

## 基于实验室的急性应激诱导范式研究进展

许皓 赵艳丽 谭淑平

063210 唐山, 华北理工大学心理与精神卫生学院(许皓、谭淑平); 100096 北京回龙观医院精神医学研究中心(许皓、赵艳丽、谭淑平)

通信作者: 谭淑平, Email: shupingt@126.com

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2023.03.011

**【摘要】** 急性应激与人类的身心健康高度相关, 在实验控制条件下的、标准化的、有效的急性应激诱导范式对上述领域的研究至关重要。近年来, 急性应激诱导范式多样, 效果不一。文章对实验室中的各类急性应激诱导范式的进展进行综述, 对其采用的应激源、实验流程、主要技术和效果进行讨论, 以期对相关领域的研究提供参考。

**【关键词】** 急性应激; 范式; 虚拟现实; 综述

**基金项目:** 北京市医院管理中心登峰计划(DFL20192001); 北京市科技计划(Z191100006619104)

**Research progress on laboratory-based acute stress induction paradigm** Xu Hao, Zhao Yanli, Tan Shuping  
School of Psychology and Mental Health, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China (Xu H, Tan SP); Psychiatry Research Center, Beijing Huilongguan Hospital, Beijing 100096, China (Xu H, Zhao YL, Tan SP)

Corresponding author: Tan Shuping, Email: shupingt@126.com

**【Abstract】** Studies have shown that acute stress is highly related to human physical and mental health. A standardized and effective acute stress induction paradigm under controlled experimental conditions is essential for the research in these fields. However, in recent years, there are various paradigms and different effects of acute stress induction experiments. This paper reviews the progress of various types of acute stress induction paradigms under experimental control, and discusses the stressors, experimental processes, techniques used and their effects, to provide reference for the research in related fields.

**【Key words】** Acute stress; Paradigm; Virtual reality; Review

**Fund programs:** Peak-climbing plan of Beijing Hospital Management Center (DFL20192001); Beijing Science and Technology Plan (Z191100006619104)

急性应激与人类的身心健康息息相关<sup>[1]</sup>。在急性应激状态下, 机体会激活交感神经-肾上腺-髓质(sympathetic adrenal medullary, SAM)轴和下丘脑-垂体-肾上腺(hypothalamic pituitary adrenal, HPA)轴, 先被激活的是SAM轴, 机体会激活大脑中与应激体验相关的杏仁核, 通过下丘脑、自主神经系统快速激活肾上腺髓质, 释放儿茶酚胺(肾上腺素和去甲肾上腺素), 从而引发交感神经兴奋, 表现为心率、血压、皮肤电水平升高、瞳孔增大以及唾液 $\alpha$ 淀粉酶浓度升高, 在几秒钟内使机体进入警戒状态, 即“战或逃”反应; 与此同时, HPA轴的激活使下丘脑向血液中释放促肾上腺皮质激素释放激素, 进而使垂体前叶分泌促肾上腺皮质激素, 导致肾上腺皮质释放出大量的糖皮质激素——皮质醇<sup>[2]</sup>。“战或逃”反应的长期激活会导致生理系统(适应负荷)过度损

耗、自主神经系统活动失衡; HPA轴被反复激活会引起体内皮质醇水平过高, 从而引发各种身心健康问题<sup>[3]</sup>。鉴于急性应激在人类生存与发展中的重要作用, 实验控制条件下的、标准化的、有效的诱导急性应激反应的实验范式的创新与发展至关重要。一个好的急性应激实验应具有不可控、不可预测和社会评价等特点。近年来, 急性应激实验多样, 但激发被试应激反应的应激源, 实验的任务流程、技术手段和实验设备不一, 因此实验效果不尽相同<sup>[4]</sup>。本文旨在对当前实验室诱导急性应激的各类范式的进展进行综述, 以对相关研究予以提示。

### 一、生理应激诱导范式

1. 冷压力测试(Cold Pressor Test, CPT): CPT是最早被使用的急性应激诱导范式之一<sup>[5]</sup>, 主要通过冷水的刺激改变被试稳定的生理状态, 以激发被试

的应激反应。实验中要求被试将一只手放入0~4℃的冰水中3 min左右,同时测量被试的血压、心率、脉搏等指标。研究表明,CPT可以持续地激活交感神经系统,使血压和皮肤电导增加<sup>[6]</sup>。作为单纯生理性应激诱导范式,CPT具有高效、省时省力的优点。也有研究发现,CPT对HPA轴的激活并不稳定<sup>[2]</sup>,因此有学者提出了冷压臂包裹范式(the Cold Pressor Arm Wrap, CPAW)<sup>[7]</sup>。CPAW的实验流程为将冰水装入腕带中,将腕带佩戴于被试动脉血液流量较为丰富的肘腕部以迅速降低体温。实验表明,CPAW可以激活SAM和HPA轴<sup>[8-9]</sup>,但应排除动脉瘤、雷诺氏病、荨麻疹和心脑血管病史等。CPAW具有方便拆卸,利于实验操作的优点,也可应用于神经影像学研究。但目前CPAW的相关研究较少,需要进一步验证该范式的效果<sup>[2]</sup>。

2. 二氧化碳激发实验(CO<sub>2</sub> Challenge Test): Griez等<sup>[10]</sup>首次描述了单次吸入CO<sub>2</sub>后出现的应激反应,吸入35%的CO<sub>2</sub>能够有效地刺激参与人类应激反应的关键大脑中枢,激活SAM和HPA轴系统。该范式包括20 min的休息时间,然后被试接受常规呼吸(正常空气),之后进行测试呼吸(35% CO<sub>2</sub>和65% O<sub>2</sub>)。在每一次呼吸中,要求被试完全吸气,完全呼气,然后快速完全吸气,屏住呼吸4 s,之后呼气。必须注意,在每次呼吸(练习和测试)中,激发的肺活量应保持在相同水平。研究证实,该范式可以引起初始心动过缓(副交感反应),呼吸、血清皮质醇变化(HPA轴反应)、去甲肾上腺素、唾液α淀粉酶和血压增加(SAM反应)<sup>[11]</sup>。CO<sub>2</sub>激发实验是一种安全、无创、有效且可重复的方法<sup>[12-13]</sup>,但该范式会使被试产生短暂的呼吸困难、头晕、轻微焦虑和全身自主神经兴奋等症状,因此应排除患有哮喘、脑出血和心血管等疾病的被试。

3. 其他可用的生理应激诱导范式:(1)冷风实验。在实验室中,让被试站在距离冷风洞40 cm处,将冷风(4℃,60 km/h)吹向其面部3 min,风洞的洞口截面为30 cm×30 cm<sup>[14]</sup>。(2)热应激(heat stress)实验。其在相对湿度为30%,温度为80~90℃的桑拿房中实施,包括准备时间在内的总时长为140 min,共4个阶段,每个阶段桑拿10~15 min,休息15 min;其中第4阶段桑拿完成后休息30 min<sup>[15]</sup>。上述两类范式因其操作复杂,目前研究甚少。

## 二、视觉和听觉应激诱导范式

1. 视频范式: Lazarus<sup>[16]</sup>最早提出视听材料诱导应激的实验方法。创伤电影范式(Trauma Film

Paradigm, TFP)使用真实交通事故视频作为应激源<sup>[17]</sup>,而情绪片段诱发技术通过播放情绪视频片段诱发被试的应激反应<sup>[18]</sup>,如让被试观看一系列身体侵犯和恐怖袭击等暴力电影片段。有学者据此开发了标准化的中国情感电影片段数据库<sup>[19]</sup>。视频诱导范式不会对被试造成真正的躯体威胁,但此类范式的有效性还存在争议<sup>[2,20-21]</sup>。此外,暴露在令人震惊的视听材料中可能会在实验结束后对被试产生不良情绪。

2. 噪声压力(Noise Stress): 该实验要求被试放松10 min后,将其暴露于通过扬声器播出的48~75 dB的城市街道和轨道交通噪声刺激,持续20 min<sup>[22]</sup>。研究表明,在噪声应激条件下,可以显著激活SAM轴(心率变异、去甲肾上腺素分泌、尿液儿茶酚胺水平增加)和HPA(唾液α淀粉酶和唾液皮质醇)轴<sup>[23-24]</sup>。但也有研究表明,噪音激发的皮质醇反应不显著<sup>[25]</sup>,今后需验证该范式在不同被试群体中的效果,以明确其能否作为有效的应激源。

## 三、认知应激诱导范式

1. 计算机化序列加法任务(a modified computer version of the Paced Auditory Serial Addition Task, PASAT-C): 在PASAT实验中要求被试将看到的连续出现的个位数(1~9)中相邻的两个数不断相加,并尽可能快地在备选答案中选出正确答案,一旦选择错误,被试会立即听到一个令人不悦的声音反馈。在测试过程中,程序会不断缩短数字呈现的时间间隔,以提高任务难度。整个任务包括3个阶段,第1阶段3 min,第2阶段5 min,第3阶段10 min,被试可在第3阶段随时退出,总计20 min左右,数字呈现的时间间隔分别为3.0、2.0、1.5 s<sup>[26]</sup>。研究表明,PASAT任务可以有效引起心率、血压的变化<sup>[27]</sup>。此外,也有学者将PASAT任务与其他应激任务相结合,以更好地诱发被试的应激反应<sup>[28]</sup>。

2. 其他认知应激诱导范式: 包括心算任务(the Mental Arithmetic Task, MAT),例如用“2048”不断减去“17”。研究表明,MAT可以激活被试的SAM轴(心率变异<sup>[29]</sup>)和HPA轴(唾液皮质醇<sup>[30]</sup>)。MAT具有操作简便、节省时间和成本的优势,也可与其他应激源相结合以更好地诱发应激<sup>[31-32]</sup>。也有学者使用斯特鲁普测试 Stroop Test)引发的“SROOP”效应,探讨应激的心理反应<sup>[33]</sup>。研究表明,Stroop测试产生的应激效果包括主观情绪反应、心率的增加和胃部活动的抑制<sup>[34]</sup>。但使用单一认知应激源诱导应激反应的研究依然较少,今后需进一步验证此类范式诱发的应激反应。

#### 四、综合应激诱导范式

1. 特里尔社会压力测试(the Trier Social Stress Test, TSST): TSST自1993年以来已逐渐成为诱发社会心理应激的标准范式<sup>[35]</sup>。实验中要求被试扮演求职者角色,告知其将向由3人组成的“选拔委员会”发表演讲,被试的演讲会被录像,以供分析。实验开始时,被试可以看到演讲的场所以及穿着白大褂的评委,要求被试在10 min内准备1篇求职演讲,在准备结束后,被试站在评选委员会面前发表演讲5 min。委员会的成员用标准化应答方式对被试做出回应,然后要求被试大声地进行一系列减法任务,每算错一次都要重新开始。在之后的版本中,范式略有调整,例如评委会改为2人,准备时间变成5 min、演讲5 min、心算5 min<sup>[36]</sup>。目前,该范式还有儿童版(TSST for Children, TSST-C)<sup>[37]</sup>,团体版(TSST for Groups, TSST-G)<sup>[38]</sup>等改编版本。TSST范式将认知应激源与社会评价相结合,具有不可控、不可预测及包含社会评价等特点,可以有效地诱导应激反应,显著激活SAM系统和HPA轴。但该范式对人力需求较大,对实验者要求较高,当被试量较大时,保证实验的一致性存在较大困难。

2. 社会评价的冷压力测试(the Socially Evaluated CPT, SECPT):近10年SECPT被作为一种标准化的、有效的应激诱导范式使用。SECPT是CPT的改良版,将社会评价加入CPT中。在SECPT实验中,要求被试将手臂和肘部浸泡在4℃的冰水中3 min,同时被告知会对其实验过程进行录像,以评估面部表情。期间被试可以随时终止实验,若超过3 min,则会予以提示。有学者总结了21项相关研究,并系统地分析了SECPT的反应曲线<sup>[39]</sup>,结果表明,SECPT可引起被试的主观压力水平、自主神经系统激活和唾液皮质醇浓度的显著增加,其对HPA轴的激活较TSST略差,但SECPT依然是诱导应激和激活自主神经系统的高效范式<sup>[39]</sup>。

3. 马斯特里赫特急性压力测试(The Maastricht Acute Stress Test, MAST):实验包括CPT和MAT两部分。被试到达实验室后,需先休息5 min,接着进行CPT,将手及其手腕浸泡在2℃的冰水中,持续90 s;之后是MAT,让被试从2043开始,不断减去17,持续45 s,越快、越准确越好,反应错误会听到负面声音反馈。CPT和MAT任务均需在10 min内重复4~5次。研究表明,MAST可以有效地引起血压、皮肤电和唾液皮质醇的应激反应<sup>[40-41]</sup>。MAST是一个简单且有效的实验室范式,具有省时省力的优势,将生理和

认知应激源以及社会评价因素相结合,激发的应激反应更加全面,其结合了TSST和CPT的特点,相较于CPT及其变式,可以更有效地激发唾液皮质醇反应<sup>[42]</sup>。

4. 曼海姆多组压力测试(Mannheim Multicomponent Stress Test, MMST):MMST的基本过程是要求被试单独放松15~20 min,然后接受5 min的应激刺激,即呈现持续1 min的消极情绪图片和白噪音,要求被试指出重复的图片(5张消极图片后会出现1张积极图片);此后进行1 min的心算任务,数字按顺序显示在屏幕上,被试需将最近的数字与之前的数字连续相加,期间伴随着白噪音和屏幕中的消极图片;在实验开始前告知被试会获得一些奖励,被试每犯一次错误会给予声音反馈,并扣除部分奖励。研究表明,MMST可以显著增加主观压力等级<sup>[43]</sup>,提高心率<sup>[44]</sup>,激活HPA轴(皮质醇)<sup>[45-46]</sup>。与TSST相比,MMST是一种较为经济、省时、省力的实验范式。

5. 基于虚拟现实(virtual reality, VR)技术的应激诱发范式:(1) 光束通过范式。该范式要求被试带上VR头盔后在虚拟现实场景引导下,在一根固定在地面(宽3.8 cm、高2.5 cm、长3.05 m)的木条上行走。实验中要求被试在保持平衡的情况下,通过光束指引在木条上行走。实验共有3个场景,即现实-高(非虚拟现实场景下在木条上行走)、虚拟现实-低(被试佩戴VR眼镜在木条上行走,在虚拟现实中,木条距离地面2.5 cm)、虚拟现实-高(虚拟现实中,木条距离地面15 m),结果发现,被试在虚拟现实-高场景中的心率、皮肤电活动显著高于虚拟现实-低,而在现实高度和虚拟现实-低中差异无统计学意义。该研究只检测了被试的心率、皮肤电等生理应激<sup>[47]</sup>,未对皮质醇等应激相关的生化指标进行测量。(2) 虚拟现实电梯范式。该范式是研究被试在虚拟现实中乘电梯时的急性应激反应。实验组的场景模拟了从一层坐电梯到达摩天大楼顶层,俯瞰城市,并要求被试毫不犹豫地从小楼高处的平台走下来(就像要掉下去一样);对照组的场景模拟了乘电梯从一层大厅至三层,到达三层后要求被试走出电梯,并看墙上时钟上的时间。结果发现,与对照组相比,实验组中被试的皮肤电导、脉搏、主观压力和焦虑评分显著增加,心率变异性改变,皮质醇浓度上升<sup>[48]</sup>。虚拟现实电梯实验可以产生生理和心理方面的应激反应,但该实验范式对HPA轴(皮质醇反应)的激活效果较带有社会评价的范式要低。(3) 虚拟现实TSST范式(TSST-VR)。该范式是在虚拟现实环境下模拟现实情景的TSST范式,被试在VR环境

下需要进行个人陈述,并接受VR环境下虚拟评委的提问和评价。研究表明,同真实TSST测试类似,TSST-VR也能导致被试的内分泌、自主神经活动和自我报告的应激水平显著增加,且TSST-VR诱发的唾液皮质醇水平与真实TSST相当。这些研究提示尽管个体在虚拟和真实环境下的反应存在细微差异,但虚拟现实下的社会情景应激源也可诱发真实的生理和主观应激反应<sup>[49]</sup>。(4)虚拟现实高空活动范式。该范式包含“体验高空”“高空救猫”“高空避鸟”3个VR环境下的高空应激任务(场景)。实验中,被试戴着VR眼镜站在离地30 cm的长条木板上完成虚拟现实场景下的上述3种任务,并在应激任务前后分别完成n-back测试,结果表明,基于虚拟现实的高空场景能够诱发被试的急性应激反应,达到了与TSST-VR范式相似的应激效果<sup>[50]</sup>。

#### 五、可用于功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)的应激诱导范式

1. 蒙特利尔成像应激任务(the Montreal Imaging Stress Task, MIST): MIST是在fMRI环境中通过一系列的心算任务诱发中度心理应激的实验范式,评估应激对生理和大脑活动的影响<sup>[51]</sup>。MIST的计算机心算程序是四则运算和不同数字分别组合、5个难度依次上升的整数任务。该范式有3个测试条件(静息、实验和对照),可采用组块或事件相关设计。在静息状态下,仅要求被试观看静态屏幕1~3 min。在实验条件下,计算机屏幕会记录被试心算任务的正确率和反应,同时呈现被试自身和他人的平均成绩和剩余时间。任务的难度和时间被设计成刚好超出个体的心理能力,被试若在连续3个任务中回答正确或错误,则完成的平均时间相应减少或增加10%,同时正确率被控制在20%~45%,单次任务完成即出现正确、错误和超时的结果反馈。在对照条件中,被试接受与实验条件相同难度的心算任务,但没有时间限制,也不显示平均成绩,结果表明,与对照和休息条件相比,实验组的唾液皮质醇水平显著升高。但也有研究发现,若重复进行蒙特利尔成像测试(rMIST),第2次及以后则不能引起显著的皮质醇反应<sup>[52]</sup>。

2. 马斯特里赫特急性应激成像试验(imaging Maastricht Acute Stress Test, iMAST): iMAST是MAST的变式<sup>[53]</sup>。在fMRI中无法使用冷水,以热作为刺激源。每次心算测试中,会不规则、无提示地出现1~3次持续10 s的热脉冲(49℃)刺激,从而增加任

务的不可预测性。被试完成任务后,还会对其表现在现场及时评价,以增加被试的心理压力。研究表明,该方法可使被试的唾液皮质醇和主观压力水平显著增加<sup>[54]</sup>。因此,该范式不仅可以有效地激活HPA轴,也为fMRI中实时观察应激状态下的局部大脑活动提供了更加简便易行的方案。

#### 六、总结及展望

早期在实验室中的急性应激诱导范式多使用单一的生理应激源,如CPT、CO<sub>2</sub>激发实验等,可以显著激活SAM轴,但对HPA轴的激活效果存在争议。随着急性应激范式的发展,视听相关范式因对被试没有直接的躯体威胁而逐渐被研究者应用,但其激发的应激效果还有待进一步验证。考虑到产生应激的心理动机因素,认知范式被应用于急性应激实验,如PASAT等,但多与其他应激源结合使用,以更有效地激发应激反应。将生理应激源、认知应激源及社会评价等因素相结合的综合范式因激发的急性应激反应更加全面(可以显著激活SAM和HPA轴),已成为主流,如TSST将认知与社会评价因素相结合,是公认的诱发社会心理应激的标准范式,MAST和MMST则更加省时省力;MIST和iMAST为fMRI环境中研究急性应激状态下脑部活动提供了可行方案。近年来,随着数字技术的不断发展,虚拟现实技术不仅在急性应激实验中得到验证,也在创伤应激障碍和惊恐障碍等疾病的治疗与研究中得到应用<sup>[55-56]</sup>。该技术具有真实感、沉浸感和交互性等特点,呈现的应激场景显著优于传统的平面显示,理论上能激发出更强、更接近真实体验的应激反应,但目前该类实验中使用的场景不同,诱发的应激反应和效果不一,还需进一步开发与验证。另外,可穿戴生理监测设备因其简便、无侵入性等特点,近年来也在研究中得到了发展与应用<sup>[57]</sup>。未来如果将虚拟现实技术与可穿戴生理监测技术结合,可为开发更具生态性的急性应激范式提供新的方向。

**利益冲突** 文章所有作者共同认可文章无相关利益冲突

**作者贡献声明** 构思与设计、审校为谭淑平,论文修订为赵艳丽,资料收集、论文撰写为许皓

#### 参 考 文 献

- [1] Frisone F, Sicari F, Settineri S, et al. Clinical psychological assessment of stress: a narrative review of the last 5 years[J]. Clin Neuropsychiatry, 2021, 18(2): 91-100. DOI: 10.36131/cnfliorteditore20210203.
- [2] 段海军,王雪微,王博韬,等.急性应激:诱发范式、测量指标及效果分析[J].心理科学进展,2017,25(10):1780-1790.

- Duan HJ, Wang XW, Wang BT, et al. Acute stress: induction, measurement and effect analysis[J]. *Advances in Psychological Science*, 2017, 25(10): 1780-1790.
- [ 3 ] O'Connor DB, Thayer JF, Vedhara K. Stress and health: a review of psychobiological processes[J]. *Annu Rev Psychol*, 2021, 72(1): 663-688. DOI: 10.1146/annurev-psych-062520-122331.
- [ 4 ] Rohleder N. Stress and inflammation - the need to address the gap in the transition between acute and chronic stress effects[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2019, 105: 164-171. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2019.02.021.
- [ 5 ] Lovallo W. The cold pressor test and autonomic function: a review and integration[J]. *Psychophysiology*, 1975, 12(3): 268-282. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1975.tb01289.x.
- [ 6 ] Lukacs MJ, Melling C, Walton DM. Exploring the relationship between meaningful conditioned pain modulation and stress system reactivity in healthy adults following exposure to the cold pressor task[J]. *Musculoskelet Sci Pract*, 2022, 57: 102489. DOI: 10.1016/j.msksp.2021.102489.
- [ 7 ] Porcelli AJ. An alternative to the traditional cold pressor test: the cold pressor arm wrap[J]. *J Vis Exp*, 2014, (83): e50849. DOI: 10.3791/50849.
- [ 8 ] Ferreira-Valente A, Pimenta F, Costa RM, et al. COPAHS Study: protocol of a randomised experimental study comparing the effects of hypnosis, mindfulness meditation, and spiritual practices on experimental pain in healthy adults[J]. *BMJ Open*, 2021, 11(2): e040068. DOI: 10.1136/bmjopen-2020-040068.
- [ 9 ] Porcelli AJ, Lewis AH, Delgado MR. Acute stress influences neural circuits of reward processing[J]. *Front Neurosci*, 2012, 6: 157. DOI: 10.3389/fnins.2012.00157.
- [ 10 ] Griez E, Van den Hout MA. Carbon dioxide and anxiety: cardiovascular effects of a single inhalation[J]. *J Behav Ther Exp Psychiatry*, 1983, 14(4): 297-304. DOI: 10.1016/0005-7916(83)90071-x.
- [ 11 ] Vickers K, Jafarpour S, Mofidi A, et al. The 35% carbon dioxide test in stress and panic research: overview of effects and integration of findings[J]. *Clin Psychol Rev*, 2012, 32(3): 153-164. DOI: 10.1016/j.cpr.2011.12.004.
- [ 12 ] Amaral JM, Spadaro PT, Pereira VM, et al. The carbon dioxide challenge test in panic disorder: a systematic review of preclinical and clinical research[J]. *Braz J Psychiatry*, 2013, 35(3): 318-331. DOI: 10.1590/1516-4446-2012-1045.
- [ 13 ] Cosci F, Bertoli G, Mansueto G, et al. The role of anxiety sensitivity and expectancy manipulation on panic-like response to the 35% CO<sub>2</sub> challenge in healthy subjects[J]. *Neuropsychobiology*, 2019, 78(4): 209-217. DOI: 10.1159/000502150.
- [ 14 ] LeBlanc J, Ducharme MB, Thompson M. Study on the correlation of the autonomic nervous system responses to a stressor of high discomfort with personality traits[J]. *Physiol Behav*, 2004, 82(4): 647-652. DOI: 10.1016/j.physbeh.2004.05.014.
- [ 15 ] Kontaxis S, Bailón R, Rapalis A, et al. Autonomic nervous system response to heat stress exposure by means of heart rate variability[C]//2019 Computing in Cardiology (CinC). IEEE, 2019: 1-4. DOI: 10.22489/CinC.2019.197.
- [ 16 ] Lazarus RS. A laboratory approach to the dynamics of psychological stress[J]. *American Psychologist*, 1964, 19(6): 400. DOI: 10.1037/h0041245.
- [ 17 ] James EL, Lau-Zhu A, Clark IA, et al. The trauma film paradigm as an experimental psychopathology model of psychological trauma: intrusive memories and beyond[J]. *Clin Psychol Rev*, 2016, 47: 106-142. DOI: 10.1016/j.cpr.2016.04.010.
- [ 18 ] Hermans EJ, van Marle HJ, Ossewaarde L, et al. Stress-related noradrenergic activity prompts large-scale neural network reconfiguration[J]. *Science*, 2011, 334(6059): 1151-1153. DOI: 10.1126/science.1209603.
- [ 19 ] Ge Y, Zhao G, Zhang Y, et al. A standardised database of Chinese emotional film clips[J]. *Cogn Emot*, 2019, 33(5): 976-990. DOI: 10.1080/02699931.2018.1530197.
- [ 20 ] Trautmann S, Kräplin A, Dieterich R, et al. The role of childhood trauma and stress reactivity for increased alcohol craving after induced psychological trauma: an experimental analogue study[J]. *Psychopharmacology (Berl)*, 2018, 235(10): 2883-2895. DOI: 10.1007/s00213-018-4979-4.
- [ 21 ] Trautmann S, Reineboth M, Trikojat K, et al. Susceptibility to others' emotions moderates immediate self-reported and biological stress responses to witnessing trauma[J]. *Behav Res Ther*, 2018, 110: 55-63. DOI: 10.1016/j.brat.2018.09.001.
- [ 22 ] Wagner J, Cik M, Marth E, et al. Feasibility of testing three salivary stress biomarkers in relation to naturalistic traffic noise exposure[J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2010, 213(2): 153-155. DOI: 10.1016/j.ijheh.2009.08.004.
- [ 23 ] Miyakawa M, Matsui T, Kishikawa H, et al. Salivary chromogranin A as a measure of stress response to noise[J]. *Noise Health*, 2006, 8(32): 108-113. DOI: 10.4103/1463-1741.33951.
- [ 24 ] Nater UM, La Marca R, Florin L, et al. Stress-induced changes in human salivary alpha-amylase activity: associations with adrenergic activity[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2006, 31(1): 49-58. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2005.05.010.
- [ 25 ] Allen AP, Kennedy PJ, Cryan JF, et al. Biological and psychological markers of stress in humans: focus on the Trier Social Stress Test[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2014, 38: 94-124. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2013.11.005.
- [ 26 ] Lejuez CW, Kahler CW, Brown RA. A modified computer version of the Paced Auditory Serial Addition Task (PASAT) as a laboratory-based stressor[J]. *Behav Ther*, 2003, 26(4): 290-293.
- [ 27 ] Trotman GP, Gianaros PJ, Veldhuijzen van Zanten JJ, et al. Increased stressor-evoked cardiovascular reactivity is associated with reduced amygdala and hippocampus volume[J]. *Psychophysiology*, 2019, 56(1): e13277. DOI: 10.1111/psyp.13277.
- [ 28 ] Ernst H, Scherpf M, Malberg H, et al. Pulse arrival time - a sensitive vital parameter for the detection of mental stress[J]. *Curr Direct Biomed Eng*, 2021, 7(2): 419-422. DOI: 10.1515/cdbme-2021-2106.
- [ 29 ] Dimitriev DA, Saperova EV, Indeykina OS, et al. Heart rate variability in mental stress: the data reveal regression to the mean[J]. *Data Brief*, 2019, 22: 245-250. DOI: 10.1016/j.dib.2018.12.014.
- [ 30 ] Feng S, Wang W, Chen L, et al. The influence of depression on coping strategies in mental arithmetic stress[C]//2012 World Congress on Information and Communication Technologies. IEEE, 2012: 1019-1024. DOI: 10.1109/WICT.2012.6409224.
- [ 31 ] McLaughlin C, Schutze R, Pennell C, et al. The anticipatory response to stress and symptoms of depression and anxiety in

- early adulthood[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2022, 136: 105605. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2021.105605.
- [32] Nicolson NA, Peters ML, In den Bosch-Meevissen Y. Imagining a positive future reduces cortisol response to awakening and reactivity to acute stress[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2020, 116: 104677. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2020.104677.
- [33] MacLeod CM. Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review[J]. *Psychol Bull*, 1991, 109(2): 163-203. DOI: 10.1037/0033-2909.109.2.163.
- [34] Delaney JP, Brodie DA. Effects of short-term psychological stress on the time and frequency domains of heart-rate variability[J]. *Percept Mot Skills*, 2000, 91(2): 515-524. DOI: 10.2466/pms.2000.91.2.515.
- [35] Kirschbaum C, Pirke KM, Hellhammer DH. The 'Trier Social Stress Test': a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting[J]. *Neuropsychobiology*, 1993, 28(1-2): 76-81. DOI: 10.1159/000190004.
- [36] Boesch M, Sefidan S, Ehlert U, et al. Mood and autonomic responses to repeated exposure to the Trier Social Stress Test for Groups (TSST-G) [J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2014, 43: 41-51. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2014.02.003.
- [37] Asbrand J, Schmitz J, Krämer M, et al. Effects of group-based CBT on post-event processing in children with social anxiety disorder following an experimental social stressor[J]. *J Abnorm Child Psychol*, 2019, 47(12): 1945-1956. DOI: 10.1007/s10802-019-00558-x.
- [38] von Dawans B, Kirschbaum C, Heinrichs M. The Trier Social Stress Test for Groups (TSST-G): a new research tool for controlled simultaneous social stress exposure in a group format[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2011, 36(4): 514-522. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2010.08.004.
- [39] Schwabe L, Schächinger H. Ten years of research with the Socially Evaluated Cold Pressor Test: data from the past and guidelines for the future[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2018, 92: 155-161. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2018.03.010.
- [40] Ballan R, Gabay Y. Does acute stress impact declarative and procedural learning?[J]. *Front Psychol*, 2020, 11: 342. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.00342.
- [41] Marr C, Quaedflieg C, Otgaar H, et al. Facing stress: no effect of acute stress at encoding or retrieval on face recognition memory[J]. *Acta Psychol (Amst)*, 2021, 219: 103376. DOI: 10.1016/j.actpsy.2021.103376.
- [42] Smeets T, Cornelisse S, Quaedflieg CW, et al. Introducing the Maastricht Acute Stress Test (MAST): a quick and non-invasive approach to elicit robust autonomic and glucocorticoid stress responses[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2012, 37(12): 1998-2008. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2012.04.012.
- [43] Ernst H, Pannasch S, Helmert JR, et al. Cardiovascular effects of mental stress in healthy volunteers[C]//2021 Computing in Cardiology (CinC). IEEE, 2021, 48: 1-4. DOI: 10.23919/CinC53138.2021.9662842.
- [44] Rubaltelli E, Scrimin S, Moscardino U, et al. Media exposure to terrorism and people's risk perception: the role of environmental sensitivity and psychophysiological response to stress[J]. *Br J Psychol*, 2018, 109(4): 656-673. DOI: 10.1111/bjop.12292.
- [45] Kolotylova T, Koschke M, Bär KJ, et al. Development of the "Mannheim Multicomponent Stress Test" (MMST) [J]. *Psychother Psychosom Med Psychol*, 2010, 60(2): 64-72. DOI: 10.1055/s-0028-1103297.
- [46] Reinhardt T, Schmal C, Wüst S, et al. Salivary cortisol, heart rate, electrodermal activity and subjective stress responses to the Mannheim Multicomponent Stress Test (MMST) [J]. *Psychiatry Res*, 2012, 198(1): 106-111. DOI: 10.1016/j.psychres.2011.12.009.
- [47] Peterson SM, Furuichi E, Ferris DP. Effects of virtual reality high heights exposure during beam-walking on physiological stress and cognitive loading[J]. *PLoS One*, 2018, 13(7): e0200306. DOI: 10.1371/journal.pone.0200306.
- [48] Martens MA, Antley A, Freeman D, et al. It feels real: physiological responses to a stressful virtual reality environment and its impact on working memory[J]. *J Psychopharmacol*, 2019, 33(10): 1264-1273. DOI: 10.1177/0269881119860156.
- [49] Zimmer P, Buttlar B, Halbeisen G, et al. Virtually stressed? A refined virtual reality adaptation of the Trier Social Stress Test (TSST) induces robust endocrine responses[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2019, 101: 186-192. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2018.11.010.
- [50] Liu J, Zhang Y, Wang Z, et al. Validation of VR-based immersive high-altitude scene in inducing stress response[C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2019, 63(1): 2257-2261. DOI: 10.1177/1071181319631036.
- [51] Dedovic K, Renwick R, Mahani NK, et al. The Montreal Imaging Stress Task: using functional imaging to investigate the effects of perceiving and processing psychosocial stress in the human brain[J]. *J Psychiatry Neurosci*, 2005, 30(5): 319-325. DOI: 10.1111/j.1600-079X.2005.00261.x.
- [52] De Calheiros Velozo J, Vaessen T, Pruessner J, et al. The repeated Montreal Imaging Stress Test (rMIST): Testing habituation, sensitization, and anticipation effects to repeated stress induction[J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2021, 128: 105217. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2021.105217.
- [53] Quaedflieg CW, Meyer T, Smeets T. The imaging Maastricht Acute Stress Test (iMAST): a neuroimaging compatible psychophysiological stressor[J]. *Psychophysiology*, 2013, 50(8): 758-766. DOI: 10.1111/psyp.12058.
- [54] Wang H, van Leeuwen JMC, de Voogd LD, et al. Mild early-life stress exaggerates the impact of acute stress on corticolimbic resting-state functional connectivity[J]. *Eur J Neurosci*, 2022, 55(9-10): 2122-2141. DOI: 10.1111/ejn.15538.
- [55] Yeh SC, Li YY, Zhou C, et al. Effects of virtual reality and augmented reality on induced anxiety[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2018, 26(7): 1345-1352. DOI: 10.1109/TNSRE.2018.2844083.
- [56] Schweizer T, Renner F, Sun D, et al. Cognitive processing and regulation modulates analogue trauma symptoms in a Virtual Reality paradigm[J]. *Cogn Ther Res*, 2019, 43(1): 199-213. DOI: 10.1007/s10608-018-9967-9.
- [57] Wang L, Liu S, Li G, et al. Interface sensors with skin piezothermic transduction enable motion artifact removal for wearable physiological monitoring[J]. *Biosens Bioelectron*, 2021, 188: 113325. DOI: 10.1016/j.bios.2021.113325.

(收稿日期: 2022-05-24)

(本文编辑: 赵金鑫)