

道路交通与生活场景诱发下驾驶人情绪的脑认知 响应差异

李文博, 喻文珑, 吴盈章, 李承谋, 李国法, 郭 钢

(重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要: 为了探究道路交通场景和生活场景下驾驶人情绪脑认知响应差异, 邀请 10 名被试分别在 2 种场景下完成情绪诱导实验。从离散情绪和连续情绪 2 个维度分析 2 种场景下前额与外额含氧血红蛋白和脱氧血红蛋白浓度的差异, 进而推断脑区的激活程度。结果表明, 道路交通场景相较于生活场景, 愤怒与惊讶情绪下前额与外额的激活程度更强, 快乐情绪下前额与外额的激活程度更低, 恐惧情绪下仅在前额发现了显著差异, 且激活程度更低; 道路交通场景相较于生活场景, 愤怒、恐惧、惊讶 3 种情绪前额与外额的脑功能连接强度更高, 快乐与悲伤 2 种情绪下前额与外额的脑功能连接强度更低。

关键词: 汽车智能座舱; 驾驶人情绪; 道路交通场景; 脑区激活

中图分类号: U461

文献标志码: A

Difference in Brain Cognitive Responses to Driver Emotions Induced by Road Traffic and Daily Life Scenarios

LI Wenbo, YU Wenlong, WU Yingzhang, LI Chengmou, LI Guofa, GUO Gang

(College of Mechanical and Transportation Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To investigate potential differences in the brain cognitive responses to emotions between road traffic and daily life scenarios, ten participants were invited to complete emotion induction experiments in both road traffic and daily life settings. Then we analyzed the differences in concentrations of oxygenated and deoxygenated hemoglobin in the frontal and lateral lobes across two scenarios, discrete emotion and continuous

emotion, in order to infer the activation degree of brain regions. The results show that the activation of the frontal and lateral lobes is stronger under anger and surprise emotions in road traffic scenario than that in daily life scenario, but lower in happiness emotion. However, significant differences are found only in the frontal lobe under fear emotion, and the activation is lower. In addition, compared with daily life scenario, the functional connectivity strength between the frontal and lateral lobes is higher under anger, fear, and surprise emotions in road traffic scenario, while it is lower under happiness and sadness emotions.

Keywords: automotive intelligent cockpit; driver emotions; road traffic scenarios; brain activation

全球每年有超 119 万人因为交通事故丧命^[1], 其中人为因素在交通事故成因中占比超过 90%, 由驾驶人极端情绪及行为造成的事故是主要原因之一^[2]。如何减轻和避免由驾驶人极端情绪造成的交通事故, 是目前汽车智能座舱人机交互领域的研究热点。汽车智能座舱是指搭载先进的软硬件系统, 具备人机交互、网联服务、场景拓展的人-机-环融合能力, 为驾乘人员提供安全、智能、高效、愉悦等综合体验的移动空间^[3]。汽车智能座舱对驾驶人的主动感知与多模态交互技术正迅速发展, 这为理解驾驶人情绪从而避免驾驶人因极端情绪造成交通事故提供了必要条件, 而对驾驶人情绪进行精准理解的前提是阐明驾驶人情绪的脑认知机制。因此, 探明驾驶人情绪认知机制将进一步为情绪诱导、情绪识别、情绪调节提供重要理论支撑, 从而研发汽车智能座舱情绪自适应干预技术, 以提升道路交通安全。

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(52302497)

第一作者: 李文博, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为智能座舱人机交互、驾驶人状态行为分析与建模。

E-mail: wenbo_li@cqu.edu.cn

通信作者: 郭 钢, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能座舱人机交互。E-mail: guogang@cqu.edu.cn



论文
拓展
介绍

国内外学者在情绪的认知机制与表达形式方面展开了大量研究。马庆霞等^[4]指出,左前额皮层和积极情绪有关,右前额皮层和消极情绪有关。王欣等^[5]利用脑电事件相关电位(ERP)研究了厌恶和悲伤情绪的脑区激活区域,发现前额在这2种情绪下被高度激活,并且厌恶情绪还激活了顶叶。Hazelton等^[6]的研究结果表明,情绪认知能力的损害与额叶颞叶的萎缩有关。Koechlin等^[7]发现,额极皮质在情绪认知中起到维持长期情绪状态,并从环境需求中产生更有益的行为或认知序列的作用。Li等^[8]从面部动作单元的角度分析了驾驶人面部表情在动态驾驶场景和静态生活场景下的显著差异。Møller等^[9]发现,极端愤怒会让驾驶人产生如打闪光灯、鸣喇叭、口头威胁、强行超车等与其他车辆对抗的驾驶行为,从而增加驾驶风险。Edward等^[10]研究了驾驶人愤怒的生理变化,发现愤怒情绪会导致人心率增加、心率变异性降低、血压升高、手指温度降低、皮肤电导水平增加以及呼吸频率增加等。Adolphs等^[11]研究了愤怒情绪导致的驾驶人不同大脑区域的激活或失活。Hu等^[12]分析了驾驶人愤怒时的脑电与心电反应,不同愤怒等级与正常状态相比,在 α 频谱、 β 频谱、 δ 频谱、平均心率等指标上有显著差异。

综上,驾驶人的情绪认知机理复杂,表达形式多样。生活场景诱发下与道路交通场景诱发下情绪的表达形式存在差异,而情绪的表达形式与脑认知过程紧密相关^[13],有理由推断这种差异是由不同场景下的脑认知响应不同引起的。然而,现有研究主要集中在针对生活场景诱发的情绪认知响应,尚缺乏2种场景下情绪认知响应差异性对比相关研究。本文旨在探究驾驶人情绪的脑认知响应在道路交通场景和生活场景下的差异,主要工作如下:

(1)设计了道路交通和生活场景下的驾驶人情绪诱导实验,采集了被试在不同场景和情绪作用下前额与外额的脑血氧数据,标定了驾驶人情绪。

(2)分别从离散和连续维度对比了2种场景下驾驶人情绪的脑认知响应差异,开展了结合2种情绪维度的脑认知响应分析。

(3)分析了额叶的前额与外额脑认知响应的激活程度与分工差异,构建了2种场景诱发下驾驶人情绪的脑功能连接。

1 研究综述

1.1 情绪的定义及分类

根据情绪认知理论的观点,情绪反应来源于个人对事件的认知评价^[14],进而又产生了主观体验、生理变化和行为反应^[15]。目前学界普遍认可的情绪分类方式有2种:离散情绪理论和连续情绪理论。Ekman^[16]将人类基本情绪归为离散的6种,即悲伤、愤怒、恐惧、惊讶、厌恶和快乐,这些基本情绪不受文化不同的影响^[17]。连续情绪理论最初使用2个维度^[18]评价:效价和唤醒。效价指的是与情绪有关的愉悦程度,唤醒指的是情绪接收的刺激程度,如:愤怒具有低效价和高唤醒,而悲伤具有低效价和低唤醒。Mehrabian^[19]进一步对情绪模型增加了支配维度来反映人的控制能力,从而更好地地区分具有低效价和高唤醒相同特性的愤怒和恐惧。

1.2 情绪的脑认知响应

Malezieux等^[20]梳理了不同情绪神经回路的特性,包括眶前额皮质、腹内侧前额叶皮质、杏仁核、腹侧海马、下丘脑、脑干、岛叶皮质、伏隔核内侧壳区、腹侧苍白球等。不同大脑区域的激活和失活表明它们在情绪处理中发挥着不同的作用^[21]。大部分情绪总会激活额叶的部分区域^[22-23],额叶结构上可分为外侧部分、极部、眶部(也称基底部或腹侧部)和内侧部。本文主要研究区域为外侧部分和极部、眶部组成的前额部分,以下简称为外额和前额。

1.3 情绪脑认知响应的测量方法

神经影像学技术可以探测不同刺激下的脑部活动,常用的手段包括脑电图(EEG)、脑磁图(MEG)、功能性近红外成像等,优缺点比较如表1所示。本文采用功能性近红外成像技术进行脑认知响应测量。功能性近红外成像技术具有便携、对噪声不敏感、高空间分辨率等特点,适用于采集不同场景诱发情绪下含氧血红蛋白和脱氧血红蛋白浓度变化响

表1 不同神经影像学技术优缺点对比

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages between different neuroimaging techniques

神经影像学技术	优点	缺点	适用范围
脑电图 ^[24]	时间分辨率高,便携,经济	空间分辨率低,信号受噪音影响较大	事件相关电位(ERP)和脑波频谱分析
脑磁图 ^[24]	时间和空间分辨率高,信号质量好	昂贵,维护成本高,无法携带	脑活动的时空动态研究
功能性近红外成像	无创伤,便携,能提供脑血氧信息	穿透深度浅,只能测量大脑皮层活动	脑活动的局部化和功能连接研究

应,探究情绪的脑认知响应。功能性近红外成像技术的工作原理是基于光学吸收谱特性和氧合水平的变化。当大脑处于激活状态时,脑区氧需求量增加,而消耗量无太大变化,使得脑组织含氧血红蛋白浓度增加,脱氧血红蛋白浓度下降。

2 实验数据采集

2.1 被试筛选

共招募了10名被试(男女比例4:1),平均年龄26岁(年龄范围22~31岁),要求被试需持有有效中华人民共和国机动车驾驶证并具有至少1年驾龄,近一年来每周至少有一次驾驶经历。为了更好地获取道路交通场景与生活场景诱发下情绪的脑响应数据,所有被试均为短发,并在实验前24h内作息正常,而且未饮用酒精类饮品与剧烈运动。本研究严格遵循赫尔辛基宣言和《涉及人的生物医学研究国际伦理准则》,并已通过重庆大学附属肿瘤医院医学伦理道德委员会审批。

2.2 实验设备

采用NIRscout功能性近红外光谱平台获取被试的脑部近红外数据,采样频率为7.8125 Hz。采取八光源和七探测器的组合,放置位置如图1所示。该布置方式覆盖了被试的前额区域和外额区域,共采集了20个通道信号。前额有9个通道(S2-D3、S3-D3、S3-D4、S5-D3、S5-D4、S5-D6、S6-D6、S6-D5、S8-D6),外额有11个通道(S1-D1、S1-D2、S2-D1、S3-D2、S4-D2、S4-D4、S4-D5、S6-D5、S7-D5、S7-D7、S8-D7)。

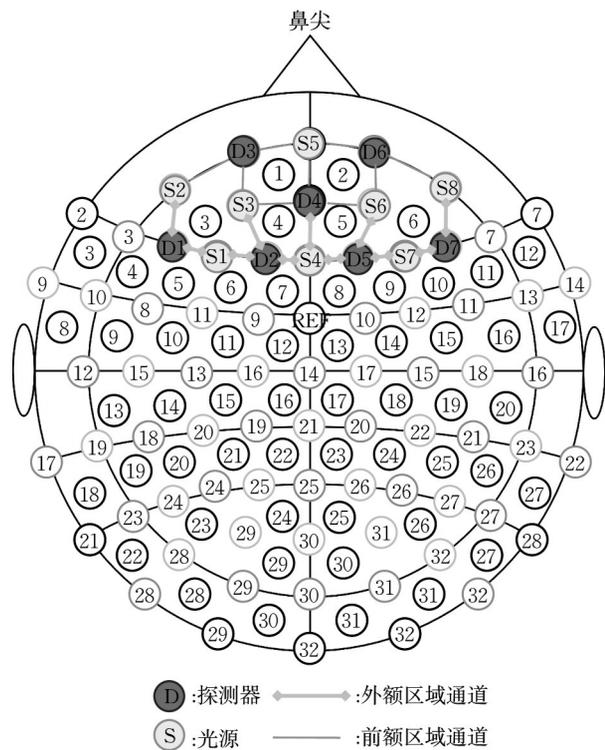


图1 通道布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of channel distribution

2.3 实验过程

10名被试在静态场景下观看道路交通和生活2种场景下的7类情绪诱导视频。为了尽可能消除视频诱导与真实道路交通场景诱导的差异,选取的道路交通场景情绪诱导材料大部分以驾驶人第一视角录制,并且要求被试尽可能代入驾驶人身份去体验场景下的情绪。生活场景下观看的内容是与道路交通场景无关的自然生活场景,情绪诱导素材具体内容如图2、3所示。



图2 道路交通场景情绪诱导素材具体内容

Fig.2 Specific content of emotion induction materials under road traffic scenarios



图3 生活场景情绪诱导素材具体内容

Fig.3 Specific content of emotion induction materials under daily life scenarios

被试准备完成后,主试向被试介绍实验目的、要求和流程,被试签署知情同意书。主试为被试佩戴功能性近红外成像设备并完成调试与校准。

实验正式开始,被试在静态环境下观看2类诱发场景下的悲伤、愤怒、恐惧、惊讶、中性、厌恶、快乐情绪诱导素材,情绪诱导素材由E-prime软件随机触

发,间隔为120 s。在每次情绪诱发后,被试填写连续情绪自我评估量表(SAM)。研究表明,人在受到情绪刺激后2 min左右生理变化会回归正常^[25-26]。因此,量表填写完成后,要求被试休息3 min,待平复心情再进行下一轮情绪诱导。实验现场及布置如图4所示。

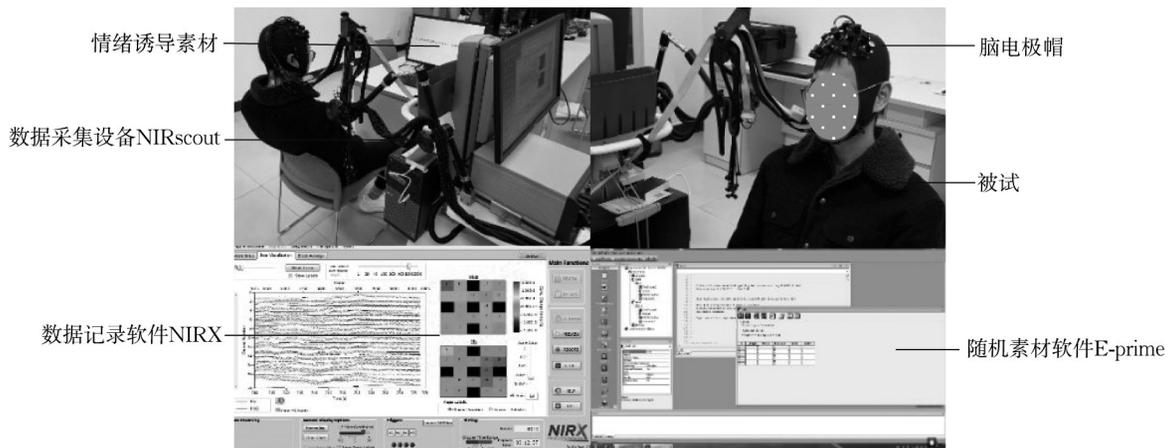


图4 实验现场及布置

Fig.4 Experimental site and layout

2.4 实验数据处理与分析方法

将采集到的原始fNIRs数据根据不同场景(2)、不同情绪(7)划分为14个任务段,并去除运动与尖峰噪声伪影。然后,进行0.01~0.20 Hz带通滤波,并根据修正的Beer-Lambert定律将光强信号转化为血液动力学信号,包括含氧血红蛋白(HbO)与脱氧血红蛋白(Hb)浓度变化。含氧血红蛋白与脱氧血红蛋白浓度变化计算式为:

$$\Delta c_{\text{HbO}} = \frac{\log \frac{I_{b,\lambda_1}}{I_{t,\lambda_1}} \epsilon_{\text{HbO},\lambda_2} - \log \frac{I_{b,\lambda_2}}{I_{t,\lambda_2}} \epsilon_{\text{Hb},\lambda_1}}{dD(\epsilon_{\text{HbO},\lambda_1} \epsilon_{\text{Hb},\lambda_2} - \epsilon_{\text{HbO},\lambda_2} \epsilon_{\text{Hb},\lambda_1})} \quad (1)$$

$$\Delta c_{\text{Hb}} = \frac{\log \frac{I_{b,\lambda_2}}{I_{t,\lambda_2}} \epsilon_{\text{HbO},\lambda_1} - \log \frac{I_{b,\lambda_1}}{I_{t,\lambda_1}} \epsilon_{\text{Hb},\lambda_2}}{dD(\epsilon_{\text{HbO},\lambda_1} \epsilon_{\text{Hb},\lambda_2} - \epsilon_{\text{HbO},\lambda_2} \epsilon_{\text{Hb},\lambda_1})} \quad (2)$$

式中: I_{b,λ_1} 、 I_{b,λ_2} 为基准强度; I_{t,λ_1} 、 I_{t,λ_2} 为瞬时强度; d 为探测器与光源的距离, $d=3.5$ cm; ϵ 为消光系数, $\epsilon_{\text{HbO},\lambda_1}=1486$ L·(mol·cm)⁻¹, $\epsilon_{\text{Hb},\lambda_1}=3843$ L·(mol·cm)⁻¹, $\epsilon_{\text{HbO},\lambda_2}=2526$ L·(mol·cm)⁻¹, $\epsilon_{\text{Hb},\lambda_2}=1798$ L·(mol·cm)⁻¹; D 为差分路径长度因子,选取Essenpreis等^[27]提出的建议值。

相较于脱氧血红蛋白,含氧血红蛋白对生理噪声与刺激引起的血流动力学活动变化更敏感,故需

同时报告这2种指标以减小生理噪声对血流动态响应的影响^[28]。为了减小个体差异,分别将道路交通和生活场景下观看中性视频得到的数据作为基线,计算其余情绪与基线的相对量,并作为统计检验指标。

采用配对样本 t 检验^[29]和独立样本 t 检验^[30]统计学方法(检验量为 t , $p<0.05$ 时认为具有显著性),配对样本 t 检验方法适用于离散情绪样本。连续情绪样本采用k-means方法进行聚类,确定2个场景下的聚类分布,聚类后的连续情绪样本满足独立样本 t 检验的分析要求,2种方法均通过IBM SPSS Statistics version 26.0 (IBM, Armonk, New York)软件对数据进行统计学分析。

为了进一步探究大脑不同通道区域间的协作机制,通过脑功能连接分析了不同场景诱发情绪下额叶不同区域的连接特性。对于单个功能性近红外通道,其指标提取过程如下:

$$W = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,C} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{N,1} & X_{N,2} & \cdots & X_{N,C} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$X_{1,1} = \{x_{1,1}, x_{2,1}, \cdots, x_{n,1}\}, n = tf \quad (4)$$

$$Y_i = \{\overline{X_{1,C}}, \overline{X_{2,C}}, \cdots, \overline{X_{10,C}}\} = \{\overline{x_{1,C}}, \overline{x_{2,C}}, \cdots, \overline{x_{n,C}}\} \quad (5)$$

式中: W 为提取出的指标的数据合集; C 为分割好的

任务段,即诱导的视频数量; N 为被试数量; $X_{N,C}$ 为第 N 个被试观看第 C 个视频下的指标数据,是一个包含时间序列的数据集; n 为某指标数据个数; $x_{n,1}$ 为第1个任务段的数据集合中第 n 个数据值; t 为某指标数据覆盖的时长; f 为设备的采集频率,取7.8125 Hz; Y_i 为第 i 个通道第 C 个任务段第 n 个对应点下所有被试的均值的集合,是一个包含时间序列的数据集; $\overline{x_{n,C}}$ 为某通道下第 C 个任务段第 n 个数据点下所有被试的均值。

每2个通道之间的功能连接强度计算式为^[31]

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{m=1}^n (Y_{i,m} - \overline{Y}_i)(Y_{j,m} - \overline{Y}_j)}{\sqrt{\sum_{m=1}^n (Y_{i,m} - \overline{Y}_i)^2} \sqrt{\sum_{m=1}^n (Y_{j,m} - \overline{Y}_j)^2}} \quad (6)$$

式中: $R_{i,j}$ 为第 i 个通道与第 j 个通道的皮尔逊相关系数,即功能连接强度; $Y_{i,m}$ 为第 i 个通道第 m 个数据; \overline{Y}_i 为第 i 个通道下所有数据的均值。

3 结果及讨论

3.1 道路交通与生活场景诱发下离散情绪的脑功能差异性对比

6种离散情绪含氧血红蛋白浓度变化配对样本 t 检验结果如表2所示。

表2 6种离散情绪含氧血红蛋白浓度变化配对样本 t 检验结果

Tab.2 Paired sample t -test results of Δc_{HbO} for six discrete emotions

情绪	前额含氧血红蛋白浓度变化/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$					外额含氧血红蛋白浓度变化/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$				
	生活_均值	生活_方差	道路_均值	道路_方差	p	生活_均值	生活_方差	道路_均值	道路_方差	p
悲伤	-0.004	0.033	-0.006	0.052	0.852	-0.008	0.032	-0.009	0.054	0.775
愤怒	0.010	0.037	0.545	0.304	0.000*	0.003	0.032	0.617	0.362	0.000*
恐惧	0.027	0.051	0.013	0.044	0.027*	0.013	0.043	0.005	0.035	0.194
惊讶	-0.008	0.048	0.009	0.032	0.007*	-0.013	0.039	0.004	0.032	0.000*
厌恶	0.000	0.041	-0.007	0.067	0.352	0.001	0.039	-0.008	0.047	0.090
快乐	0.015	0.038	-0.001	0.051	0.011*	0.015	0.039	-0.003	0.060	0.008*

注:*表示显著性小于0.05。

(1) 对于愤怒情绪,在前额区域中,与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值($(0.010 \pm 0.037) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)相比,道路交通场景诱发($(0.545 \pm 0.304) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的脑激活程度更高,统计学上显著增加了 $0.535 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(89)=16.596$, $p<0.05$);在外额区域中,与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值($(0.003 \pm 0.032) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)相比,道路交通场景诱发($(0.617 \pm 0.362) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的脑激活程度更高,统计学上显著增加了 0.614

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(109)=18.082$, $p<0.05$)。

(2) 对于恐惧情绪,在前额区域中,与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值($(0.027 \pm 0.051) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)相比,道路交通场景诱发($(0.013 \pm 0.044) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)的脑激活程度更低,统计学上显著减少了 $0.014 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(89)=-2.251$, $p<0.05$),外额区域中没有显著性差异。

(3) 对于惊讶情绪,在前额区域中,与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值($(-0.008 \pm$

0.048) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 道路交通场景诱发 ($(0.009\pm 0.032) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更高, 统计学上显著增加了 $0.017 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(89)=2.742, p<0.05$); 在外额区域中, 与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值 ($(-0.013\pm 0.039) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 道路交通场景诱发 ($(0.004\pm 0.032) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更高, 统计学上显著增加了 $0.017 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(109)=3.734, p<0.05$)。

(4) 对于快乐情绪, 在前额区域中, 与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值 ($(0.015\pm 0.038) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 道路交通场景诱发 ($(-0.001\pm 0.051) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更低, 统计学上显著减少了 $0.016 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(89)=-2.596, p<0.05$); 在外额区域中, 与生活场景诱发

的含氧血红蛋白浓度变化均值 ($(0.015\pm 0.039) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 道路交通场景诱发 ($(-0.003\pm 0.060) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更低, 统计学上显著减少了 $0.018 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(109)=2.719, p<0.05$)。

选取的另一指标脱氧血红蛋白浓度变化在各离散情绪下都没有显著性差异, 悲伤、厌恶2种情绪下的含氧血红蛋白浓度也没有显著性差异。

3.2 道路交通与生活场景诱发下连续情绪的脑功能差异性对比

诱导情绪素材包含7种标签的情绪类型, 为了解决不同情绪类型下的情绪强度差异, 使用了维度观测情绪模型PAD^[19]。2种场景下聚类结果如图5和表3所示。共得到8簇, 2种状态下聚类中心距离最近的2簇可认为含有相似的情绪特征。

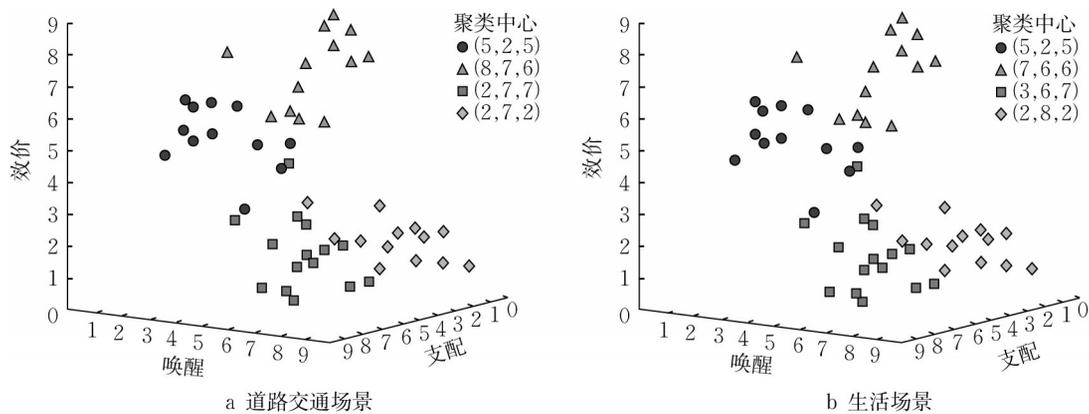


图5 2种场景下的聚类结果

Fig.5 Clustering results of two scenarios

表3 2种场景下的聚类结果

Tab.3 Clustering results of two scenarios

情绪特征	道路交通场景1 聚类结果	生活场景1 聚类结果	道路交通场景2 聚类结果	生活场景2 聚类结果	道路交通场景3 聚类结果	生活场景3 聚类结果	道路交通场景4 聚类结果	生活场景4 聚类结果
效价	5	5	8	7	2	3	2	2
唤醒	2	2	7	6	7	6	7	8
支配	5	5	6	6	7	7	2	2
案例数	18	22	18	17	20	18	14	13

(1) 道路交通场景3与生活场景3的脑功能差异性对比。这2簇有着低效价、高唤醒和高支配的相似情绪特征(见表4)。在前额区域中, 与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值 ($(-0.001\pm 0.043) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 道路交通场景诱发 ($(-0.016\pm 0.051) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更低, 统计学上显著减少了 $0.015 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(322)=-2.957, p<0.05$); 在外额区域中, 与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值 ($(-0.001\pm 0.039) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 道路交通场景

诱发 ($(-0.019\pm 0.046) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更低, 统计学上显著减少了 $0.018 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(394)=-4.221, p<0.05$)。

(2) 道路交通场景4与生活场景4的脑功能差异性对比。这2簇有着低效价、高唤醒和低支配的相似情绪特征。在前额区域中, 与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值 ($(0.024\pm 0.046) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 道路交通场景诱发 ($(0.008\pm 0.051) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更低, 统计学上显著

减少了 $0.016 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(295) = -2.739, p < 0.05$)。在外额区域中,与生活场景诱发的含氧血红蛋白浓度变化均值 ($(0.011 \pm 0.039) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比,道路交通场景诱发 ($(0.002 \pm 0.043) \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 的脑激活程度更低,统计学上显著减少了 $0.009 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($t(361) = -2.175, p < 0.05$)。

表4 相似特征簇含氧血红蛋白浓度变化独立样本 t 检验结果Tab.4 Independent sample t -test results of Δc_{HbO} for similar feature clusters

相似组	前额含氧血红蛋白浓度变化/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$					外额含氧血红蛋白浓度变化/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$				
	生活_均值	生活_方差	道路_均值	道路_方差	p	生活_均值	生活_方差	道路_均值	道路_方差	p
相似组1	0.009	0.029	0.004	0.040	0.360	-0.001	0.028	0.001	0.038	0.773
相似组2	0.000	0.047	0.005	0.046	0.363	-0.001	0.044	0.002	0.053	0.632
相似组3	-0.001	0.043	-0.016	0.051	0.030*	-0.001	0.039	-0.019	0.046	0.000*
相似组4	0.024	0.046	0.008	0.051	0.005*	0.011	0.039	0.002	0.043	0.030*

注:*表示显著性小于0.05。

本文选取的另一指标脱氧血红蛋白浓度变化在连续情绪下都没有显著性差异。此外,含有中效价、低唤醒、中支配情绪特征的簇和含有高效价、中唤醒、中支配情绪特征的簇,在生活和道路交通2种场景下的脑响应数据都没有差异。

4 分析与讨论

对应情绪认知理论,接收外界的刺激后,前额会参与情绪产生过程中有关“自我”的信息加工^[32-33],并调节负性情绪,对负性情绪起抑制作用,随后做出价值评估和决策^[34]。外额与人的辅助运动区紧密相关^[35],主要参与控制情绪的行为反应。

相较于生活场景,道路交通场景下前额与外额激活程度都增强的情绪包括愤怒与惊讶。在愤怒情绪下,前额与外额激活程度明显加强。这可能是由于道路交通场景下的愤怒行为带来的安全风险更高,从而使前额参与了更复杂的认知,即预测失控行为带来的后果,并调节情绪来控制驾驶人行为。此外,道路交通场景诱发下愤怒情绪的行为反应更加具体^[9],如长按喇叭、频繁双闪、言语挑衅、试图超车甚至更危险的动作。道路交通场景诱发下,惊讶的脑激活程度也显著提升。这可能是由于需要长时间把注意力转移到对刺激的分析上,使得驾驶人认知负担加重。同时,外额根据对刺激分析的结果可能会控制更多类型的动作。

相较于生活场景,道路交通场景下前额与外额激活程度都减小的情绪包括快乐以及道路交通场景3和生活场景3与道路交通场景4和生活场景4连续情绪。这可能是由于快乐分散的注意力较少^[36],前额无须过多地参与到刺激的认知与决策中。换句话说,快乐在生活场景下的体验更为强烈,并且伴随着

情绪的行为反应^[37],如嘴角上扬、大笑、眼角周围出现皱纹等。

相较于生活场景,道路交通场景下恐惧情绪的前额与外额激活程度呈现出不同趋势,前额激活程度显著降低,而外额区域无明显变化。这可能是由于道路交通场景下面对的恐惧刺激持续时间极短,前额来不及对自我进行评估并做出决策;外额的激活程度没有变化,可能是由于人类在面对突如其来的恐惧时会表现出行为制动的保护机制^[38]。

相较于生活场景,道路交通场景下悲伤、厌恶2种离散情绪以及道路交通场景1和生活场景1与道路交通场景2和生活场景2 2种连续情绪没有显著性差异,这说明4种情绪在道路交通和生活场景下的脑认知机制相似,如:生活场景下观看地震周年祭和道路交通场景下收听地震伤亡人数,2种场景下带来的悲伤情绪都会削弱注意力范围,外额控制着抿嘴、皱眉、哭泣等动作。

进一步探讨了前额与外额2个区域的脑功能连接特性,如图6所示。由于脱氧血红蛋白浓度变化均值在各类情绪下均无差异,因此不再过多赘述。

相较于生活场景,道路交通场景下愤怒、恐惧、惊讶3种情绪的前额与外额功能连接强度呈上升趋势,表明额叶神经活动增强,血管平滑肌舒张对称,前额与外额协同作用强,信息传递效率上升,并且在进行更为复杂的认知行为。快乐与悲伤2种情绪的前额与外额功能连接强度呈下降趋势,表明额叶神经活动减弱,血管平滑肌收缩和舒张能力不对称,代谢能力减弱,前额与外额协同作用弱^[39]。这可能是由于悲伤和快乐在连续情绪理论中处在效价轴的两极,而在道路交通场景下,驾驶人更加关注刺激的强度与支配中的主导地位,即唤醒轴与支配轴的变化。

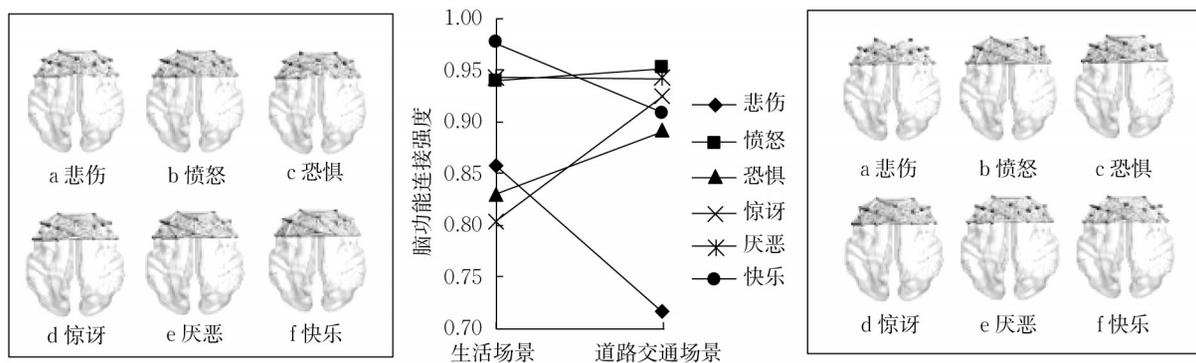


图6 不同情绪诱导下前额与外额的脑功能连接

Fig.6 Functional connectivity between frontal and lateral lobes under different emotions

5 结论

(1)愤怒、惊讶、恐惧、快乐4种离散情绪在道路交通和生活场景诱发下的脑认知响应存在差异。相比于生活场景,道路交通场景下愤怒与惊讶的前额和外额激活程度更高,快乐的前额和外额激活程度更低,恐惧的前额激活程度也更低。

(2)道路交通场景3和生活场景3与道路交通场景4和生活场景4下的情绪脑认知响应存在差异。道路交通场景3与生活场景3下的情绪具有低效价、高唤醒和高支配的特征,道路交通场景4与生活场景4下的情绪具有低效价、高唤醒和低支配的特征。相比于生活场景,道路交通场景下这2种情绪的前额和外额激活程度都更低。

(3)相比于生活场景,道路交通场景下愤怒、恐惧、惊讶3种情绪的前额与外额功能连接强度呈上升趋势,快乐与悲伤2种情绪前额与外额功能连接强度呈下降趋势。

本文部分数据的均值与方差数量级相差过大,这可能是由于所提取的指标是以中性情绪为基线。此外,生活场景3与道路交通场景3为低效价、高唤醒与高支配,得到与对应愤怒情绪相反的结果。这可能是由于样本量不足导致这2簇中包含愤怒与厌恶情绪。已有研究表明,通过视频诱导产生情绪的方法是有效的^[40],但通过观看视频无法完全替代驾驶状态下获得的真实感受,未来应从真实驾驶状态下采集情绪数据集。

作者贡献声明:

李文博:研究设计,论文框架构建,实验数据采集,论文修改。

喻文珑:论文框架构建,数据处理与分析,论文撰写。

吴盈章:数据处理与分析,论文修改。

李承谋:数据处理与分析,论文修改。

李国法:对重要学术性内容做出关键性修订。

郭钢:研究设计,对重要学术性内容做出关键性修订。

参考文献:

- [1] Road traffic injuries [EB/OL]. [2024-02-01]. <https://www.who.int/zh/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.
- [2] 张樵苏. 每8分钟就有1人死于车祸! 交通事故率最高的是这些行为[EB/OL]. [2024-02-01]. http://www.xinhuanet.com/politics/2020-12/02/c_1126809938.htm. ZHANG Qiaosu. One person dies in a traffic accident every 8 minutes! These behaviors have the highest accident rates [EB/OL]. [2024-02-01]. http://www.xinhuanet.com/politics/2020-12/02/c_1126809938.htm.
- [3] LI W, CAO D, TAN R, *et al.* Intelligent cockpit for intelligent connected vehicles: definition, taxonomy, technology and evaluation [J/OL]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023. [2024-01-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10345740>.
- [4] 马庆霞, 郭德俊. 情绪大脑机制研究的进展[J]. *心理科学进展*, 2003(3): 328. MA Qingxia, GUO Dejun. Advances in the research on the emotional brain mechanism [J]. *Psychological Science Progress*, 2003(3): 328.
- [5] 王欣, 靳静娜, 李松, 等. 厌恶与悲伤情境图片诱发负性情绪的脑电机制差异探索[J]. *生物医学工程学杂志*, 2015, 32(6): 1165. WANG Xin, JIN Jingna, LI Song, *et al.* Exploring the differences in EEG mechanisms of negative emotions induced by aversion and sadness context pictures [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2015, 32(6): 1165.
- [6] HAZELTON J L, FITTIPALDI S, FRAILE-VAZQUEZ M, *et al.* Thinking versus feeling: how interoception and cognition influence emotion recognition in behavioural-variant frontotemporal dementia, Alzheimer's disease, and Parkinson's disease [J]. *Cortex*, 2023, 163: 66.
- [7] KOEHLIN E, HYAFIL A. Anterior prefrontal function and

- the limits of human decision-making[J]. *Science*, 2007, 318(5850): 594.
- [8] LI W, CUI Y, MA Y, *et al.* A spontaneous driver emotion facial expression (DEFE) dataset for intelligent vehicles: emotions triggered by video-audio clips in driving scenarios[J]. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2023, 14(1): 747.
- [9] MØLLER M, HAUSTEIN S. Road anger expression-changes over time and attributed reasons [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2018, 119: 29.
- [10] EDWARD F, MARLISSA C, TATJANA A, *et al.* Physiological feelings [J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2019, 103: 267.
- [11] ADOLPHS R, ANDERSON D J. The neuroscience of emotion: a new synthesis[M]. Princeton: Princeton University Press, 2018.
- [12] HU H, ZHU Z, GAO Z, *et al.* Analysis on biosignal characteristics to evaluate road rage of younger drivers: a driving simulator study [C]//2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Piscataway: IEEE, 2018:156-161.
- [13] LINDQUIST K A, WAGER T D, KOBER H, *et al.* The brain basis of emotion: a meta-analytic review[J]. *Behavioral and Brain Sciences*, 2012, 35(3): 121.
- [14] LAZARUS R S. Progress on a cognitive-motivational-relational theory of emotion[J]. *The American Psychologist*, 1991, 46(8): 819.
- [15] FRIJDA N H. The laws of emotion [J]. *American Psychologist*, 1988, 43(5): 349.
- [16] EKMAN P. An argument for basic emotions[J]. *Cognition and Emotion*, 1992, 6(3/4): 169.
- [17] EKMAN P, FRIESEN W V. Constants across cultures in the face and emotion [J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1971, 17(2): 124.
- [18] LANG P J. The emotion probe: studies of motivation and attention[J]. *The American Psychologist*, 1995, 50(5): 372.
- [19] MEHRABIAN A. Pleasure-arousal-dominance: a general framework for describing and measuring individual differences in temperament[J]. *Current Psychology*, 1996, 14(4): 261.
- [20] MALEZIEUX M, KLEIN A S, GOGOLLA N. Neural circuits for emotion [J]. *Annual Review of Neuroscience*, 2023, 46(1): 211.
- [21] DAMASIO A R, GRABOWSKI T J, BECHARA A, *et al.* Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions[J]. *Nature Neuroscience*, 2000, 3: 1049.
- [22] KIRBY L A J, ROBINSON J L. Affective mapping: an activation likelihood estimation (ALE) meta-analysis[J]. *Brain and Cognition*, 2017, 118: 137.
- [23] VYTAL K, HAMANN S. Neuroimaging support for discrete neural correlates of basic emotions: a voxel-based meta-analysis [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2010, 22(12): 2864.
- [24] LOPES DA SILVA F. EEG and MEG: relevance to neuroscience[J]. *Neuron*, 2013, 80(5): 1112.
- [25] LI W, TAN R, XING Y, *et al.* A multimodal psychological, physiological and behavioural dataset for human emotions in driving tasks[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 481.
- [26] LEVENSON R W, CARSTENSEN L L, FRIESEN W V, *et al.* Emotion, physiology, and expression in old age [J]. *Psychology and Aging*, 1991, 6(1): 28.
- [27] ESSENPREIS M, ELWELL C E, COPE M, *et al.* Spectral dependence of temporal point spread functions in human tissues [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(4): 418.
- [28] STOJAN R, VOELCKER-REHAGE C. Neurophysiological correlates of age differences in driving behavior during concurrent subtask performance[J]. *NeuroImage*, 2021, 225: 117492.
- [29] RASCH D, TEUSCHER F, GUIARD V. How robust are tests for two independent samples? [J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2007, 137(8): 2706.
- [30] FRALICK D, ZHENG J Z, WANG B, *et al.* The differences and similarities between Two-sample *T*-test and Paired *T*-test [J]. *Shanghai Archives of Psychiatry*, 29(3): 184.
- [31] FRISTON K J. Functional and effective connectivity in neuroimaging: a synthesis[J]. *Human Brain Mapping*, 1994, 2(1/2): 56.
- [32] YANG Y, RAINE A. Prefrontal structural and functional brain imaging findings in antisocial, violent, and psychopathic individuals: a meta-analysis [J]. *Psychiatry Research*, 2009, 174(2): 81.
- [33] GABRIELI J D E, POLDRACK R A, DESMOND J E. The role of left prefrontal cortex in language and memory [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95(3): 906.
- [34] BLAIR K S, SMITH B W, MITCHELL D G V, *et al.* Modulation of emotion by cognition and cognition by emotion [J]. *NeuroImage*, 2007, 35(1): 430.
- [35] LI W, QIN W, LIU H, *et al.* Subregions of the human superior frontal gyrus and their connections [J]. *NeuroImage*, 2013, 78: 46.
- [36] BARRETT L F, MESQUITA B, OCHSNER K N, *et al.* The experience of emotion[J]. *Annual Review of Psychology*, 2007, 58: 373.
- [37] FRIED I, WILSON C L, MACDONALD K A, *et al.* Electric current stimulates laughter [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 650.
- [38] CARLSON N R. Foundations of behavioral neuroscience [M]. Boston, : Pearson Education, Inc., 2011.
- [39] WU C W, GU H, LU H, *et al.* Frequency specificity of functional connectivity in brain networks [J]. *NeuroImage*, 2008, 42(3): 1047.
- [40] PAVIC K, CHABY L, GRICOURT T, *et al.* Feeling virtually present makes me happier: the influence of immersion, sense of presence, and video contents on positive emotion induction[J]. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 2023, 26(4): 238.