

# 基于多变量解码方法测量应激人群的ERP信号

刘 旻, 胡 莎

贵州师范大学心理学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年7月7日; 录用日期: 2022年8月4日; 发布日期: 2022年8月15日

## 摘要

多变量模式分类(解码)方法通常用于研究典型个体的神经认知神经加工, 它们可用于量化单参与者神经信号中存在的信息。故本研究的目的是探究多变量解码方法是否可以比较应激人群与常人的神经表征。采用马斯特里赫特急性应激测试技术诱发应激, 并在一项工作记忆任务中检查了应激人群和对照组的ERP, 该任务涉及从显示的一侧记住2、4和(2加2分心)个项目并忽略另一侧。我们使用ERP的空间模式来解码显示的哪一侧被保存在工作记忆中。解码精度结果显示虽有较好的正确率但并无交互作用。最后对可能造成此结果的原因进行了探讨。

## 关键词

ERP解码, 工作记忆, 急性应激

# Measurement of ERP Signals in Stressed Population Based on Multivariate Decoding Method

Min Liu, Sha Hu

School of Psychology, Guizhou Normal University, Guiyang Guizhou

Received: Jul. 7<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 4<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 15<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Multivariate pattern classification (decoding) methods are commonly used to study neurocognitive processing mechanisms in typical individuals, and they can be used to quantify the information present in neural signals of a single participant. Therefore, the purpose of this study was to investigate whether multivariate decoding methods can compare the neural representations of

stressed and normal people. Stress was induced using the Maastricht Acute Stress Test technique, and the ERPs of the stressed and control groups were examined in a working memory task involving remembering 2, 4 and (2 plus 2 distractions) items and ignore the other side. We used the spatial pattern of the ERP to decode which side of the display was kept in working memory. Decoding accuracy results show that although there is a good accuracy rate, there is no interaction. Finally, the possible reasons for this result are discussed.

## Keywords

ERP Decoding, Working Memory, Acute Stress

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 工作记忆

在《工作记忆》(1986)一书中, Baddeley 将工作记忆定义为在执行一系列任务(如理解、推理和学习)时临时保存和操作信息的系统。它不仅仅是关系着记忆本身, 更是关系着控制和调节我们的认知行为。

在工作记忆中, 直接反映工作记忆储存项目数量的成分是对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA), CDA 是指在视觉记忆项目的保持阶段, 目标视野的对侧脑区会出现比同侧脑区更大的负波。主要分布在大脑后部颞叶、顶叶与枕叶区域。采用 CDA 作为工作记忆保持量的指标, 可以实现将被试的行为反应和保持量相分离, 在实验中观测到纯净的工作记忆保持量(薛成波等, 2015)。

### 1.2. 急性应激

急性应激是指当不可预期和不可控制的环境要求超出了有机体的自然调节能力时, 有机体做出的非特异性反应(Koolhaas et al., 2011)。

应激的诱发范式有很多, 包括心理应激, 生理应激及复合型应激范式。心理性应激诱发范式主要是通过操纵心理任务施加压力来诱发个体的应激反应。常见的范式有: 特里尔社会应激测试(The Trier Social Stress Test, TSST)、社会评价冷加压技术(Socially Evaluated pressor Cold Test, SEPCT)范式、马斯特里赫特急性应激测试技术(Maastricht Acute Stress Test, MAST)。

马斯特里赫特急性应激测试技术(Maastricht Acute Stress Test, MAST), 该范式是由 Smeets 等人结合 TSST 的应激特点(社会评价性威胁, 不可预测性或不可控性)和 SECPT 范式(生理疼痛成分), 提出的由 TSST 中的心算任务和 SECPT 中的浸手任务交替联合操作的 MAST 范式(Smeets & Cornelisse, 2012)。MAST 包括 5 分钟的准备阶段和 10 分钟的应激阶段。被试需要在 10 分钟的时间跨度里完成 5 次 SECPT 和心算任务交替的试次(全程录像), 每次持续时间 60~90 s 不等, 水温保持 2℃ 不变。单次 SECPT 之后进行心算任务(2043 减 17), 时间由计算机控制(至少 45 s)。被试计算错误接受负性反馈并重新开始。

### 1.3. 多体素模式分析(Multi-Voxel Pattern Analysis, MVPA)

#### 1.3.1. 多体素模式分析(解码)的定义

认知神经科学一个非常核心的问题就是解码与编码的问题: 信息是怎么在不同的大脑结构被表示的?

在不同阶段的处理中, 信息是怎么转换的? 为了研究这个解码与编码的问题, 科学家们发展出了多体素模式分析(MVPA)的技术。

fMRI (功能核磁共振)为我们提供了一个非常好的工具, 它可以让被试执行一定的认知任务时测量局部的血流信号(血氧依赖水平, BOLD 信号)。fMRI 的成像单位是体素, 也就是说我们测量的事每个体素的 BOLD 信号。简而言之, 体素就是三维的像素。多体素模式分析就是用一些分类的机器学习算法, 应用在很多很多的体素的分析上, 从而从大量体素的 BOLD 信号中解码出来他们表示的信息。

### 1.3.2. 多体素模式分析(解码)的潜在价值

基础认知神经科学研究越来越多地采用多变量分析来检查神经活动的细粒度模式, 而不是整体反应幅度。例如, 在 fMRI 研究中, 一个区域内一组体素的活动模式可以提供比该区域的平均活动水平更精确的神经表征信息(Norman et al., 2006; Poldrack, 2011)。一种常见的多变量方法涉及根据区域内体素的活动模式对刺激或实验条件进行分类, 这可以被认为是解码神经信号。

解码方法可以检测传统单变量 ERP 方法无法检测到的神经表征的细微方面。例如, 通过对个体受试者的 ERP 头皮分布应用解码, 可以确定在保留期的每个时刻工作记忆中保持着 16 个方向中的哪一个(Bae & Luck, 2018), 甚至有可能在下一次试验开始时检测到此信息的自动重新激活(Bae & Luck, 2019)。我们称其为基于信息的解码方法, 因为它试图量化每个被试的神经信号中存在的信息。

单变量分析基于每个被试的试验间平均电压, 它们反映了个体间效应的一致性, 而不是试验间的一致性。相比之下, 解码分析是对每个被试单独进行的, 使用不同试验子集的平均值进行训练和测试, 给定被试的解码准确度反映了神经信号可靠地预测要记住的一面的能力。因此, 解码分析可以得出单变量 CDA 分析无法保证的结论: 与对照组相比, ERP 信号包含更多应激组中要记住哪一侧的信息(Bae et al., 2020)。

### 1.3.3. 基于信息的解码方法

除了与事件相关的电位外, 还将使用基于信息的解码方法(Bae & Luck, 2018, 2019), 测量每个被试的神经信号中存在的信息内容, 以量化工作记忆过程。基于信息的解码方法是最初由脑机接口推广的多变量方法(Bigdely-Shamlo et al., 2008; Thulasidas, Guan, & Jiankang, 2006), 但现在作为一种工具在认知神经科学中变得越来越流行评估给定神经信号中存在多少信息(Bae et al., 2020)。基于信息的解码方法的基本原理是在一个试验子集中训练一个分类器, 以便它尽可能地区分感兴趣的条件。在第二步中, 分类器在一组独立的试验中进行测试, 以确定分类器将试验分类为相应条件的准确度。多变量分类器最近被证明可以解码工作记忆内容(Bae & Luck, 2018; Foster et al., 2016)。在本研究中, 我们应用了基础认知神经科学中通常使用的基于信息的解码方法, 并探究应激和非应激人群之间的解码精度(作为信息内容的衡量标准)有何不同。

### 1.3.4. 解码方法在 CDA 数据中的应用

使用解码方法代替标准的单变量 ERP 幅度测量。我们专注于解码工作记忆, 显示的刺激显示的哪一侧。本研究中采用的解码方法使用 ERP 的细粒度头皮分布来预测哪一侧包含要记住的信息, 而细粒度头皮分布信息通常在标准方法中起次要作用, 可能难以解释(Urbach & Kutas, 2002, 2006)。传统方法考察共性当头皮分布因人而异时, 被试的头皮模式会失去力量, 而解码方法为每个被试找到最佳头皮模式, 并且不受头皮地形个体差异的阻碍。解码方法旨在回答与标准方法不同的问题: 与其询问具有已知含义的神经信号是否因组或条件而异, 解码方法询问神经信号模式中存在多少信息, 以及信息内容在不同条件或组之间有何不同(Hebart & Baker, 2018; Poldrack, 2011)。因为神经反应的大小可以与可解码的信息内容

分离(Emrich et al., 2013), 甚至可以在整体响应不超过基线水平时解码神经表征的内容(Serences et al., 2009)。

### 1.3.5. 衡量指标

解码准确率(Decoding Accuracy): 我们将解码准确度定义为被试正确推断需要记住某种东西的能力(Hess, Blairy, & Kleck, 1997), 反应了需要记住的东西在工作记忆中维持的过程。例如, 可以从 fMRI 数据(Ester, Sprague, & Serences, 2015; Kamitani & Tong, 2005)或未过滤的 EEG 信号(Bae & Luck, 2018; Vapnik, 1999)中解码工作记忆中项目的方向。这些结果表明, 早期视觉区域的 fMRI/EEG 活动模式, 包括初级视觉皮层(V1), 包含可以可靠地预测主观感知的详细方向信息。Feldmann 采用双边变化检测范式同时测量被试的负慢波(NSW)和对侧延迟活动(CDA), 从原始 EEG 信号中解码集合大小(净负荷), 从而预测个人工作记忆容量(Feldmann-Wüstefeld, 2021)。Foster 采用延迟估计任务和空间变化监测任务对 EEG 数据中的 alpha 波段活动进行解码, 成功解码出工作记忆中项目的位置(Foster et al., 2016)。Haynes 的研究对大脑活动的非侵入性测量, 可以准确地解码一个人的意识体验。有助于揭示个人经历在人类大脑中的编码方式(Haynes & Rees, 2006)。Bae 等人采用颜色变化探测任务测量被试对侧延迟活动(CDA)波幅, 从 EEG 信号中解码被试看到的哪一侧, 预测被试要记住哪一面的能力(Bae et al., 2020)。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 被试

本研究需要测量被试的唾液皮质醇浓度, 为了避免女性的月经周期对皮质醇浓度造成影响, 与绝大多数应激研究一样, 本研究只选取健康成年男性被试。选择 66 名被试(根据前人(Shields et al., 2017)研究的效应量为 0.2, 用 Gpower 算出被试量)。年龄 18~35 岁, 参加实验时无生理、心理疾病, 没有使用药物, 参加实验前的 1 个月内没有使用类固醇之类的药物。所有被试的视力及矫正视力均正常, 没有色盲和色弱, 且所有被试都没有精神疾病及精神疾病治疗史。并且在实验开始的 72 小时之前提醒被试不要抽烟, 24 小时之前不要喝酒, 实验前两个小时不要进食, 不要做过度运动, 保证良好的睡眠。

### 2.2. 实验设计

本实验采用 2 (组别: 应激组, 控制组) × 3 (记忆负荷: 两个红色、四个红色、两个红色和两个蓝色(分心信息条件))混合实验设计, 以组别为被试间变量, 记忆负荷为被试内变量。

### 2.3. 实验材料

红色和蓝色矩形( $1.21^\circ \times 0.64^\circ$ )。每个矩形总是以  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  或  $315^\circ$  的方向呈现。这些矩形呈现在两个虚拟矩形区域内, 每个虚拟矩形内( $4^\circ \times 7.6^\circ$ , 距离固定点  $3^\circ$ )刺激的呈现方式有三种情况: 两个红色矩形, 四个红色矩形, 两个红色和两个蓝色矩形。每个矩形之间的距离不小于  $2^\circ$ 。

### 2.4. 研究工具

焦虑状态 - 特质量表(State-trait Anxiety Scale, STAL)由 Spielberger 于 1977 年编制, 并于 1983 年修订的一种自我评价问卷。由两个分量表, 40 项描述题组成。1~20 题是状态焦虑量表, 包含正性情绪和负性情绪各半, 主要用于评定即刻或者最近的体验和感受。21~40 题是特质焦虑表, 用于评定人们经常的情绪体验。其中 11 项为负性情绪条目, 9 项为正性情绪条目。

正负性情绪量表(Positive and Negative Affect Scale, PANAS): 是由美国南米得狄斯特大学及明尼苏达大学于 1988 年共同编制的, 用于评定个体的正性和负性情绪。由 20 个反应情绪的形容词组成, 包含了

正性情绪因子和负性情绪因子。

## 2.5. 应激诱发

采用 MAST 诱发被试的应激状态, MAST 包括 5 分钟的准备阶段和 10 分钟的应激阶段。被试需要在 10 分钟的时间跨度里完成 5 次 SECPT 和心算任务交替的试次(全程录像), 每次持续时间 60~90 s 不等, 水温保持 2℃ 不变。单次 SECPT 之后进行心算任务(2043 减 17), 时间由计算机控制(至少 45 s)。被试计算错误接受负性反馈并重新开始。具体见图 1。

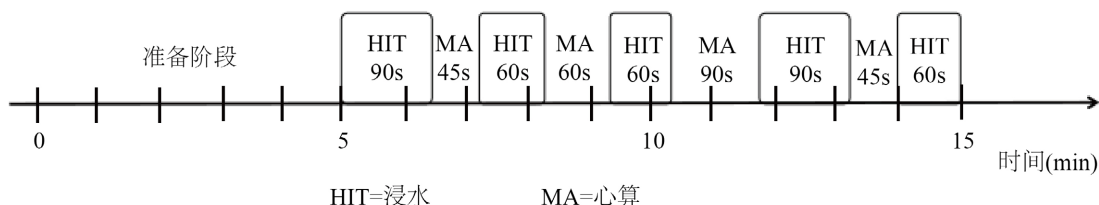


Figure 1. MAST paradigm process  
图 1. MAST 范式流程

对于控制组被试, 主试告之进行 MAST 任务, HIT 时指导被试将手放入温(36℃~38℃)中, MA 时计算从 1000 依次减 10, 没有录音录像等事宜。

## 2.6. 实验流程

由于人体的皮质醇水平早晨清醒后最高, 如果没有特殊情况发生, 它会平稳的下降, 在凌晨时分到达一天的最低值(杨娟, 张庆林, 2010)。为避免自身皮质醇节律对实验结果的影响, 所有的实验都安排在下午 1 点至 6 点之间进行。实验流程如图所示, 被试到达实验室后, 在独立房间静坐休息 5 分钟然后填写正负性情绪问卷、状态焦虑量表, 收集第一个唾液样本(S1)。洗完头后对工作记忆任务进行练习, 练习后收集第二次唾液样本, 并做问卷。接着打电极膏, 做应激任务(MAST), 应激任务完成后收集第三个唾液样本, 并做问卷。收完唾液后做变化探测任务, 第二次休息时收集第四次唾液样本, 并做问卷。最后, 在变化探测任务完之后收集第五次唾液, 并做问卷。具体见图 2。

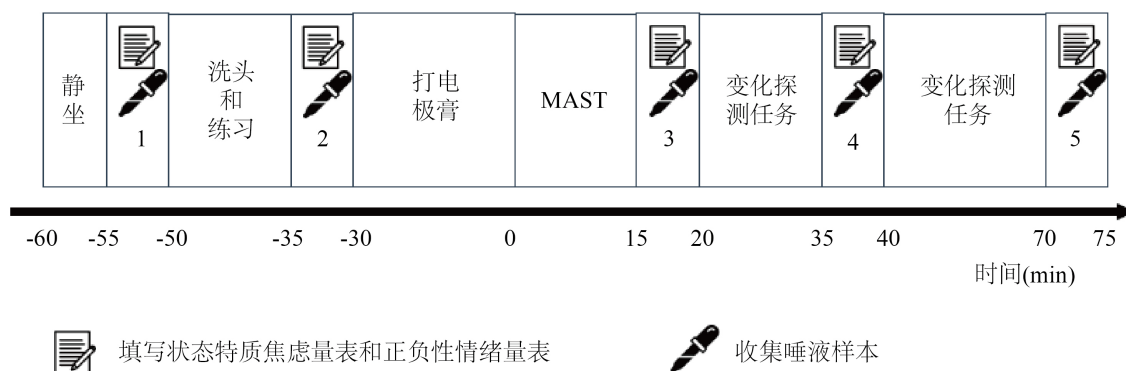


Figure 2. Experimental process  
图 2. 实验流程

## 2.7. 实验任务

采用变化探测任务来测量工作记忆中分心信息的抑制和目标信息的储存。如图所示: 任务开始时在

屏幕中央呈现一个箭头 200 ms, 被试需要记住箭头指向的方向, 接着呈现“+” 200~400 ms, 之后出现 100 ms 的记忆阵列, 被试需要记住刚才记住的箭头一侧的红色矩形阵列。记忆阵列有三种条件: 两个红色矩形, 四个红色矩形, 两个红色矩形和两个蓝色矩形。在 900 ms 的延迟阶段之后出现测试阵列( $\leq 5000$  ms), 被试判断现在出现探测形阵列和之前出现的记忆阵列是否完全相同(其中只有一个红色矩形的朝向会发生变化)。任务保证按键反应在被试间的平衡。具体见图 3。

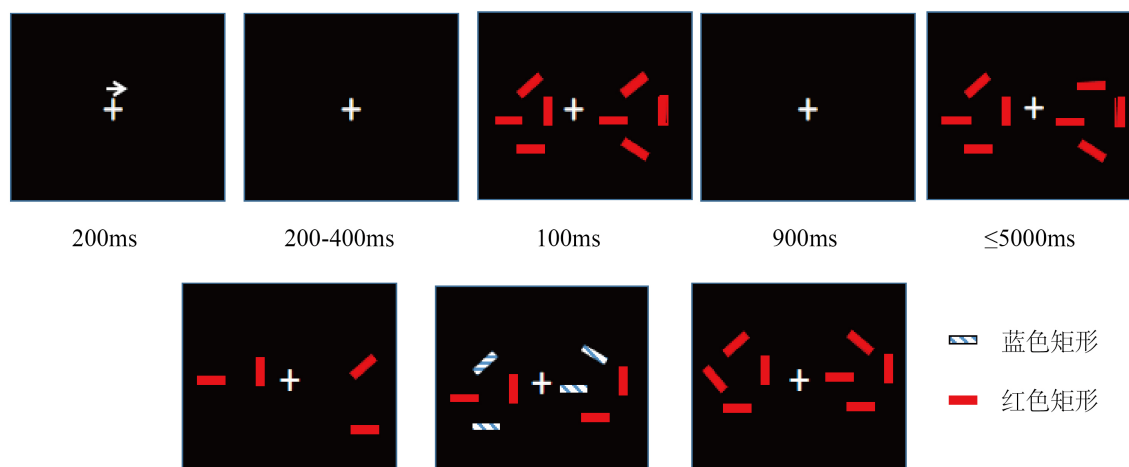


Figure 3. Schematic diagram of the change detection paradigm  
图 3. 变化探测范式示意图

实验开始前被试会先进行 80 个 trials 的练习, 确保被试熟悉并且明白实验任务。实验总共分为 6 个 block, 每个 block 有 80 个 trials, 总共 480 个 trials, 每种条件下有 160 个 trials。中间会休息 5 次。每次强制性休息一分钟, 但是, 如果被试还没有休息好可以继续休息, 但保证每次的休息时间不低于 1 分钟。

## 2.8. 解码程序

使用支持向量机(SVM)和纠错输出代码(ECOC; Dietterich & Bakiri, 1995)的组合, 根据 64 个头皮电极上的平均 ERP 活动的空间模式, 对工作记忆中维持的显示器一侧(左与右)进行解码。ECOC 模型通过组合多个二元分类器的结果来解决多类分类问题。对于每个被试, 该过程分别针对三个记忆负荷中的每一个进行。来自给定记忆负荷的数据根据给定试验中哪一侧包含要记住的形状分为记住左和记住右试验。参考(Bae et al., 2020)使用 3 折交叉验证程序, 其中来自当前记忆负荷的记忆左和记忆右试验分别随机分为 3 组, 来自给定集合的数据被平均在一起。使用来自给定记忆侧的三组中的两组的平均数据来训练分类器, 然后用来自第三组的平均数据评估分类器的性能。该过程在训练和测试波形中使用不同的随机选择试验多次迭代, 这提供了更可靠的解码精度估计。通过比较测试数据集中真正要记住的一面的标签和预测的一面的标签来计算解码精度。训练和测试是使用 `fitcecoc()` 和 `predict()` Matlab 函数。因为分类是二元的, 并且两个备选方案的概率相同, 所以机会性能为 0.5。

## 2.9. 数据的记录

### 2.9.1. 问卷及皮质醇数据的记录及分析

采用 SARSTEDT 专门用于采集唾液的合成纤维唾液采集管采集唾液, 采集后的唾液样本冷藏在零下 20℃ 的冰箱中。采用电化学发光免疫分析法测定唾液皮质醇浓度。敏感性为 1.5 nmol/L (下限)。为了能够

清楚, 直观地看到应激是否有效应, 对采集到的皮质醇数据, 状态焦虑量表, 正负性情绪量表(PANAS) 分别进行 2 (组别: 应激组, 控制组)  $\times$  5 (时间点: 第一次采集, 第二次采集, 第三次采集, 第四次采集, 第五次采集) 的重复测量方差分析。

### 2.9.2. 行为数据的记录及分析

本研究采用 Eprime 呈现刺激并收集行为反应数据。为了能够更加清楚地探明急性应激对工作记忆中记忆目标信息和抑制无关信息的影响, 我们采用公式  $K = N \times (HR - FA) / (1 - FA)$  来计算被试的工作记忆容量。其中,  $K$  是工作记忆容量;  $N$  是呈现目标刺激的个数;  $HR$  是击中率, 或者是出现变化时反应正确的比例;  $FA$  是误报率, 或者是在没有变化的试次中反应错误的比例。再对被试的反应时、正确率和工作记忆容量进行 2 (组别: 应激组, 控制组)  $\times$  3 (记忆负荷: 两个红色, 四个红色, 两个红色和两个蓝色) 的重复测量方差分析。

### 2.9.3. EEG 数据的记录及预处理

选用美国 Neuro Scan 公司生产的 ESI-64 导脑电记录分析系统, 按照国际 10~20 的 64 导电极帽记录 EEG。在线记录时以位于头皮前中部 FPz 和 Fz 电极点连线的中点为参考电极, 左眼上下方安放电极记录垂直眼电, 左右眼外侧安放电极记录水平眼电, 滤波的带通为 0.05~100 Hz, 采样的频率为 1000 Hz, 每个电极与头皮之间的阻抗均小于 5 K $\Omega$ 。采用 Matlab (R2020a)、EEGLAB (V14.1.2) (Delorme & Makeig, 2004)、ERPLAB (v7.0.0) (Lopez-Calderon & Luck, 2014) 和 Matlab 自定义代码对获得的 EEG 的数据进行离线分析处理。以左右乳突的平均值作为离线参考, 对数据进行高通滤波(0.1 Hz, 24 dB/octave)和低通滤波(30 Hz, 48 dB/octave)。以记忆阵列(两个红色, 四个红色, 两个红色和两个蓝色)出现为标记, 刺激呈现前 200ms 和刺激呈现后 1200 ms 为时间窗, 对连续数据进行分段, 并选取刺激呈现前 200 ms 的脑电作为基线。对每个受试者的头皮脑电图进行独立成分分析(ICA), 以识别和去除与眨眼(Jung et al., 2000)和眼球运动(Drisdelle et al., 2017)相关的成分, 计算 CDA 并去掉伪迹过多的被试。

### 2.9.4. 解码精度统计分析

统计分析的因变量是每个被试在每个记忆负荷下的平均解码准确度。使用  $3 \times 2$  ANOVA 分析这些值, 记忆负荷(2, 4, 2 加 2 分心)作为被试内因素, 组(应激/控制)作为被试间因素。进行单样本  $t$  检验, 比较每个记忆负荷下应激组和控制组之间的解码精度。

## 3. 实验结果

### 3.1. 控制组和应激组唾液皮质醇分析

以应激组, 控制组为被试间变量, 唾液的采集时间点为被试内变量, 对 57 名被试的唾液皮质醇值(控制组 26 人, 应激组 31 人)进行重复测量方差分析发现: 唾液时间点之间的主效应显著,  $F(4, 220) = 9.190$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.143$ , 除了第五次外, 应激组随着时间点的延长, 皮质醇浓度越来越高。组别之间的主效应显著,  $F(1, 55) = 7.530$ ,  $p = 0.008$ ,  $\eta^2 = 0.120$ , 除第一次外, 应激组的皮质醇浓度都高于控制组。组别和时间点之间的交互作用显著,  $F(4, 200) = 18.933$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.256$ 。

简单效应分析, 在第一次测量时, 两组被试在时间点上存在边缘显著( $t = 1.887$ ,  $p = 0.065$ ), 控制组的唾液皮质醇高于应激组的; 在第二次测量时, 两组被试在时间点上无显著差异( $p = 0.929$ ); 在第三次测量时, 两组被试在时间点上存在边缘显著( $p = 0.053$ ), 控制组的唾液皮质醇含量低于应激组; 在第四次测量时, 两组被试在时间点上存在显著差异( $p < 0.001$ ), 应激组的唾液皮质醇含量显著高于控制组; 在第五次测量时, 两组被试在时间点上存在显著差异( $p = 0.018$ )。

## 3.2. 问卷结果分析

### 3.2.1. 状态焦虑量表得分分析

状态焦虑问卷时间点之间的主效应显著,  $F(4, 220) = 13.492$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.197$ 。组别之间的主效应不显著,  $F(1, 55) = 0.348$ ,  $p = 0.558$ ,  $\eta^2 = 0.006$ 。组别和时间点之间的交互作用显著,  $F(4, 220) = 4.735$ ,  $p = 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.079$ 。

简单效应分析发现: 控制组在焦虑量表得分的时间点之间都不存在差异, 而应激组的被试在各个时间点之间都存在显著差异; 第一次测量和第二次测量存在差异( $p = 0.005$ ), 第二次测量和第三次测量存在显著差异( $p = 0.020$ ), 第三次测量和第四次测量存在显著差异( $p < 0.001$ ), 第四次测量和第五次测量存在显著差异( $p < 0.001$ )。

### 3.2.2. 正性情绪量表得分分析

正性情绪量表时间点之间的主效应显著,  $F(4, 220) = 20.082$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.267$ , 时间越长, 正性情绪量表的得分越低。组别之间的主效应不显著,  $F(1, 55) = 0.637$ ,  $p = 0.637$ ,  $\eta^2 = 0.004$ 。组别和时间点之间的交互作用不显著,  $F(4, 220) = 0.844$ ,  $p = 0.499$ ,  $\eta^2 = 0.015$ 。

### 3.2.3. 负性情绪量表得分分析

负性情绪量表时间点之间的主效应不显著,  $F(4, 220) = 2.191$ ,  $p = 0.071$ ,  $\eta^2 = 0.038$ 。组别之间的主效应不显著,  $F(1, 55) = 1.100$ ,  $p = 0.299$ ,  $\eta^2 = 0.020$ 。组别和时间点之间的交互作用显著,  $F(4, 220) = 4.539$ ,  $p = 0.002$ ,  $\eta^2 = 0.076$ 。

简单效应分析发现, 在第一, 二次测量时, 两组被试在时间点上无显著差异( $p = 0.994$ ,  $p = 0.936$ ); 在第三次测量时, 两组被试在时间点上存在显著差异( $p = 0.008$ ), 控制组的负性情绪得分显著低于应激组; 在第四, 五次测量时, 两组被试在时间点上不存在显著差异( $p = 0.594$ ,  $p = 0.513$ )。

## 3.3. 行为结果分析

### 3.3.1. 正确率分析

记忆类型主效应显著,  $F(2, 110) = 143.311$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.723$ , 记两个红色的正确率高于记两个蓝色和两个红色的, 记四个红色的正确率是最低的。组别主效应不显著,  $F(1, 55) = 0.008$ ,  $p = 0.930$ ,  $\eta^2 = 0$ 。记忆类型和组别之间交互作用不显著,  $F(2, 110) = 0.027$ ,  $p = 0.973$ ,  $\eta^2 = 0$ 。

### 3.3.2. 反应时分析

记忆类型主效应显著,  $F(2, 110) = 67.269$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.550$ , 记忆四个红色的反应时大于记忆两个红色及两个红色和两个蓝色。组别主效应不显著,  $F(1, 55) = 1.841$ ,  $p = 0.180$ ,  $\eta^2 = 0.032$ , 但在应激组的反应时大于控制组的反应时, 组别和记忆类型之间的交互作用不显著,  $F(2, 110) = 0.036$ ,  $p = 0.965$ ,  $\eta^2 = 0.032$ 。

### 3.3.3. CDA 的波幅值分析

在 380\_900 的时间窗内: 记忆类型主效应显著,  $F(2, 110) = 6.332$ ,  $p = 0.002$ ,  $\eta^2 = 0.103$ , 记忆四个红色的波幅值比记忆两个红色及两个红色和两个蓝色的更负。组别主效应边缘显著,  $F(1, 55) = 3.981$ ,  $p = 0.051$ ,  $\eta^2 = 0.736$ , 控制组 CDA 的波幅值比应激组 CDA 的波幅值更负。记忆类型和组别之间交互作用不显著,  $F(2, 110) = 0.854$ ,  $p = 0.428$ ,  $\eta^2 = 0.0015$ 。

独立样本 T 检验发现: 两组被试在记忆两个红色时存在边缘显著( $t = -1.697$ ,  $p = 0.096$ ), 在记忆四个红色时存在边缘显著( $t = -1.867$ ,  $p = 0.071$ ), 在记忆两个红色和两个蓝色时不存在显著差异。



### 3.3.4. 时间平均 ERP 解码分析

图 4 显示了两组分别在 3 个记忆负荷下的平均解码精度。在负荷为 2、4 时, 控制组的解码准确率略高于应激组。然而在负荷为有分心物的情况下, 应激组的解码正确率高于控制组。使用单样本  $t$  检验分别对每个组的各个负荷条件下正确率是否显著高于 0.5。结果显示, 对于控制组的所有负荷而言, 平均解码准确率都显著高于 0.5(负荷 2:  $t(25) = 6.247, p < 0.001$ ; 负荷 4:  $t(25) = 7.149, p < 0.001$ ; 负荷 2/2:  $t(25) = 8.328, p < 0.001$ )。应激组也是如此(负荷 2:  $t(29) = 7.027, p < 0.001$ ; 负荷 4:  $t(29) = 7.874, p < 0.001$ ; 负荷 2/2:  $t(29) = 9.583, p < 0.001$ )。

为了评估组别和记忆负荷之间的差异, 进行  $3 \times 2$  ANOVA, 其中记忆负荷(2、4 和 2/2)作为被试内因素, 组别(控制、应激)作为被试间因素。组别的主效应不显著( $F(1, 55) = 0.11, p = 0.915, \eta^2 = 0$ ), 记忆负荷的主效应不显著的( $F(2, 110) = 0.933, p = 0.395, \eta^2 = 0.11$ )。记忆负荷和组之间的交互作用不显著( $F(2, 110) = 0.285, p = 0.753, \eta^2 = 0.04$ )。

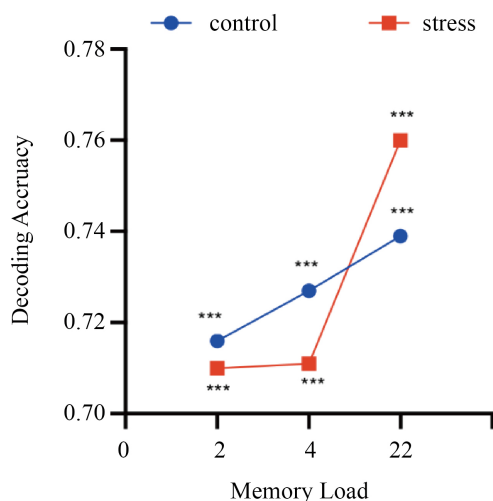


Figure 4. Decoding accuracy

图 4. 解码正确率

## 4. 讨论

本研究目的是研究解码方法能否有效的用于比较应激人群与常人的神经表征。因此本研究采用了状态焦虑问卷(SAL), 正负性情绪量表(PANAS)为研究工具, 变化探测范式和 MAST 为研究范式, 采用事件相关电位技术和多体素模式分析, 研究应激人群神经信号中的信息含量。

从问卷和皮质醇的结果来看, 无论是从心理上还是生理上, 应激组的应激诱发程序都是成功的。在变化探测任务中, 无论是从反应时还是正确率上来说, 应激组和控制组之间都没有差异。但是应激组的反应时要比控制组的反应时高。这和前人的研究是一致的(齐森青, 李红, 2014)。

对于 CDA 幅值而言, 应激组和控制组的被试在记忆两个红色和记忆四个红色时存在边缘显著, 而在记忆分心信息条件下不存在差异, 这说明应激影响了被试对于目标信息的存储, 而没有影响对于分心信息的过滤。

对于解码正确率而言, 在两个组的三种负荷条件下的正确率都显著高于 0.5, 说明解码过程并不是靠猜测。然而  $2 \times 3$  的方差分析结果显示组别和记忆负荷的主效应不显著, 且两者无交互作用。这个结果与所需要探究的问题是有出入的, 即多变量解码方法不能比较应激人群与常人的神经表征, 故后续的研究

将对影响解码正确率的因素进行探讨,并在排除相关因素后是否有交互作用。

首先,Changoluisa 等人(2022)通过采用合适的电极点作为特征,实现对特定个体脑电时空特征的工作记忆性能预测,而本研究采用的电极点为 64 个,为了探讨解码的影响因素是否和电极点有关。后续可以采用合适的电极点,即与 CDA 相关的电极点作为输入再次进行解码。

其次,对单个指定的被试来说,解码正确率与以下两个因素有关。该被试在各实验条件之间的神经活动差异的大小;该被试中在相同实验条件下各试次之间的神经活动差异的大小(Bae et al., 2020)。

最后,Mostert 等人(2018)认为基于 EEG 的解码正确率还会受到眼球运动产生的 EOG 电压的影响,因此后续研究还需要证明我们的解码结果是否受眼球运动的影响。

## 5. 结论

从目前的结果来看,多变量解码方法不能比较应激人群与常人的神经表征,后续研究将排除上述因素后,再次证明多变量解码方法是否可用于比较应激人群与常人的神经表征。

## 参考文献

- 齐森青,李红(2014). 特质焦虑影响抑制控制的认知神经机制. 博士学位论文,重庆:西南大学.
- 薛成波,叶超雄,张引,刘强(2015). 视觉工作记忆中特征绑定关系的记忆机制. *心理学报*, 47(7), 851-858.
- 杨娟,张庆林(2010). 特里尔社会应激测试技术的介绍以及相关研究. *心理科学进展*, 18(4), 699-704.
- Bae, G.-Y., & Luck, S. J. (2018). Dissociable Decoding of Spatial Attention and Working Memory from EEG Oscillations and Sustained Potentials. *The Journal of Neuroscience*, 38, 409-422. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2860-17.2017>
- Bae, G.-Y., & Luck, S. J. (2019). Reactivation of Previous Experiences in a Working Memory Task. *Psychological Science*, 30, 587-595. <https://doi.org/10.1177/0956797619830398>
- Bae, G.-Y., Leonard, C. J., Hahn, B., Gold, J. M., & Luck, S. J. (2020). Assessing the Information Content of ERP Signals in Schizophrenia Using Multivariate Decoding Methods. *NeuroImage: Clinical*, 25, Article ID: 102179. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102179>
- Bigdely-Shamlo, N., Vankov, A., Ramirez, R. R., & Makeig, S. (2008). Brain Activity-Based Image Classification from Rapid Serial Visual Presentation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 16, 432-441. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2008.2003381>
- Changoluisa, V., Poch, C., Campo, P., & Rodriguez, F. B. (2022). Predicting Working Memory Performance Based on Specific Individual EEG Spatiotemporal Features. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.05.06.490941>
- 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, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Dietterich, T. G., & Bakiri, G. (1995). Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2, 263-286. <https://doi.org/10.1613/jair.105>
- Drisdelle, B. L., Aubin, S., & Jolicoeur, P. (2017). Dealing with Ocular Artifacts on Lateralized ERPs in Studies of Visual-Spatial Attention And Memory: ICA Correction versus Epoch Rejection. *Psychophysiology*, 54, 83-99. <https://doi.org/10.1111/psyp.12675>
- Emrich, S. M., Riggall, A. C., LaRocque, J. J., & Postle, B. R. (2013). Distributed Patterns of Activity in Sensory Cortex Reflect the Precision of Multiple Items Maintained in Visual Short-Term Memory. *Journal of Neuroscience*, 33, 6516-6523. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5732-12.2013>
- Ester, E. F., Sprague, T. C., & Serences, J. T. (2015). Parietal and Frontal Cortex Encode Stimulus-Specific Mnemonic Representations during Visual Working Memory. *Neuron*, 87, 893-905. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.07.013>
- Feldmann-Wüstefeld, T. (2021). Neural Measures of Working Memory in a Bilateral Change Detection Task. *Psychophysiology*, 58, e13683. <https://doi.org/10.1111/psyp.13683>
- Foster, J. J., Sutterer, D. W., Serences, J. T., Vogel, E. K., & Awh, E. (2016). The Topography of Alpha-Band Activity Tracks the Content of Spatial Working Memory. *Journal of Neurophysiology*, 115, 168-177. <https://doi.org/10.1152/jn.00860.2015>
- Haynes, J. D., & Rees, G. (2006). Decoding Mental States from Brain Activity in Humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 7,

- 523-534. <https://doi.org/10.1038/nrn1931>
- Hebart, M. N., & Baker, C. I. (2018). Deconstructing Multivariate Decoding for the Study of Brain Function. *NeuroImage*, *180*, 4-18. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.08.005>
- Hess, U., Blairy, S., & Kleck, R. E. (1997). The Intensity of Emotional Facial Expressions and Decoding Accuracy. *Journal of Nonverbal Behavior*, *21*, 241-257. <https://doi.org/10.1023/A:1024952730333>
- Jung, T. P., Makeig, S., Westerfield, M., Townsend, J., Courchesne, E., & Sejnowski, T. J. (2000). Removal of Eye Activity Artifacts from Visual Event-Related Potentials in Normal and Clinical Subjects. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 1745-1758. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(00\)00386-2](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(00)00386-2)
- Kamitani, Y., & Tong, F. (2005). Decoding the Visual and Subjective Contents of the Human Brain. *Nature Neuroscience*, *8*, 679-685. <https://doi.org/10.1038/nn1444>
- Koolhaas, J. M., Bartolomucci, A., Buwalda, B., Boer, S. F. D., Flügge, G., & Korte, S. M. (2011). Stress Revisited: A Critical Evaluation of the Stress Concept. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *35*, 1291-1301. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.02.003>
- Lopez-Calderon, J., & Luck, S. J. (2014). ERPLAB: An Open-Source Toolbox for the Analysis of Event-Related Potentials. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, Article 213. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00213>
- Mostert, P., Albers, A. M., Brinkman, L., Todorova, L., Kok, P., & De Lange, F. P. (2018). Eye Movement-Related Confounds in Neural Decoding of Visual Working Memory Representations. *eNeuro*, *5*, 1-14. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0401-17.2018>
- Norman, K. A., Polyn, S. M., Detre, G. J., & Haxby, J. V. (2006). Beyond Mind-Reading: Multi-Voxel Pattern Analysis of fMRI Data. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 424-430. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.07.005>
- Poldrack, R. A. (2011). Inferring Mental States from Neuroimaging Data: From Reverse Inference to Large-Scale Decoding. *Neuron*, *72*, 692-697. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.11.001>
- Serences, J. T., Ester, E. F., Vogel, E. K., & Awh, E. (2009). Stimulus-Specific Delay Activity in Human Primary Visual Cortex. *Psychological Science*, *20*, 207-214. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02276.x>
- Shields, G. S., Sazma, M. A., Mccullough, A. M., & Yonelinas, A. P. (2017). The Effects of Acute Stress on Episodic Memory: A Meta-Analysis and Integrative Review. *Psychological Bulletin*, *143*, 636-675. <https://doi.org/10.1037/bul0000100>
- Smeets, T., & Cornelisse, S. (2012). Introducing the Maastricht Acute Stress Test (MAST): A Quick and Non-Invasive Approach to Elicit Robust Autonomic and Glucocorticoid Stress Responses. *Psychoneuroendocrinology*, *37*, 1998-2008. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2012.04.012>
- Thulasidas, M., Guan, C., & Jiankang, W. U. (2006). Robust Classification of EEG Signal for Brain-Computer Interface. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *14*, 24-29. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2005.862695>
- Urbach, T. P., & Kutas, M. (2002). The Intractability of Scaling Scalp Distributions to Infer Neuroelectric Sources. *Psychophysiology*, *39*, 791-808. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3960791>
- Urbach, T. P., & Kutas, M. (2006). Interpreting Event-Related Brain Potential (ERP) Distributions: Implications of Baseline Potentials and Variability with Application to Amplitude Normalization by Vector Scaling. *Biological Psychology*, *72*, 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.11.012>
- Vapnik, V. (1999). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3264-1>