

电生理技术在大气 PM_{2.5} 污染健康风险管控中的应用

施昱琳, 杨建勋, 刘苗苗*, 毕军

(污染控制与资源化国家重点实验室, 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023)

摘要:严峻的大气颗粒物污染导致的能见度下降和城镇灰色景观可能会阻碍居民压力恢复路径, 损害居民身心健康。为研究大气 PM_{2.5} 污染对人体压力恢复的影响, 基于压力恢复理论设计了一项生理心理学实验。随机招募 127 名被试(女性 63 名, 男性 64 名), 并随机分为 6 组(编号为 G10、G30、G50、G100、G160 和 G260), 每组被试在压力恢复阶段分别对对应观看 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值分别为 10, 30, 50, 100, 160 和 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的实景照片。结合压力自评量表和皮肤电、心电等电生理技术测量了被试观看不同环境 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 实景照片时的压力恢复比例。结果显示, G10、G30、G50 组被试的皮肤电水平、心率和心率变异性恢复比例约为 40% ~ 50%, 50% ~ 70% 和 60% ~ 80%, G100、G160、G260 组被试的皮肤电水平、心率和心率变异性恢复比例约为 20% ~ 40%, 10% ~ 40% 和 30% ~ 50%, 即观看 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低于 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 实景照片的被试在 3 min 内的压力恢复比例比观看 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高于 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的实景照片的被试高 20% 以上。基于皮肤电的逐 10 s 压力恢复比例分析显示, 2 min 内的清洁空气照片(G10、G30、G50 组)暴露能使压力恢复至初始水平的 60% 左右, 而暴露时间的增加可能会使被试产生疲劳和厌倦, 从而导致压力恢复比例下降。指出, 电生理技术是对自评量表测量的有力补充, 能够客观、有效地测量压力水平变化, 丰富了开展环境健康风险评估的手段, 可为大气污染心理健康风险管控提供参考和借鉴。

关键词:电生理技术; 细颗粒物; 心理健康; 健康风险

中图分类号: X321; R12

文献标志码: A

文章编号: 1674-6732(2021)05-0060-07

Application of Electrophysiological Technology in Health Risk Control of Atmospheric PM_{2.5} Pollution

SHI Yu-lin, YANG Jian-xun, LIU Miao-miao*, BI Jun

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Visibility decline and urban gray landscape caused by atmospheric particulate pollution may hinder the path of stress recovery and damage the physical and mental health of residents. In order to study the effect of PM_{2.5} pollution on stress recovery, a physio-psychological experiment was designed based on the stress recovery theory. A total of 127 subjects (63 females and 64 males) were recruited and divided into 6 groups (numbered G10, G30, G50, G100, G160 and G260) randomly. During the stress recovery stage, subjects in each group were asked to view actual pictures with average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ values of 10, 30, 50, 100, 160 and 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively. Combined with self-rating stress scale and electrophysiological techniques such as electrodermal activity (EDA) and electrocardiogram (ECG), the stress recovery rates of subjects when watching actual photos of different ambient PM_{2.5} concentration were tested. Results showed that recovery rates of skin conductance level, heart rate and heart rate variability in G10, G30 and G50 groups were about 40% ~ 50%, 50% ~ 70% and 60% ~ 80%, and the recovery rates of skin conductance level, heart rate and heart rate variability in G100, G160 and G260 groups were about 20% ~ 40%, 10% ~ 40% and 30% ~ 50%, that is, subjects exposed to pictures with PM_{2.5} concentration lower than 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ had more than 20% higher stress recovery rates than those exposed to pictures with PM_{2.5} concentration higher than 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Analysis of the changes of skin conductance stress

收稿日期: 2021-06-18; 修订日期: 2021-07-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(71804065); 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目(71921003); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20180350)

作者简介: 施昱琳(1997—), 女, 硕士研究生在读, 主要从事环境生理心理学研究。

* 通讯作者: 刘苗苗 E-mail: liumm@nju.edu.cn

recovery percentage by 10 seconds showed that exposure to clean air photos (group G10, G30 and G50) within 2 minutes could restore the stress to about 60% of initial level, while the increase of exposure time might cause fatigue and boredom, thus leading to the decrease of stress recovery rate. It is pointed out that electrophysiological technology is a powerful supplement to the self-rating scale to measure the changes of stress level objectively and effectively. In addition, application of electrophysiological technology will rich the means of environmental health risk assessment, and provide reference for the mental health risk management and control of air pollution.

Key words: Electrophysiological technology; Fine particulate matter; Mental health; Health risk

0 前言

随着我国工业化和城镇化进程的不断推进,人们在享受巨大发展红利的同时也面临着更加沉重的工作和生活压力。急性压力、慢性压力和压力恢复不足正成为日益严重的社会问题,也是使得居民长期处于亚健康状态的一大诱因^[1]。压力会对人体心脑血管和内分泌系统的活动产生影响,从而导致失眠、生殖健康甚至癌症等一系列身心健康问题^[2]。研究者们通过对视觉环境的生理心理效用的不懈探索发现,暴露于包含蓝天、绿地、湖泊等自然要素的环境能够激活副交感神经系统^[3-4],缓解压力^[5],降低焦虑^[6],促进积极的情绪体验^[7]。Ulrich^[8]认为,这是由于人们对于自然环境存在本能的偏爱,人们能够从自然要素中获取积极的生理和心理效用,阻断消极的认知或行为,因此接触自然能够帮助人们更快地从压力状态中恢复。然而,人体的压力恢复可能会受到城市环境中大气污染和噪声等因素的阻碍。我国正面临严峻的大气颗粒物污染,大气中颗粒物浓度的升高使得能见度下降^[9],天空和景观均被灰霾遮盖,人们从自然环境中获得压力恢复的进程可能受到阻碍。此外,具有强烈视觉冲击的城市灰色景观甚至还可能成为附加的压力源而进一步增加居民的压力水平。近年来,已有研究发现大气污染会降低居民的幸福感知^[10-11],颗粒物污染伴随的能见度下降和城市灰色景观可能导致居民情绪烦躁、压力升高,但是这些结果大多基于心理量表、访谈调查所得的幸福感知数据和空气质量监测数据之间的关联分析获得^[12-13],数据间存在一定的时空不匹配性,而即时的压力水平测量可以较好地控制时空不匹配问题。

人体的压力反应包含心理反应和生理反应 2 个方面,其中心理反应可以通过易于操作的压力测量量表获取,而生理反应则需要通过测量心脑血管和内分泌系统的活动获取。电生理技术的出现和应用使得获取人体处于不同环境时的生理反应成

为可能。电生理技术是指以多种形式的能量刺激生物体,测量、记录和分析生物体发生的电现象和电特性的技术,主要包括皮肤电、肌肉电、心电图、脑电图、眼电图等。电生理技术的应用对研究人员的操作要求较高,但它能排除被试主观意识的影响,从而准确反映被试的客观压力水平^[14]。目前这一手段主要应用于室内设计和户外景观设计领域。研究者们使用电生理技术,通过生理心理学实验广泛测量了自然和城市环境对不同人群压力恢复及身心健康的影响^[15-16]。Ulrich 等^[17]在 20 世纪末设计了一套经典的压力恢复实验范式,使用令人紧张的影片提升被试的压力水平,再将被试暴露于 6 种不同的自然或城市景观进行压力恢复,结果显示观看自然景观的被试相较于观看城市景观的被试呈现出更低的血压和心率。基于这一范式,众多研究者通过自然体验^[18-19]、图片呈现^[20]、虚拟现实^[21-22]等途径探索了不同条件下不同景观的压力恢复效用,然而目前鲜有研究将空气质量作为影响压力恢复的环境要素,大气颗粒物污染对居民压力恢复是否存在影响及其影响程度仍未有充足的生理心理学依据。

为探究大气颗粒物污染对居民压力恢复的影响,现基于压力恢复理论设计了一项生理心理学实验,结合自评压力量表、皮肤电和心电反应测量公众观看不同环境细颗粒物(PM_{2.5})浓度的实景照片进行压力恢复时的压力水平变化,以期电生理技术在大气污染健康风险管控中的应用提供实践基础。

1 研究方法

1.1 实验流程

为科学地测量大气 PM_{2.5} 污染对公众压力恢复的影响,设计了实验流程,见图 1。首先,邀请被试填写知情同意书和贝克抑郁自评量表及状态-特质焦虑问卷。随后,邀请通过抑郁和焦虑测试的被

试进入一个隔声条件良好的实验间佩戴电生理设备并开展正式实验。正式实验分为放松休息、压力诱发和压力恢复 3 个阶段,皮肤电和心电的测量贯穿整个实验过程。在放松休息阶段,被试坐在距离电脑显示屏 60 ~ 65 cm 处听纯音乐舒缓放松 3 min,获取被试的基线压力水平;在压力诱发阶段,为提升压力水平,被试需要在规定时间内完成普通话测试、图片识别和斯特鲁普(Stroop)测试 3

项任务,并在任务结束后获取被试的诱发压力水平;在压力恢复阶段,被试需要连续观看一组实景照片 3 min 并进行放松,从而获取被试暴露于不同的大气 PM_{2.5} 浓度环境照片进行压力恢复时的压力水平变化。在完成每阶段的任务后,被试均需填写压力自评量表。最后,通过问卷采集被试的性别、年龄等人口学信息。

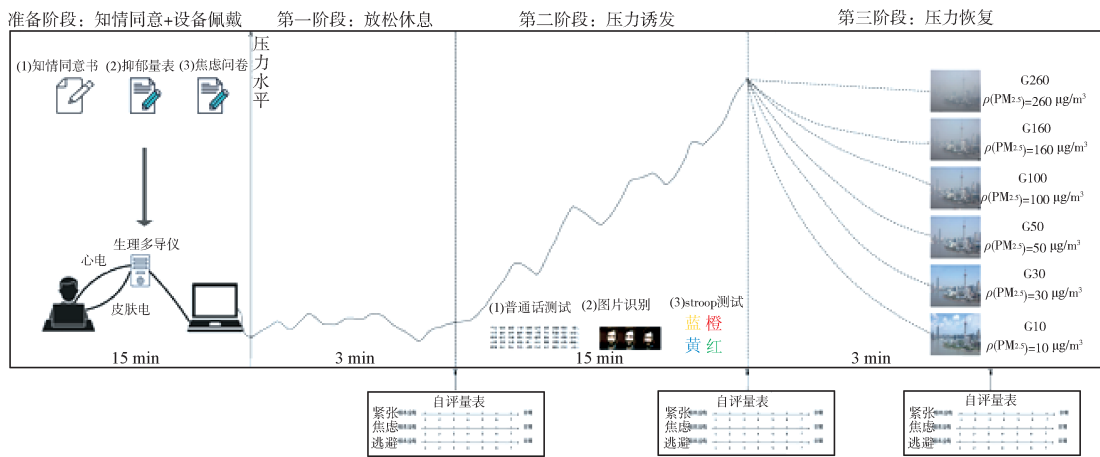


图 1 实验流程

1.2 实验图片选择及分组

为再现大气 PM_{2.5} 污染对能见度的影响,选用 2 个不同来源的大气污染实景照片作为刺激材料,其一为 AMOS (Archive of Many Outdoor Scenes) 开源图片库^[23]中的东方明珠图片,其二为获得授权的社交媒体上的风景照。为消除图片拍摄时雨雾等天气因素的影响,剔除了拍摄当天空气湿度超过 80% 的图片,且选用的所有图片均能清晰地展现城市 and 天空的分界线。为所有选用的图片分别匹配了图片拍摄时拍摄地的 PM_{2.5} 小时监测浓度。共选用了 24 张大气污染实景照片,并用 Photoshop 软件将照片大小统一设置为 1 200 × 800 像素(横屏),随后根据 ρ(PM_{2.5}) 均分为 6 组,分别为 G10、G30、G50、G100、G160、G260,每组包含 4 张图片,其中 G10 组压力恢复阶段刺激图片示例见图 2。所有照片均通过 E - prime 3.0 软件在电脑屏幕上呈现。6 组图片的 ρ(PM_{2.5}) 平均值分别为 10, 30, 50, 100, 160 和 260 μg/m³。随着环境 ρ(PM_{2.5}) 的升高,实景照片中的天空和城市景观逐渐变得灰暗模糊,体现能见度的下降和城市景观的灰色化。根据现行《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 以及

《环境空气质量指数(AQI)技术规定》(HJ 633—2012),这 6 组图片包含优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染 6 个不同的大气污染级别,其中 G10、G30 和 G50 这 3 组实景照片的背景为清洁空气,G100、G160 和 G260 这 3 组实景照片的背景为污染空气。



图 2 G10 组压力恢复阶段刺激图片示例

1.3 实验被试对象

在宁夏固原共随机招募 127 名被试[女性 63

名, 男性 64 名; 年龄: 平均值 (M) = 37.61, 标准差 (SD) = 9.69], 均为右利手, 无心理疾病。所有被试均阅读并签署知情同意书, 并在正式实验前接受了实验程序的告知和培训。所有被试被随机分为 6 组, 每组被试在压力恢复阶段分别观看不同组别的实景照片, 具体分组信息见表 1。

表 1 被试分组信息

被试信息	G10	G30	G50	G100	G160	G260
人数/个	22	21	22	21	20	21
男性比例/%	50	52	45	57	40	57
女性比例/%	50	48	55	43	60	43
年龄/岁 (M ± SD)	35.9 ± 11.5	38.5 ± 9.1	39.6 ± 6.5	35.5 ± 10.3	35.6 ± 10.4	40.4 ± 9.5

1.4 实验设备与方法

实验程序由 E - prime 3.0 软件呈现, 研究中通过压力自评量表、皮肤电和心电图 3 种手段同时测量被试在不同实验阶段的压力水平。

压力自评量表包含紧张、焦虑和逃避 3 个指标, 并采用 7 点量表进行衡量^[24-25]。量表的呈现和被试的按键评分由 E - prime 3.0 记录, 并在实验结束后导出为“.csv”文件进行分析。为综合表征压力水平, 采用自我评价的紧张、焦虑和逃避 3 项指标的均方根作为被试的自评压力水平。

相较于压力自评量表的低时间分辨率, 皮肤电和心电的变化能够反映被试即时的压力水平。选用皮肤电水平、心率和心率变异性指标全部窦性心搏 R - R 标准差 (SDNN) 等生理指标表征被试的客观压力水平。其中, 皮肤电水平是在一段固定时间内被试皮肤电反应的均值, 被认为和紧张、烦躁、焦虑等压力情绪有关^[26]; 心率在临床研究中得到了十分广泛的应用, 被认为与心血管健康和自主神经系统活动有关, 压力水平的提升往往伴随着心率的增加; SDNN 是一项心率变异性指标, 表示全部窦性心搏相邻 R 波峰间期的标准差, 被认为是副交感神经活动的反映, 心率变异性越高, 副交感神经活动越强, 在休息时消除压力相关情绪的能力也越强^[27]。通过以下步骤进行生理数据的采集、处理和分析: 首先使用 MP150 生理信号记录分析系统 (美国 BIOPAC 公司) 和 Acqknowledge 4.2.1 软件采集、记录被试的皮肤电反应和心电图, 然后在 Acqknowledge 5.0 中对原始皮肤电和心电数据进

行预处理, 并从心电数据中提取出心率和心率变异性指标, 之后分别截取 3 个实验阶段最后 10 s 的皮肤电水平、心率和 SDNN 的均值作为该阶段的客观压力水平, 最后将放松休息、压力诱发和压力恢复阶段的压力水平带入公式 (1)^[28] 计算得到压力恢复比例 (SRP, Stress Recovery Percentage)。此外, 为探索被试压力恢复比例的时间变化趋势, 还计算了被试在压力恢复阶段每 10 s 的皮肤电水平恢复比例。

$$SRP_i = \begin{cases} 100, & SL_{\text{recovery},i} < SL_{\text{baseline},i} \\ \frac{SL_{\text{induced},i} - SL_{\text{recovery},i}}{SL_{\text{induced},i} - SL_{\text{baseline},i}}, & SL_{\text{baseline},i} < SL_{\text{recovery},i} < SL_{\text{induced},i} \\ 0, & SL_{\text{recovery},i} > SL_{\text{induced},i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: SRP_i ——被试 i 的压力恢复比例, %; $SL_{\text{baseline},i}$ ——被试 i 在放松休息阶段的压力水平, μS ; $SL_{\text{induced},i}$ ——被试 i 在压力诱发阶段的压力水平, μS ; $SL_{\text{recovery},i}$ ——被试 i 在压力恢复阶段的压力水平, μS 。

2 结果与讨论

2.1 组间差异检验

为检验 6 组被试的基线和诱发压力水平是否存在显著差异, 分别对 6 组被试在放松休息和压力诱发阶段的自评压力水平、皮肤电水平、心率和心率变异性开展了单因素方差分析, 见图 3(a)(b)(c)(d)。结果显示, 6 组被试在放松休息和压力诱发阶段的所有压力指标值均不存在显著的组间差异, 证明了实验分组的随机性。

为检验实验第 2 阶段的压力诱发任务是否显著提升了被试的压力水平, 对被试在放松休息和压力诱发阶段的自评压力水平、皮肤电水平、心率和心率变异性开展了重复测量方差分析, 结果显示, 被试在放松休息阶段的压力水平与压力诱发阶段的自评压力水平 ($p < 0.001$)、皮肤电水平 ($p < 0.001$)、心率 ($p < 0.01$) 和心率变异性 ($p < 0.01$) 均存在显著差异。具体而言, 在完成第 2 阶段的压力诱发任务后, 各组被试的自评压力水平、皮肤电水平和心率均显著提高, 而心率变异性指标 SDNN 显著下降。结果表明, 实验中压力诱发阶段的 3 个任务显著提升了被试的压力水平。

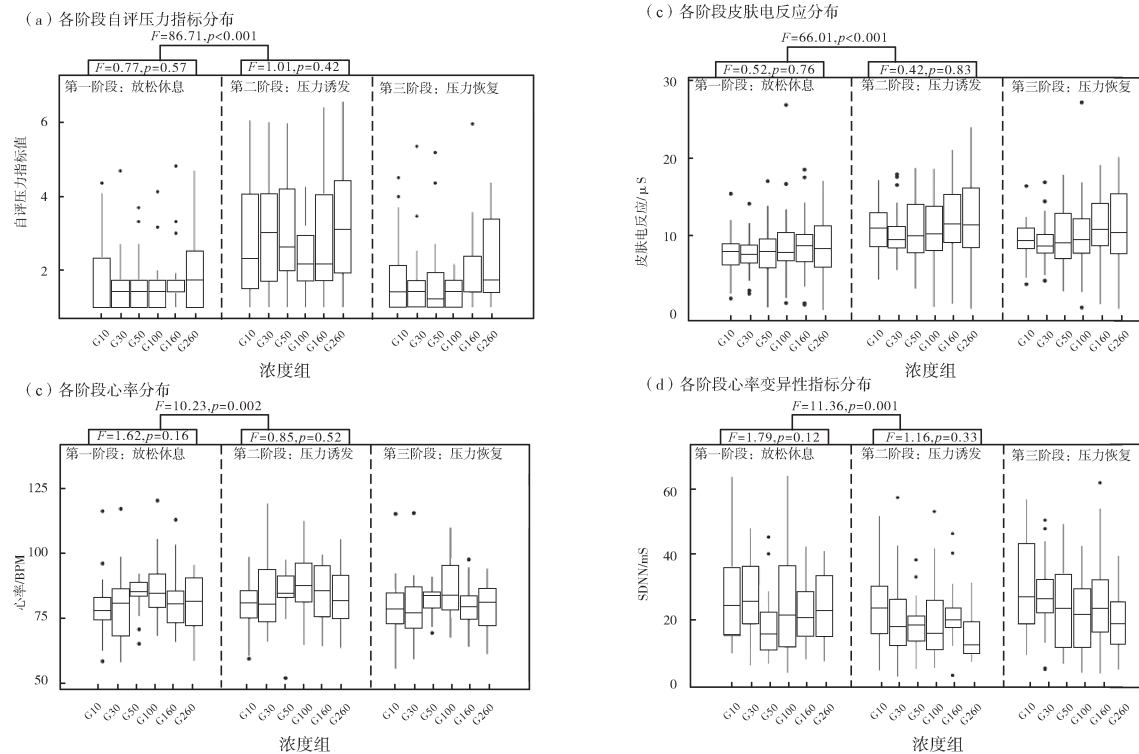


图 3 各阶段压力水平分布

2.2 大气 PM_{2.5} 污染对压力恢复的影响

6 组被试在压力恢复阶段基于压力自评、皮肤电水平、心率和心率变异性的压力恢复比例见图 4 (a)(b)(c)(d)。方差分析的结果显示,6 组被试的自评压力恢复比例不存在显著差异 ($p > 0.1$), 每组被试在观看 3 min 实景照片后自评压力恢复比例的均值均处于 60% ~ 80%。但皮肤电、心率和心率变异性指标的恢复比例呈现出显著的组间差异 ($p < 0.05$)。随着所观看实景照片的大气环境 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的升高, 被试的皮肤电水平、心率和心率变异性恢复比例呈现出逐渐下降的趋势。具体而言, G10、G30 和 G50 这 3 组被试的皮肤电水平、心电和心率变异性恢复比例约为 40% ~ 50%、50% ~ 70% 和 60% ~ 80%, 而 G100、G160 和 G260 这 3 组被试的皮肤电水平、心电和心率变异性恢复比例约为 20% ~ 40%、10% ~ 40% 和 30% ~ 50%, 即观看 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低于 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的实景照片的被试在 3 min 内的压力恢复比例比观看 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高于 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的实景照片的被试高 20% 以上。

此外, 从图 4 所示的基于不同指标的各浓度组压力恢复比例中可以发现, G10、G30 和 G50 这 3 组观看清洁空气图片的被试的自评、皮肤电反应、

心率和心率变异性恢复比例均高于 G100、G160 和 G260 这 3 组观看污染空气图片的被试。方差分析的结果也证明了这一规律, 即相较于观看 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高于 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的实景照片的被试, 观看 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低于 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的实景照片的被试的自评压力水平 ($F = 4.50, p < 0.05$)、皮肤电水平 ($F = 14.84, p < 0.001$)、心率 ($F = 10.33, p < 0.01$) 和心率变异性 ($F = 14.02, p < 0.001$) 的恢复比例显著更高。

为探索大气污染影响压力恢复的时间特征, 将压力恢复阶段的 3 min 均分为 18 段, 获得 6 组被试每 10 s 的皮肤电水平恢复比例, 见图 5。由图 5 可见, 在 3 min 的压力恢复时间内, 除 G50 组被试的压力恢复水平偏高外, 其他各组被试的压力恢复比例随所观看景观图片的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的升高而逐渐降低, 其中 G10 组被试的压力恢复比例超过 40%, 而 G260 组被试的压力恢复比例仅为 20% 左右。值得一提的是, 在压力恢复阶段的前 2 min, 每组被试的压力恢复比例均有明显的上升, 但当观看实景照片的时间超过 2 min 后, 几乎每组被试的压力恢复速率均呈现放缓的趋势, 甚至出现一定程度的压力回升。结果表明, 观看景观照片有助于人群压力恢复, 但大气 PM_{2.5} 污染阻碍了压力恢复, 且长时间

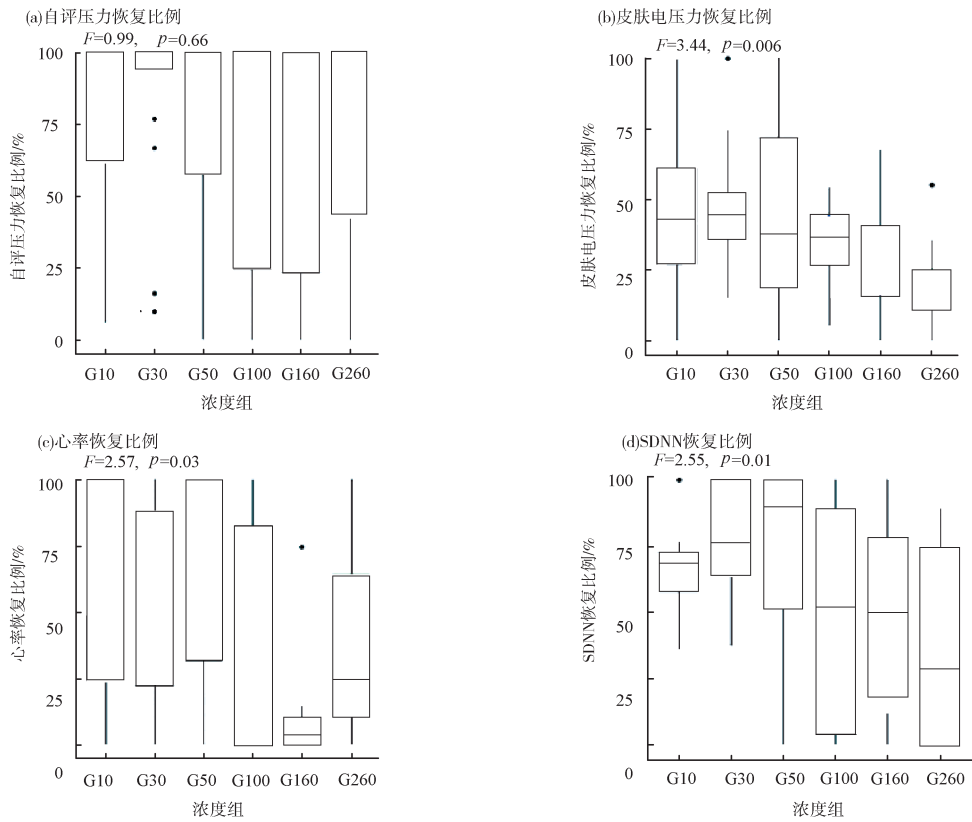


图 4 各浓度组压力恢复比例

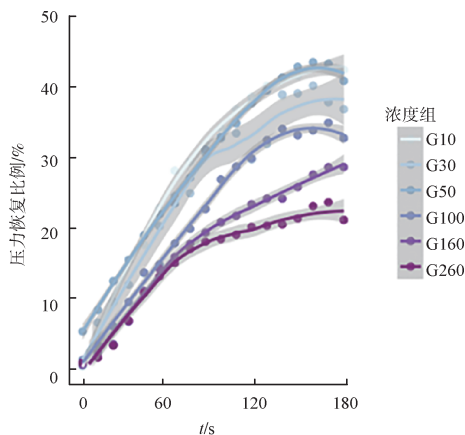


图 5 皮肤电压力恢复趋势

暴露于相似的环境中会增加厌倦和疲劳,影响压力恢复进程。

3 结论与展望

(1)严重的大气 PM_{2.5} 污染将通过降低能见度和塑造灰色景观阻碍人群的压力恢复,被试暴露于污染空气时的压力恢复比例较暴露于清洁空气时低 20% 以上。

(2)基于皮肤电的逐 10 s 压力恢复水平分析显示,2 min 内的清洁空气图片暴露能使压力恢复至初始水平的 60% 左右,而暴露时间的增加可能会使被试产生疲劳和厌倦,从而导致压力恢复比例下降。

(3)皮肤电、心电等电生理技术能够客观、有效地测量压力水平变化,丰富了开展环境健康风险评估的手段,是对自评量表测量的有力补充。通过皮肤电水平、心电、心率变异性等电生理指标准确地识别出了暴露于不同 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的实景照片对压力恢复的差异影响,弥补了自评量表受被试主观意识影响大的不足。

(4)电生理技术拥有更高的时间分辨率,未来可以将其更广泛地应用于大气污染生理健康和心理健康影响研究中,推动环境健康风险的精细化管控,为大气污染健康风险管控目标的制定提供科学支撑。

[参考文献]

[1] TYRVAINEN L, OJALA A, KORPELA K, et al. The influence

- of urban green environments on stress relief measures: A field experiment [J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2014, 38: 1–9.
- [2] BAKER L M, TAYLOR W M. The relationship under stress between changes in skin temperature, electrical skin resistance, and pulse rate [J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1954, 48(5): 361–366.
- [3] PARK B J, TSUNETSUGU Y, KASETANI T, et al. The physiological effects of Shinrin-yoku (taking in the forest atmosphere or forest bathing): Evidence from field experiments in 24 forests across Japan [J]. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2010, 15(1): 18–26.
- [4] GLADWELL V F, BROWN D K, BARTON J L, et al. The effects of views of nature on autonomic control [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2012, 112(9): 3379–3386.
- [5] KORPELA K M, HARTIG T, KAISER F G, et al. Restorative experience and self-regulation in favorite places [J]. *Environment and Behavior*, 2001, 33(4): 572–589.
- [6] MACKAY G J, NEILL J T. The effect of “green exercise” on state anxiety and the role of exercise duration, intensity, and greenness: A quasi-experimental study [J]. *Psychology of Sport and Exercise*, 2010, 11(3): 238–245.
- [7] MAYER F S, FRANTZ C M, BRUEHLMAN-SENECAL E, et al. Why is nature beneficial? The role of connectedness to nature [J]. *Environment and Behavior*, 2009, 41(5): 607–643.
- [8] ULRICH R. Aesthetic and affective response to natural environment [J]. *Human Behavior & Environment: Advances in Theory & Research*, 1983(6): 85–125.
- [9] CHEN X, LI X, YUAN X, et al. Effects of human activities and climate change on the reduction of visibility in Beijing over the past 36 years [J]. *Environment International*, 2018, 116: 92–100.
- [10] ZHANG X, CHEN X, ZHANG X. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(37): 9193–9197.
- [11] ZHENG S, WANG J, SUN C, et al. Air pollution lowers Chinese urbanites’ expressed happiness on social media [J]. *Nature Human Behaviour*, 2019, 3(3): 237–243.
- [12] AMUNDSEN A H, KLAEBOE R, FYHRI A. Annoyance from vehicular air pollution: Exposure-response relationships for Norway [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(33): 7679–7688.
- [13] LLOP S, BALLESTER F, ESTARLICH M, et al. Ambient air pollution and annoyance responses from pregnant women [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(13): 2982–2992.
- [14] 马修·布朗宁, 彭瑟刚·萨布卡特派桑, 姜珊, 等. 虚拟现实技术在绿色基础设施健康效益评估中的应用 [J]. *风景园林*, 2020, 27(9): 35–49.
- [15] BROWN D K, BARTON J L, GLADWELL V F. Viewing nature scenes positively affects recovery of autonomic function following acute-mental stress [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11): 5562–5569.
- [16] TSUNETSUGU Y, LEE J, PARK B-J, et al. Physiological and psychological effects of viewing urban forest landscapes assessed by multiple measurements [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 113: 90–93.
- [17] ULRICH R S, SIMONS R F, LOSITO B D, et al. Stress recovery during exposure to natural and urban environments [J]. *Journal of Environmental Psychology*, 1991, 11(3): 201–230.
- [18] ROE J, MONDSCHHEIN A, NEALE C, et al. The urban built environment, walking and mental health outcomes among older adults: A pilot study [J]. *Frontiers in Public Health*, 2020, 8:575946.
- [19] ASPINALL P, MAVROS P, COYNE R, et al. The urban brain: Analysing outdoor physical activity with mobile EEG [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2015, 49(4): 272–291.
- [20] BROOKS A M, OTTLEY K M, ARBUTHNOTT K D, et al. Nature-related mood effects: Season and type of nature contact [J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2017, 54: 91–102.
- [21] YIN J, ZHU S H, MACNAUGHTON P, et al. Physiological and cognitive performance of exposure to biophilic indoor environment [J]. *Build Environment*, 2018, 132: 255–262.
- [22] YIN J, YUAN J, ARFAEI N, et al. Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: A between-subjects experiment in virtual reality [J]. *Environment International*, 2020, 136: 10.
- [23] JACOBS N, ROMAN N, PLESS R, et al. Consistent temporal variations in many outdoor scenes [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007: 17–22.
- [24] JIANG B, CHANG C Y, SULLIVAN W C. A dose of nature: Tree cover, stress reduction, and gender differences [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 26–36.
- [25] JIANG B, LI D, LARSEN L, et al. A dose-response curve describing the relationship between urban tree cover density and self-reported stress recovery [J]. *Environment and Behavior*, 2016, 48(4): 607–629.
- [26] NOVAK P. Electrochemical skin conductance: A systematic review [J]. *Clinical Autonomic Research*, 2019, 29(1): 17–29.
- [27] SHAFFER F, GINSBERG J P. An overview of heart rate variability metrics and norms [J]. *Frontiers in Public Health*, 2017: 258.
- [28] YANG J X, QU S, LIU M M, et al. Gray cityscape caused by particulate matter pollution hampers human stress recovery [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279:123215.