据模态的代码位于相应的单独目录中，以及详细的“README”文件。通过按照指定的顺序运行脚本 (在每个“README”文件中描述)，可以获得存储在“输出图形”文件夹中的相同图形。

代码可用性

源代码作为数据集的一部分包含在内。所有代码均使用 MATLAB (MathWorks Inc.) 实现

收稿日期：2023 年 7 月 7 日；接受日期：2023 年 10 月 26 日；发布时间：November 2023

参考

1. Yu, H., Lin, C., Sun, S., Cao, R., Kar, K. & Wang, S. 情感面孔处理和面孔社会特质判断的多模态研究。纽约科学院年鉴。 （正在印刷中）。

2. 费德勒, T.等人。人类杏仁核响应厌恶动态视觉刺激的神经元放电、局部场电位和血流动力学活动之间的关系。神经影像。 213、116705, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116705> (2020) 。

3. 孙, S.等人。决策模糊性是由源自扣带皮层的晚期正电位介导的。神经影像。 157, 400–14, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.06.003> (2017)。

4. Sun, S., Yu, R. & Wang, S. 感知模糊下的神经签名编码决策。经济。 4 (6) , 1-14 (2017) 。

5. Calvo, M. G., Marrero, H. 和 Beltrán, D. 大脑何时区分真诚的微笑和暧昧的微笑？ ERP 研究。大脑和认知。 81(2), 237–46 (2013)。

6. Willadsen-Jensen, E. C. & Ito, T. A. 歧义性和种族认知的时间进程。社会认知。 24(5), 580–606 (2006)。

7. Cunningham, W. A., Espinet, S. D., DeYoung, C. G. 和 Zelazo, P. D. 左右态度：与刺激效价和处理目标相关的额叶 ERP 不对称性。神经影像。 28(4), 827–34 (2005)。

8. Cuthbert, B. N., Schupp, H. T., Bradley, M. M., Birbaumer, N. 和 Lang, P. J. 情感图片处理中的大脑潜力：与自主神经唤醒和情感报告的协变。生物心理学。 52(2), 95–111 (2000)。

9. 舒普, H.T. 等人。情感图片处理：后期积极潜力由动机相关性调节。心理生理学。 37(2), 257–61 (2000)。

10. 莱特, J.等人。情感图像调制：效价、唤醒、注意力分配和动机意义。国际心理生理学杂志。 83(3), 375–81 (2012)。

11. Sutton, S., Braren, M., Zubin, J. 和 John, E. 刺激不确定性的诱发电位相关性。科学。 150 (3700) , 1187-8 (1965) 。

12. Wang, S. 等人人类杏仁核对特定面部情绪的强度及其类别模糊性进行参数编码。自然通讯。 2017; 8: 14821. [10.1038/ncomms14821 https://www.nature.com/articles/ncomms14821#supplementaryinformation](https://www.nature.com/articles/ncomms14821#supplementaryinformation)。

13. 阿道夫, R. 恐惧、面孔和人类杏仁核。神经生物学的当前观点。 18(2), 166–72, <https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.06.006> (2008)。

14. Adolphs, R., Tranel, D., Damasio, H. 和 Damasio, A. 人类杏仁核双侧损伤后面部表情情绪识别受损。自然。 372 (6507) , 669-72 (1994) 。

15. Rutishauser, U., Mamelak, A. N. 和 Adolphs, R. 社会感知中的灵长类杏仁核 – 来自电生理记录和刺激的见解。神经科学的趋势。 38(5), 295–306, <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.03.001> (2015)。

16. Calder, A. J. 双侧杏仁核损伤后的面部情绪识别：不同程度的严重恐惧障碍。认知神经心理学。 13(5), 699–745, <https://doi.org/10.1080/026432996381890> (1996)。

17. 布洛克斯, P.等人。脑炎后的面部处理障碍：杏仁核损伤和恐惧识别。神经心理学。 36(1), 59–70, [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00105-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00105-X) (1998)。

18. 阿道夫斯, R. 等人。九名双侧杏仁核损伤的个体的面部情绪识别。神经心理学。 37(10), 1111–7, [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00039-1) (1999)。

19. Whalen, P. J. 恐惧、警惕和模糊性：人类杏仁核的初步神经影像学研究。心理科学的当前方向。 7(6), 177–88, <https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10836912> (1998)。

20. Adams, R. B., Gordon, H. L., Baird, A. A., Ambady, N. 和 Kleck, R. E. 凝视对杏仁核对愤怒和恐惧面孔的敏感性的影响。科学。 300(5625), 1536, <https://doi.org/10.1126/science.1082244> (2003)。

21. Roesch, M. R., Calu, D. J., Esber, G. R. 和 Schoenbaum, G. 基底外侧杏仁核学习过程中事件处理变化的神经相关性。神经科学杂志。 30(7), 2464–71, <https://doi.org/10.1523/jneurosci.5781-09.2010> (2010)。

22. 沙克曼, A.J.等人。扣带皮层中负面情绪、疼痛和认知控制的整合。神经科学杂志。 12(3), 154–67, http://www.nature.com/nrn/journal/v12/n3/supinfo/nrn2994_S1.html (2011)。

23. Etkin, A., Buchel, C. 和 Gross, J. J. 情绪调节的神经基础。神经科学杂志。 16(11), 693–700, <https://doi.org/10.1038/nrn4044> (2015) 。

24. Rushworth, M. F. S. & Behrens, T. E. J. 前额叶和扣带皮层的选择、不确定性和价值。纳特·神经科学。 11(4), 389–97 (2008)。

25. Cole, M. W., Yeung, N., Freiwald, W. A. 和 Botvinick, M. 扣带皮层：来自人类和猴子的数据差异。神经科学的趋势。 32(11), 566–74, <https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.07.001> (2009)。

26. Alexander, W. H. 和 Brown, J. W. 绩效监控和认知控制的计算模型。认知科学主题。 2(4), 658–77, <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2010.01085.x> (2010)。

27. Sheth, S.A. 等人。人类背侧前扣带皮层神经元介导持续的行为适应。自然。 488(7410), 218–21, <http://www.nature.com/nature/journal/v488/n7410/abs/nature11239.html#supplementary-information> (2012)。

28. Bartra, O., McGuire, J. T. 和 Kable, J. W. 评估系统：对检查主观价值的神经相关性的 BOLD fMRI 实验进行基于坐标的荟萃分析。神经影像。 76, 412–27, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.02.063> (2013)。

29. De Martino, B., Fleming, S. M., Garrett, N. 和 Dolan, R. J. 对基于价值的选择的信心。纳特·神经科学。 16(1), 105–10, <http://www.nature.com/neuro/journal/v16/n1/abs/nn.3279.html#supplementary-information> (2013)。

30. Shenhav, A., Botvinick, M. M. 和 Cohen, J. D. 控制的期望值：前扣带皮层功能的综合理论。神经元。 79(2), 217–40, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.007> (2013)。

31. Krain, A. L., Wilson, A. M., Arbuckle, R., Castellanos, F. X. 和 Milham, M. P. 风险和模糊性的独特神经机制：决策的荟萃分析。神经影像。 32(1), 477–84, <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.02.047> (2006)。

32. Simmons, A., Stein, M. B., Matthews, S. C., Feinstein, J. S. 和 Paulus, M. P. 一组招募腹内侧前额叶皮层的情感模糊性。神经影像。 29(2), 655–61 (2006)。

33. Rutishauser, U., Reddy, L., Mormann, F. 和 Sarnthein, J. 人类记忆的架构：来自人类单神经元记录的见解。神经科学杂志。 41(5), 883, <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1648-20.2020> (2021)。

34. Sun, S., Yu, H., Yu, R., Wang, S.杏仁核和前额叶皮层之间的功能连接是情绪模糊处理的基础。转化精神病学。 13(1), 334, <https://doi.org/10.1038/s41398-023-02625-w> (2023)。

35. Wang, S. 面部大小会通过眼球运动影响情绪判断。科学报告。 8(1), 317, <https://doi.org/10.1038/s41598017-18741-9> (2018)。

36. Wang, S. & Adolphs, R. 自闭症谱系障碍患者情绪判断的特异性降低。神经心理学。 99, 286-95, <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.03.024> (2017) 。

37. 孙, S.等人。自闭症谱系障碍患者面部情绪判断过程中瞳孔振荡减少。自闭症和发育障碍杂志。 53 (5) , 1963-73 (2023) 。

38. Law Smith, M. J.、Montagne, B.、Perrett, D. I.、Gill, M. 和 Gallagher, L. 使用不同强度的动态刺激检测高功能自闭症患者的微妙面部情绪识别缺陷。神经心理学。 48(9), 2777–81, <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychology.2010.03.008> (2010)。

39. 菲利普, R.C.M.等人。自闭症谱系障碍患者的面部、身体运动和声音情感处理缺陷。心理医学。 40 (11) , 1919-29, <https://doi.org/10.1017/S0033291709992364> (2010) 。

40. 华莱士, G.L.等人。高功能自闭症谱系障碍患者对悲伤面部表情的敏感性降低与症状和适应性功能有关。自闭症和发育障碍杂志。 41(11), 1475–86, <https://doi.org/10.1007/s10803-010-1170-0> (2011) 。

41. Kennedy, D. P. 和 Adolphs, R. 从高功能自闭症成人面部表情中感知情绪。神经心理学。 50(14), 3313–9, <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.09.038> (2012)。

42. Harms, M.、Martin, A. 和 Wallace, G. 自闭症谱系障碍中的面部情绪识别：行为和神经影像学综述。神经心理学评论。 20(3), 290–322, <https://doi.org/10.1007/s11065-010-9138-6> (2010)。

43. Webster, P. J.、Wang, S. 和 Li, X. 评论：自闭症中的姿势与真实面部情绪识别和表达以及干预的意义。心理学前沿。 12 (2540) , 653112, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.653112> (2021) 。

44. Wang, S. & Li, X. 自闭症杏仁核理论的重温：二十年后。神经心理学。 183、108519、<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2023.108519> (2023) 。

45. 特伯格, D.等人。人类基底外侧杏仁核损伤后因恐惧而过度警惕。翻译精神病学。 2、e115, <https://doi.org/10.1038/tp.2012.46> (2012) 。

46. 拉涅夫, D.等人。信心数据库。自然人类行为。 4(3), 317–25, <https://doi.org/10.1038/s41562-019-0813-1> (2020)。

47. Kar, K. 对自闭症非典型面部情绪处理的行为和神经标记的计算探索。神经科学杂志。 42(25), 5115, <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2229-21.2022> (2022)。

48. 费德勒, T.等人。在厌恶动态刺激期间侵入性记录人类杏仁核中的尖峰和 LFP 活动数据集。科学数据。 8(1), 9, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00790-x> (2021)。

49. Hus, V. 和 Lord, C. 自闭症诊断观察表, 模块 4: 修订算法和标准化严重程度评分。自闭症和发育障碍杂志。 44 (8) , 1996-2012, <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2080-3> (2014) 。

50. LeCouteur, A.、Rutter, M. 和 Lord, C. 自闭症诊断访谈：基于研究者的标准化工具。自闭症和发育障碍杂志。 19(3), 363–87 (1989)。

51. Lord, C.、Rutter, M. 和 Couteur, A. 自闭症诊断访谈修订版：针对可能患有广泛性发育障碍的个人的护理人员的诊断访谈修订版。自闭症和发育障碍杂志。 24(5), 659–85, <https://doi.org/10.1007/BF02172145> (1994)。

52. Rutter, M.、Bailey, A.、Berument, S.、Lord, C.、Pickles, A. 社会沟通问卷。加利福尼亚州洛杉矶：西方心理服务中心； (2003) 。

53. Hofer, P. A. Urbach-Wiethe 病（脂糖蛋白沉积症；类脂蛋白沉积症；皮肤和粘膜玻璃样变）。评论。Acta Derm Venereol Suppl (Stockh)。 53, 1-52 (1973) 。

54. 贝克尔, B.等人。缺乏功能性杏仁核的恐惧处理和社交网络。生物精神病学。 72(1), 70–7, <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2011.11.024> (2012)。

55. Buchanan, T. W.、Tranel, D.、Adolphs, R. 社会功能中的人类杏仁核。见：Whalen, P. W.、Phelps, L., 编辑。人类杏仁核。p。289–320 (纽约：牛津大学出版社；2009 年) 。

56. 罗伊, S.等人。动态面部表情数据库。视觉杂志。 7(9), 944-, <https://doi.org/10.1167/7.9.944> (2007)。

57. 维伦博克尔, V.等人。控制低级图像属性：SHINE 工具箱。行为研究方法。 42, 671–84 (2010)。

58. Delorme, A. & Makeig, S. EEGLAB: 用于分析单次试验脑电图动态（包括独立成分分析）的开源工具箱。神经科学方法杂志。 134(1), 9–21, <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009> (2004)。

59. Nunez, P. L., Srinivasan, R. 大脑电场：脑电图的神经物理学：（美国牛津大学出版社；2006 年）。

60. Luck, S. J. 事件相关电位技术简介：（麻省理工学院出版社；2014 年）。

61. Lopez-Calderon, J. & Luck, S. J. ERPLAB: 用于分析事件相关电位的开源工具箱。人类神经科学的前沿。 8, 213 (2014)。

62. Sabatinelli, D.、Lang, P. J.、Keil, A. 和 Bradley, M. M. 情绪感知：功能 MRI 与事件相关电位的相关性。大脑皮层。 17(5), 1085–91 (2007)。

63. Brainard, D. H. & Vision, S. 心理物理学工具箱。空间视觉。 10(4), 433–6 (1997)。

64. Penny, W. 和 Holmes, A. 随机效应分析。统计参数映射：功能性大脑图像的分析。 156, 165 (2007)。

65. Minxha, J.、Mamelak, A. N.、Rutishauser, U. 人类癫痫患者单神经元记录的手术和电生理技术。载于：Sillitoe, R.V., 编辑。细胞外记录方法。p。267–93 (纽约州纽约：施普林格纽约；2018) 。

66. Rutishauser, U.、Schuman, E.M. 和 Mamelak, A.N. 体内人类内侧颞叶记录中细胞外记录的动作电位的在线检测和排序。神经科学方法杂志。 154 (1-2) , 204-24 (2006) 。

67. Olsson, P. 用于眼动追踪的实时和离线过滤器。2007年。

68. Sun, S.、Cao, R.、Rutishauser, U.、Yu, R. 和 Wang, S. 用于情绪感知和判断的统一人类多模态数据集。开放空间基金会。 <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/26RHZ> (2023) 。

致谢

这项研究得到了 AFOSR (FA9550-21-1-0088)、NSF (BCS-1945230、IIS-2114644)、NIH (R01MH129426) 和 Dana 基金会（至 S.W.）以及 FRIS 创意跨学科合作计划、东北倡议的支持用于培养全球跨学科科学研究人员（TI-FRIS）的业务预算东北大学校长任意基金和日本科学振兴会资助早期职业科学家补助金（编号 22K15626）（致 S.S.）。资助者在研究设计、数据收集和分析、发表决定或手稿准备中没有任何作用。

作者贡献

S.S.、U.R.、R.Y.和S.W.设计的实验。S.S.和S.W.进行了研究。S.S.、R.C.和S.W.分析的数据。S.S.、R.C.、U.R.、R.Y.和S.W.论文写道。所有作者都讨论了结果并为手稿做出了贡献。


利益竞争

作者声明没有竞争利益。

附加信息

信件和材料请求应发送给 S.S. 或 S.W.

重印和许可信息可在 www.nature.com/reprints 上获取。
出版商说明施普林格·自然对于已出版地图和机构隶属关系中的管辖权主张保持中立。

 开放获取 本文根据知识共享署名 4.0 国际许可证获得许可，该许可证允许以任何媒介或格式使用、共享、改编、分发和复制，只要您对原作者和来源给予适当的认可，提供知识共享许可证的链接，并指出是否进行了更改。本文中的图像或其他第三方材料包含在文章的知识共享许可中，除非材料的信用额度中另有说明。如果文章的知识共享许可中未包含材料，并且您的预期用途不受法律法规允许或超出了允许的用途，您将需要直接获得版权所有者的许可。要查看此许可证的副本，请访问 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>。

© 作者 2023