

有氧运动联合多感官刺激对情绪的改善效益及生理机制

黄煜州 郑哲 张丹璇 沈军 何晓龙

The Effect and Physiological Mechanism of Aerobic Exercise Combined with Multi-sensory Stimulation on Mood Improvement

HUANG Yuzhou, ZHENG Zhe, ZHANG Danxuan, SHEN Jun, HE Xiaolong

在线阅读 View online: <http://tykx.xml-journal.net/article/doi/10.16469/J.css.2025KX034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有氧运动对甲基苯丙胺类依赖者体适能、渴求度及情绪状态的作用

The Impact of Aerobic Exercise on Fitness, Emotional State and Craving among Abstinent Methamphetamine-Dependent Individuals
体育科学. 2017, 37(7): 50-59 <https://doi.org/10.16469/j.css.201707007>

有氧运动对高脂饮食大鼠窦房结神经及心功能的影响

Effect of Aerobic Exercise on Nervous Remolding in Sinus Node and Cardiac Function of Rats with High Fat Diet
体育科学. 2017, 37(12): 64-68 <https://doi.org/10.16469/j.css.201712009>

甲基苯丙胺成瘾者抑制控制损伤的可逆性：有氧运动的改善机制及应用研究进展

Reversibility of Inhibition Control Injury in Methamphetamine Addicts: The Research Progress of the Improvement Mechanism of Aerobic Exercise and Its Application
体育科学. 2021, 41(4): 88-97 <https://doi.org/10.16469/j.css.202104010>

PKC α /Ca ν 1.2在有氧运动改善高血压肠系膜动脉功能中的作用

The Effect of Aerobic Exercise on the Improvement of the Mesenteric Artery Function in Hypertension through PKC α /Ca ν 1.2 Pathway
体育科学. 2019, 39(11): 57-66 <https://doi.org/10.16469/j.css.201911006>

CaN/NFAT信号通路在有氧运动改善高血压心肌肥大中的作用

The Role of CaN/NFAT Signaling Pathway in Aerobic Exercise-induced Improvement of Cardiac Hypertrophy in Hypertension
体育科学. 2018, 38(12): 45-52 <https://doi.org/10.16469/j.css.201812005>

FGF21作为运动因子在有氧运动抑制心梗心肌细胞凋亡中的作用及其机制探讨

The Role and Mechanism of FGF21 as an Exerkines in the Inhibition of Cardiomyocyte Apoptosis by Aerobic Exercise
体育科学. 2018, 38(12): 35-44, 67 <https://doi.org/10.16469/j.css.201812004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



有氧运动联合多感官刺激对情绪的改善效益及生理机制

黄煜州, 郑哲, 张丹璇, 沈军, 何晓龙*

(浙江师范大学体育与健康科学学院, 浙江金华 321004)

摘要:目的:通过两项随机对照实验,探讨中等强度有氧运动联合多感官刺激对情绪的改善效益及生理机制。方法:实验一采用2(时间:前测、后测)×2(仅视觉刺激、视听嗅联合刺激)的双因素混合设计,招募48名被试,随机分组进行10 min中等强度有氧运动实验。鉴于多感官刺激研究中视觉刺激是基础感官刺激方式,实验二在全过程视觉刺激的基础上采用2(时间:前测、后测)×4(联合听觉、嗅觉、先听觉后嗅觉和先嗅觉后听觉刺激)的双因素混合设计,招募64名被试,随机分组进行10 min中等强度有氧运动实验。结果:实验一:1)运动后,视听嗅组的积极情绪得分和消极情绪得分显著优于仅视觉组;2)运动后,视听嗅组的全程相邻R-R间期差的均方根(root mean square of successive differences, RMSSD)、高频功率(high frequency, HF)显著高于仅视觉组,收缩压(systolic pressure, SBP)显著低于仅视觉组。实验二:1)运动后,听觉组的积极情绪得分显著高于嗅觉组与先嗅后听组;2)运动后,听觉组和先听后嗅组的消极情绪得分显著低于嗅觉组;3)嗅觉组与先听后嗅组血压(blood pressure, BP)的均值下降幅度大于听觉组与先嗅后听组,低频功率(low frequency, LF)、HF、RMSSD、正常窦性心搏R-R间期的标准差(standard deviation of the nn intervals, SDNN)的均值下降幅度小于听觉组与先嗅后听组,但未达到显著性水平。结论:中等强度有氧运动联合单一或多感官刺激均能有效缓解消极情绪,但仅多感官刺激能有效提升积极情绪,其生理机制在于能有效降低副交感神经活性耗损程度;有氧运动联合多感官刺激中给予听觉刺激比嗅觉刺激能更好地改善情绪主观体验;仅视觉、听觉和嗅觉3种感官同时受到刺激时,副交感神经活性耗损程度有效降低,接受两种感官刺激时,不同刺激组合或不同刺激顺序的效果均不显著。

关键词:有氧运动;多感官刺激;情绪;自主神经功能

中图分类号:G804.8 **文献标识码:**A

当前,大众精神健康障碍成为公共健康领域重要议题。积极的情绪为心理健康提供了良好的基础,而消极的情绪则可能会导致包括抑郁症和双相情感障碍在内的精神健康障碍(张少华等, 2020; Brickman et al., 2022)。《国务院关于精神卫生工作情况的报告》指出“心理健康是健康的重要组成部分,心理健康和精神卫生问题是关系经济社会发展和人民健康幸福的重大公共卫生问题和社会问题”。因此,情绪改善干预手段的研究,对于提升全民心理健康水平与生活质量具有十分重要的现实意义。

有氧运动和多感官刺激疗法是改善情绪调节和提高心理健康水平的重要干预方式。有氧运动通过促进内啡肽和多巴胺等神经递质的释放,以及降低皮质醇等压力激素的水平实现情绪调节(Bernstein et al., 2017; Schuch et al., 2018)。此外,研究发现,相比于单一视觉或听觉刺激,有氧运动联合多感官刺激(以下简称“多感官整合锻炼”)存在积极的协同效应,能够有效提升情绪效益(Hutchinson et

al., 2017)。在进行身体锻炼时,人体持续接收、检测并利用来自环境的各种信息,如嗅觉、听觉和视觉信息,大脑对这些多感官信息进行整合,以增强锻炼的心理健康效益(Davids et al., 2016; Rogerson et al., 2016; Yeh et al., 2017)。然而,现有研究大多集中在有氧运动结合单一视觉、单一听觉或视听嗅联合刺激,涉及视觉、听觉及嗅觉三者的联合刺激的研究相对较少。基于此,亟待开展有氧运动联合视、听和嗅觉多感官刺激的情绪改善效益研究,并探索其潜在的生理机制。

收稿日期:2025-02-10; 修订日期:2025-04-21

基金项目:国家重点研发计划“主动健康和人口老龄化科技应对”重点专项(2024YFC3607301)。

第一作者简介:黄煜州(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为多感官整合锻炼的健康效益, E-mail: huangyuzhou@163.com。

*通信作者简介:何晓龙(1987-),男,教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为绿色锻炼、多感官整合锻炼健康效益, E-mail: hexiaolong198707@163.com。

1 理论基础

1.1 情绪效益的生理机制基础

目前,情绪状态的判定常通过心理和生理指标的综合评估实现(Gaertner et al., 2023)。在心理层面,主观情绪体验常使用国际积极消极情绪量表短卷版(international positive and negative affect schedule short-form, I-PANAS-SF)进行量化(高景川等, 2023);在生理层面,心率变异性(heart rate variability, HRV)和血压(blood pressure, BP)作为核心指标,被广泛应用于情绪状态的客观评估(李汉森等, 2021)。基于情绪的外周理论,情绪是植物性神经活动的产物,不同性质的情绪可能伴随特异性的外周生理活动(刘飞等, 2010; Damasio et al., 2000; Norman et al., 2014)。情绪可以通过引发一系列生理反应(如HRV和BP的变化)进一步调节情绪体验。具体而言,BP中的收缩压(systolic pressure, SBP)和舒张压(diastolic pressure, DBP)下降均与情绪改善效益有关,情绪的变化可以通过调节压力激素的释放、改变交感神经系统(sympathetic nervous system, SNS)活性影响BP(Bonifácio et al., 2021; Zawadzki et al., 2023)。HRV是一种用于无创评估自主神经系统(autonomic nervous systems, ANS)功能的敏感指标,指逐次心跳周期差异的变化情况,通过分析连续正常R-R间期变化的变异性反映心率变化的程度和规律,常用于研究ANS活动,特别是副交感神经系统(parasympathetic nervous system, PSNS)活性的变化(林华等, 2016; 孙朋等, 2015; 王昊等, 2024)。研究表明,PSNS活性增加代表机体处于放松状态,而SNS活性增加代表机体处于压力、焦虑等不良心理状态(Shaffer et al., 2017)。此外,自然环境刺激对情绪的改善作用在很大程度上与PSNS活动相关(Gaertner et al., 2023)。值得注意的是,急性运动会引起SNS活性升高并抑制PSNS活性,且在运动后短时间内无法完全恢复(Stuckey et al., 2012)。因此,研究如何减少运动后ANS的活性耗损程度和促进其恢复非常重要。基于上述的理论假设和相关研究证据,相比于单一感官刺激,多感官整合锻炼能进一步提高情绪改善效果的生理机制可能在于对ANS功能的调节,尤其是对PSNS活性的积极影响,然而目前尚缺乏基于随机对照实验设计的因果关系证据。

1.2 多感官整合机制

以往研究表明,多感官刺激疗法作为一种重要的非药物手段,对改善人体心理健康,提高情绪效益具有显著效果(黄煜州等, 2024; Thepsatiporn et al., 2024)。传统上,感知被视为一种模块化的功能,不同的感觉方式在很大程度上作为独立的过程运作(Shams et al., 2008)。然而,大量关于感知任务和环境中多感官干预的研究报告表明,各感官之间存在相互作用,这种相互作用是人类处理感官信息的

常态(Scott et al., 2009; Shimojo, 2001)。环境心理学研究表明,自然环境中的多感官刺激(如自然景观的视觉、风声水声的听觉、植物挥发物的嗅觉)可以通过多感官整合机制提高情绪效益(何晓龙等, 2020; Song et al., 2024)。多感官整合是指来自不同感觉通道的信息相互作用并整合为统一的、连贯的和有意义的知觉过程(Tang et al., 2016)。多种感官通道的信息输入不仅增加了检测和正确识别外界信息的概率和速度,还提高了感官敏感性(Chen et al., 2011)。同一感官通道内的不同线索信息和不同感官通道的线索信息通过大脑不同皮层区域之间的交互作用,相互协调、相互补充,以实现和信息更全面、更准确的感知和解释(文小辉等, 2009; Ernst et al., 2004; Scheliga et al., 2023)。

1.3 多感官整合锻炼情绪效益的相关研究

众多研究表明,相较于单独进行有氧运动或仅实施多感官刺激疗法,多感官整合锻炼展现出独特的优势,能够更有效地改善情绪,延缓注意力从分离状态向联想状态的转变,从而在运动过程中促进放松状态的发生,增强身心健康效益(Lezama-Espinosa et al., 2020; Razon et al., 2009; Wang, 2023)。然而,当前此领域仍存在两点局限尚未打破。一方面,不同感官刺激组合存在一定的效益差异,但这一差异尚未在定量水平达成共识。根据数据统计,视觉在人的各种感官中占主导地位,近70%的感知信息源自视觉,这一比例远高于其他感官系统,甚至超过听觉和嗅觉系统的总和(Ernst et al., 2002; Zhang et al., 2022)。因此,现有研究大多聚焦于视觉刺激或视觉联合其他感官的感官刺激组合(Wooller et al., 2018; Zhang et al., 2023)。值得注意的是,视觉刺激与不同感官组成的感官刺激组合产生的情绪效益存在差异(Song et al., 2024)。视觉联合听觉感官刺激组合能够扩大注意力广度,降低前额叶皮层的血红蛋白浓度,增加PSNS活性,从而使人感到更放松、更舒适(Bird et al., 2019; Liu et al., 2020)。Hutchinson等(2015)和Jones等(2014)的研究发现,无论运动强度如何,自然环境视觉刺激联合自然声音或音乐等听觉刺激都能引发更高水平的注意力解离、更低的运动感知和更积极的情感反应。在此基础上,一些学者逐渐将嗅觉纳入多感官干预研究(Murray et al., 2016; Sato et al., 2023)。Song等(2019)发现,自然环境中的嗅觉刺激能够提高生理和心理的放松效果,与视觉刺激存在加性效应。视、听、嗅多感官刺激的同时呈现可以提升参与者的感知质量,从而产生更强的沉浸感,这与情绪状态有关(Birenboim et al., 2019; Chirico et al., 2017; Diemer et al., 2015; Zheng et al., 2024)。目前,尚无确切的结论表明何种基于视觉的联合刺激组合存在更好的情绪效益。另一方面,感官刺激在运动不同阶段的干预效果可能存在一定的效益差异(Ali et al., 2011; Lee et al.,

2017), 但尚且缺乏充分论证。Karageorghis 等(2012)认为, 运动前、中和后阶段听觉刺激扮演不同的角色; Lin 等(2021)发现, 在运动后恢复期给予植物的嗅觉刺激能更好地调节 ANS, 具有缓解压力的作用。目前, 鲜有研究从不同运动阶段存在感官效益差异的角度讨论联合多感官刺激的情绪效益。

综上所述, 本研究旨在通过两项随机对照实验系统探讨中等强度多感官整合锻炼对情绪的改善效益及其生理机制。实验一构建了运动干预的多感官研究框架, 通过对比单一视觉刺激与视听嗅多感官整合刺激的情绪改善效果并分析其生理机制, 验证多感官刺激对 ANS 活性的调节作用, 尤其是对 PSNS 活性的积极影响。基于实验一“单一感官”和“三感官”刺激的情绪效益对比, 实验二进一步探索不同的两两感官刺激组合和不同阶段(运动中与运动后恢复期)刺激顺序的情绪效益及生理机制。

2 实验一: 中等强度有氧运动联合单一视觉刺激和视听嗅多感官刺激的情绪改善效益比较

2.1 研究目的

基于前人研究, 验证中等强度多感官整合锻炼是否比单一自然环境视觉刺激具有更好的情绪改善效益, 并分析其生理机制, 为实验二的开展奠定基础。

2.2 研究对象与方法

2.2.1 实验对象

使用 G*Power 3.1 软件进行样本量估算, 采用重复测量方差分析, 设置效应量=0.25, $\alpha=0.05$, $1-\beta=0.85$, 组数=2, 测量次数=2。最终输出的样本量为 38 人, 每组 19 人。为预防实验误差和数据丢失, 本研究计划招募 48 名被试, 每组 24 人。



图 1 运动干预过程(左)和恢复过程(右)的实验现场照片

Figure 1. Exercise Intervention Process (Left) and the Recovery Process (Right)

2) 听觉刺激内容。实验在实验室环境下进行, 控制实验室的噪音在 40 dB 以下, 并且参与者佩戴耳机(图 1), 进一步降低实验设备可能产生的噪音干扰, 同时避免完全遮蔽听觉带来的不良情绪(Wooller et al., 2015)。听觉刺激内

本研究遵循《世界医学协会赫尔辛基宣言》, 在获得浙江师范大学人体实验伦理委员会的审批(审批号: ZSRT2024123)以及国际临床实验注册平台的成功注册后开始招募被试。为排除潜在干扰, 被试需满足以下条件: 1) 能够进行中等强度的身体活动, 无传染性及慢性非传染性疾病确诊; 2) 无医生建议不宜参加体育运动的情况; 3) 鉴于实验采用 VR 设备, 要求被试为非深度近视者; 3) 无嗅觉或听觉障碍。被试需提前掌握心率带的佩戴方法, 并熟悉功率自行车的操作以及目标心率负荷强度。实验前, 被试需阅读并理解授权的伦理审批文件, 完成身体活动准备问卷(physical activity readiness questionnaire, PAR-Q)(2002 年修订)、生理知情同意书与医学问卷的填写。测试前 3 天内, 被试需避免剧烈运动, 禁止饮用咖啡、酒精和茶等饮料, 同时避免食用过度辛辣的食物。最终纳入 48 名被试, 将被试随机分为 2 组, 每组 24 人。

2.2.2 实验设计

采用 2×2 混合设计。组内自变量为时间(前测、后测), 组间自变量为组别(仅视觉组、视听嗅组), 因变量为情绪(积极性/消极性情绪、BP 和 HRV)。在本研究中, 参与者被随机分配至两个实验组, 随机化过程由受过专业训练的研究人员执行, 以保证分配过程的公正性, 且研究人员和参与者在随机化完成前对分组结果保持盲态。

2.2.3 感官刺激干预内容的选取

1) 视觉刺激内容。本次实验使用 PICO Neo3(北京小鸟看看科技有限公司, 中国)VR 一体机, 将视频内容通过 VR 呈现给被试(图 1)。视觉刺激内容为第一视角骑行视频, 截取其中的 30 min 片段作为自然环境视觉刺激, 视频内容包括穿越各种林地景观的绿道。

容为鸟鸣、风声、水声等自然声音。通过 Beats Solo Pro (Apple Inc., 美国)头戴式降噪耳机播放听觉刺激, 耳机音量控制在 (65 ± 10) dB。

3) 嗅觉刺激内容。由于在常见的直接吸嗅法中, 刺激

源强度可能会随时间推移而逐渐降低,从而导致嗅觉刺激的强度减弱(Patil et al., 2011; Teixeira-Araujo et al., 2017),本研究采用了雾化吸嗅法,将冷杉精油通过 warmbear 暖熊 NX-3 001(扬州暖熊电器实业有限公司,中国)香氛机雾化后,通过固定管道输送给被试(固定管道距被试约 0.5 m),以提供持续的嗅觉刺激(图 1)。已有研究证明,冷杉精油具有促进身心放松的功效(Kim et al., 2022)。此外,嗅觉刺激存在适应现象,这是在持续嗅觉刺激下常见的生理反应,其中嗅觉感受器的敏感度会随暴露时间的增加而逐渐降低(Basevitch et al., 2011)。为了优化测试条件并减少这种适应性下降,本研究通过控制刺激的间歇维持嗅觉的敏锐度(Pellegrino et al., 2017)。因此,采用 5 s 释放与 25 s 暂停的实验设计,减少嗅觉适应现象(Zufall, 2000)。

2.2.4 测量工具

1) 积极性/消极性情绪。本实验使用 I-PANAS-SF 评估情绪状态,该量表的广泛适用性和可靠性已在多项研究中得到验证(Karim et al., 2011; Thompson et al., 2007)。量表包含 10 题,涵盖 5 个正性情绪项(思维敏捷、备受鼓舞、意志坚定、注意力集中、活跃)和 5 个负性情绪项(心烦意乱、充满敌意、害羞、紧张、害怕)。正性题目(积极性情绪)总分越高,代表个体处于积极情绪状态,而负性题目(消极性情绪)总分越高,代表个体处于消极情绪状态。

2) BP。采用欧姆龙 HEM-7 121[欧姆龙健康医疗(中国)有限公司,中国]电子血压计测量被试右上肢的 SBP 和 DBP,要求被试在静坐状态下手臂平放于桌面与心脏同高,上臂尽量裸露或穿薄衣,测量时保持平静呼吸并避免活动,记录稳定读数后间隔 1~2 min 重复测量,最终取两次测量的平均值,并确保前后测使用同一手臂。SBP 与 DBP 的降低与交感神经张力下降和外周阻力降低有关,有助于 ANS 功能的诊断(王昊等, 2024; Stuckey et al., 2012)。

3) HRV。采用 Firstbeat Sports Version 4.7.3.1(Firstbeat Technologies Oy, 芬兰)心率实时监测系统对 HRV 数据进行采集,其准确性和有效性已得到相关研究的验证(Corrales et al., 2012; Nuutila et al., 2017)。以静坐开始后 0~5 min 的 HRV 数据为前测数值,以 BP 后测时间点前 5 min 的 HRV 数据为后测数值。选用 HRV 中的 5 项关键指标:时域指标包括正常窦性心搏 R-R 间期的标准差(standard deviation of the nn intervals, SDNN)、全程相邻 R-R 间期差的均方根(root mean square of successive differences, RMSSD),频域指标包括低频功率(low frequency, LF)、高频功率(high frequency, HF)以及低频功率与高频功率的比值(LF/HF)。这些指标已被证实适用于监测身体锻炼和反映 ANS 功能(Gaertner et al., 2023; Li et al., 2021)。SDNN 反映 SNS 和 PSNS 的总体张力大小, RMSSD 与 HF 反映 PSNS

张力大小, LF 反映 SNS 和 PSNS 的共同作用, LF/HF 反映 SNS 和 PSNS 的平衡状态。

2.2.5 实验过程

实验流程如图 2 所示,实验在浙江师范大学体育运动省级实验教学示范中心进行,测试安排在 9:00—11:00 和 15:00—17:00 两个时间段。被试提前 2~3 天预约,于测试前 10 min 到达测试地点。1) 准备阶段:被试抵达测试地点获知实验流程,阅读伦理审批书、填写实验知情同意书,完成心率带佩戴与调试。2) 前测阶段:采集被试人口社会学变量、日常身体活动水平和前测因变量指标。3) 干预阶段:被试佩戴 VR 设备并连接头戴式蓝牙耳机,进行 10 min 中等强度的室内功率自行车骑行,将骑行的靶心率维持在约 $50\% \times \text{心率储备} + \text{静息心率}$ (高梦茹等, 2024; Rogerson et al., 2016),并根据分组要求,施加相应的感官刺激干预。在骑行过程中要求被试尽量控制呼吸,保持一定的呼吸频率,以减少呼吸频率对 HRV 的影响。4) 后测阶段:骑行结束后恢复期,被试进入另一个结构与干预阶段类似的房间,根据分组要求,施加相应的感官刺激干预。待被试恢复至安静水平(恢复期不少于 10 min 且安静心率能够维持 30 s 以上),采集后测因变量指标。为避免被试运动后即刻静坐导致不适,允许在座椅前站立 1~2 min,待身体缓解后再坐下直至恢复到安静心率水平,恢复期统一提供 300 mL 饮用水。

2.2.6 数据统计与分析

采用 SPSS 26.0 统计软件进行分析,其中 LF/HF 均值采用所有被试 LF/HF 比值总和的均值。夏皮罗-威尔克检验(Shapiro-Wilk test)用于评估所有数据集分布的正态性。所有非正态分布的数据集,使用非参数分析(Mann-Whitney *U* 检验)比较各组间基线测量值;使用广义估计方程分析时间(前测、后测)和组别(仅视觉组、视听嗅组)的主要影响和交互作用。对于正态分布的数据集,采用独立样本 *t* 检验评估各组间基线测量值;使用 2×2 重复测量方差分析评估时间(前测、后测)和组别(仅视觉组、视听嗅组)的主要影响和交互作用。采用 bonferroni 修正两两比较方法定位所有检验的显著差异。连续性变量的描述性结果采用 $M \pm SE$ 表示,统计学显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2.3 结果

2.3.1 被试基本特征

最终完成实验一的有效被试共 48 人(表 1),年龄为 18~26 岁,平均年龄为 23.17 岁。其中,男性和女性各 24 人。

2.3.2 前测数据

各变量前测数据组间差异均无统计学意义($P > 0.05$, 表 2),这表明后续观察到的组间差异可能归因于组别本身的差异。

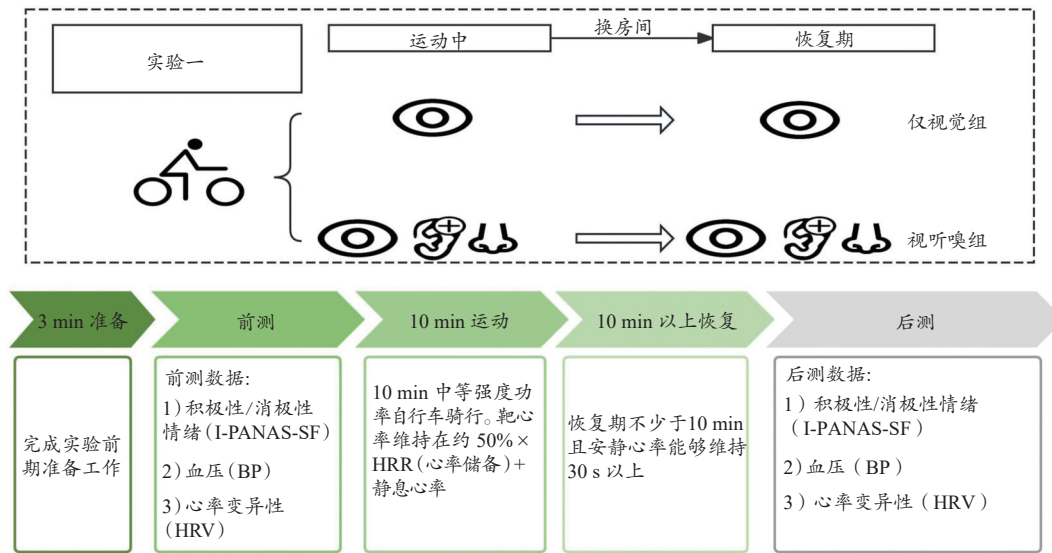


图 2 实验一流程及分组图

Figure 2. Protocol of Experiment 1

表 1 实验一被试基本特征

Table 1 Basic Characteristics of Participants in Experiment 1

变量	仅视觉组(n=24)	视听嗅组(n=24)
男/人	12	12
女/人	12	12
年龄/岁	22.91±0.47	23.41±0.44
身高/cm	170.45±1.76	172.75±1.69
体重/kg	63.25±2.18	67.25±2.80

表 2 实验一因变量指标的前测与后测数据
Table 2 Pre-test and Post-test Data of Dependent Variable Index in Experiment 1

指标	时间	组别	
		仅视觉组	视听嗅组
积极性/消极性情绪 (I-PANAS-SF得分)			
积极情绪得分 ^{ΔΔ#}	前测	14.21±0.85	14.29±0.77
	后测	14.33±0.86	17.58±0.81
消极情绪得分 ^{ΔΔ#}	前测	9.08±0.47	9.17±0.47
	后测	7.42±0.44	6.08±0.22
BP/mmHg			
SBP ^{ΔΔΔ#}	前测	106.21±2.77	105.81±2.22
	后测	102.92±2.30	97.40±1.29
DBP ^Δ	前测	64.17±1.54	64.23±1.39
	后测	63.08±1.35	61.52±1.34
HRV			
SDNN/ms ^Δ	前测	62.63±3.21	61.49±4.04
	后测	47.56±3.78	56.17±4.16
RMSSD/ms ^{ΔΔΔ#}	前测	35.87±2.95	34.53±2.34
	后测	23.20±1.92	31.20±2.16
LF/ms ^{2Δ}	前测	1 937.94±189.94	2 388.08±235.53
	后测	1 656.35±276.08	1 776.17±172.79
HF/ms ^{2ΔΔ#}	前测	1 209.70±168.77	1 193.27±107.70
	后测	678.27±104.16	1 142.57±131.93
LF/HF	前测	2.70±0.33	2.60±0.26
	后测	3.56±0.58	2.42±0.39

注: Δ表示时间主效应显著, ΔP<0.05, ΔΔP<0.01, ΔΔΔP<0.001; #表示时间和组别交互作用显著, #P<0.05, ##P<0.01; 下同。

2.3.3 后测数据

2.3.3.1 积极性/消极性情绪(I-PANAS-SF得分)

1) 积极情绪得分。以时间和组别为自变量、积极情绪得分为因变量进行重复测量方差发现, 时间主效应显著 [$F_{(1, 46)}=10.783, P=0.002, \eta_p^2=0.190$], 组别主效应不显著 ($P=0.117$), 时间×组别交互作用显著 [$F_{(1, 46)}=9.263, P=0.004, \eta_p^2=0.168$]。对时间×组别进行进一步简单效应分析发现, 视听嗅组的积极情绪得分在运动后相比于运动前显著升高 ($P<0.001$), 仅视觉组不显著 ($P=0.866$); 运动后, 视听嗅组的积极情绪得分显著高于仅视觉组 ($P=0.008$) (表 2, 图 3A)。

2) 消极情绪得分。以时间和组别为自变量, 消极情绪得分为因变量进行广义估计方程分析发现, 时间主效应显著 ($Wald \chi_1^2=59.297, P<0.001$), 组别主效应不显著 ($P=0.198$), 时间×组别交互作用显著 ($Wald \chi_1^2=5.275, P=0.022$)。对时间×组别进行进一步简单效应分析发现, 两组的消极情绪得分在运动后相比于运动前均显著降低 ($P<0.001$); 运动后, 视听嗅组的消极情绪得分显著低于仅视觉组 ($P=0.006$) (表 2, 图 3B)。

2.3.3.2 BP

1) SBP。以时间和组别为自变量、SBP 为因变量进行重复测量方差分析发现, 时间主效应显著 [$F_{(1, 46)}=57.076, P<0.001, \eta_p^2=0.554$], 组别主效应不显著 ($P=0.334$), 时间×组别交互作用显著 [$F_{(1, 46)}=10.936, P=0.002, \eta_p^2=0.192$]。对时间×组别进行进一步简单效应分析发现, 仅视觉组 ($P=0.004$) 与视听嗅组 ($P<0.001$) 的 SBP 在运动后相比于运动前显著降低; 运动后, 视听嗅组的 SBP 显著低于仅视觉组 ($P=0.042$) (表 2, 图 4)。

2) DBP。以时间和组别为自变量、DBP 为因变量进行

重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,46)}=6.218, P=0.016, \eta_p^2=0.119$], 组别主效应不显著 ($P=0.685$), 时间×

组别交互作用不显著 ($P=0.291$)。事后检验显示,运动后 DBP 相比于运动前显著降低 ($P=0.016$, 表 2)。

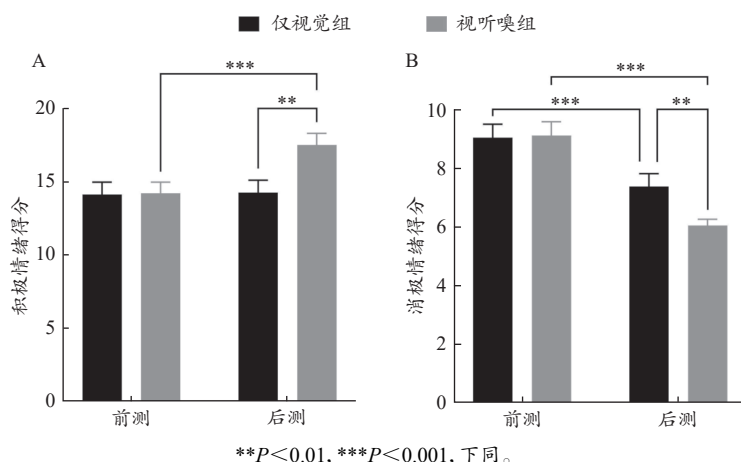


图 3 实验一不同条件下积极与消极情绪得分的变化图

Figure 3. The Variation of Positive and Negative Emotion Scores under Different Conditions in Experiment 1

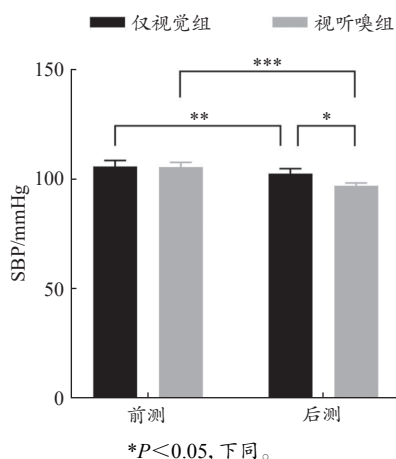


图 4 实验一不同条件下 SBP 的变化图

Figure 4. The Variation of SBP under Different Conditions in Experiment 1

2.3.3.3 HRV

1)SDNN。以时间和组别为自变量、SDNN 为因变量进行重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,46)}=7.039, P=0.011, \eta_p^2=0.133$], 组别主效应不显著 ($P=0.329$), 时间×组别交互作用不显著 ($P=0.211$)。事后检验显示,运动后的 SDNN 相比于运动前显著降低 ($P=0.011$, 表 2)。

2)RMSSD。以时间和组别为自变量、RMSSD 为因变量进行重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,46)}=27.477, P<0.001, \eta_p^2=0.374$], 组别主效应不显著 ($P=0.271$), 时间×组别对 RMSSD 的交互作用显著 [$F_{(1,46)}=9.339, P=0.004, \eta_p^2=0.169$]。对时间×组别进行进一步简单分析发现,仅视觉组的 RMSSD 在运动后相比于运动前显著降低 ($P<0.001$), 视听嗅组不显著 ($P=0.129$); 运动后,仅视觉组的 RMSSD 显著低于视听嗅组 ($P=0.008$) (表 2, 图 5)。

3)LF。以时间和组别为自变量、LF 为因变量进行广义估计方程分析发现,时间主效应显著 ($Wald \chi_1^2=5.771, P=0.016$), 组别主效应不显著 ($P=0.245$), 时间×组别交互作用不显著 ($P=0.374$)。事后检验显示,运动后的 LF 相比于运动前显著降低 ($P=0.016$, 表 2)。

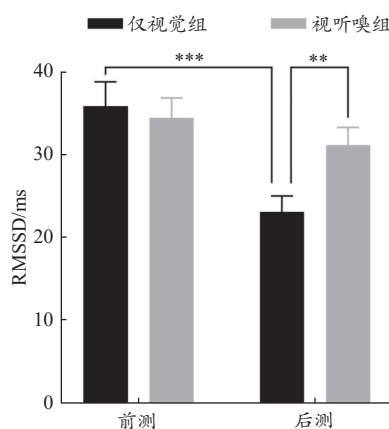


图 5 实验一不同条件下 RMSSD 的变化图

Figure 5. The Variation of RMSSD under Different Conditions in Experiment 1

4)HF。以时间和组别为自变量、HF 为因变量进行广义估计方程分析发现,时间主效应显著 ($Wald \chi_1^2=10.944, P=0.001$), 组别主效应不显著 ($P=0.157$), 时间×组别交互作用显著 ($Wald \chi_1^2=7.463, P=0.006$)。对时间×组别进行进一步简单效应分析发现,仅视觉组的 HF 在运动后相比于运动前显著降低 ($P<0.001$), 视听嗅组不显著 ($P=0.666$); 运动后,仅视觉组的 HF 显著低于视听嗅组 ($P=0.005$) (表 2, 图 6)。

5)LF/HF。以时间和组别为自变量、LF/HF 为因变量进行广义估计方程分析发现,LF/HF 的时间 ($P=0.252$) 和组

别($P=0.191$)主效应均不显著,时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.081$)。

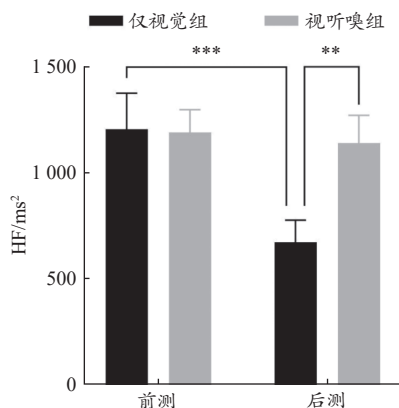


图6 实验一不同条件下 HF 的变化图

Figure 6. The Variation of HF under Different Conditions in Experiment 1

2.4 实验一小结

结果表明,中等强度多感官整合锻炼在提高情绪改善效益方面具有一定的优势。具体而言,中等强度有氧运动联合单一或多感官刺激均能有效缓解消极情绪,但只有多感官刺激才能有效提升积极情绪。这表明多感官刺激能够为运动干预方案提供更优的情绪调节效果。此外,相较于单一视觉刺激,多感官整合锻炼具有更低的 SBP、更高的 HF 与 RMSSD。BP 与 HRV 的变化表明,多感官整合锻炼的情绪改善效益重要生理机制在于能够有效减少 PSNS 活性下降程度(李汉森等, 2021; Gaertner et al., 2023)。这些结果为后续实验二的开展提供了有力的依据和基础,也为运动干预方案的设计提供了新的思路和参考。

3 实验二: 中等强度有氧运动中不同阶段联合不同感官刺激的情绪改善效益比较

3.1 研究目的

在实验一的基础上进一步引出问题:除单一感官刺激或3种感官刺激组合外,两种感官刺激的不同组合或运动中和运动后恢复期两个阶段不同刺激顺序是否对 PSNS 活性耗损程度降低具有积极意义?此外,在常规单一视觉刺激的基础上联合听觉和嗅觉的情绪改善效果是否存在差异?因此,实验二进一步探索两种感官不同刺激组合和不同阶段(运动中与运动后恢复期)刺激顺序的情绪效益及生理机制。

3.2 研究对象与方法

3.2.1 实验对象

实验二被试人数估算同样基于 G*Power3.1 软件,采用重复测量方差分析,设置效应量 $=0.25$, $\alpha=0.05$, $1-\beta=0.85$, 组数 $=4$, 测量次数 $=2$ 。最终输出的样本量为 56 人,每组

14 人。为预防实验误差和数据丢失,本研究计划招募 64 名被试,每组 16 人。实验二对象的伦理审批、临床试验注册和实验注意事项同实验一。最终纳入 64 名被试,将被试随机分为 4 组,每组 16 人。

3.2.2 实验设计

实验二采用 2×4 混合设计。在实验一的基础上,为进一步探索有氧运动中不同时间段联合听觉与嗅觉不同感官刺激组合对情绪的改善效益及其生理机制,实验二的所有组别采用与实验一相同的刺激内容,且都保留了视觉刺激。组内自变量为时间(前测、后测),组间自变量为组别(听觉组、嗅觉组、先听后嗅组和先嗅后听组),因变量为情绪(积极性/消极性情绪、BP 和 HRV)。在本研究中,被试将被随机分配至 4 个实验组:听觉组、嗅觉组、先听后嗅组和先嗅后听组,随机分配方法同实验一。

3.2.3 感官刺激干预内容的选取

同实验一。

3.2.4 测量工具

同实验一。

3.2.5 实验过程

基本流程同实验一(图 7)。

3.2.6 数据统计与分析

采用 SPSS 26.0 统计软件进行分析,其中 LF/HF 均值采用所有被试 LF/HF 比值总和的均值。夏皮罗-威尔克检验用于评估所有数据集分布的正态性。对于非正态分布的数据集,使用非参数分析(Kruskal-Wallis 检验)比较各组间基线测量值;使用广义估计方程分析时间(前测、后测)和组别(听觉组、嗅觉组、先听后嗅组和先嗅后听组)的主要影响和相互作用。对于正态分布的数据集,采用单因素方差分析评估各组间基线测量值;使用 2×4 重复测量方差分析评估时间(前测、后测)和组别(听觉组、嗅觉组、先听后嗅组和先嗅后听组)的主效应和交互作用。采用 bonferroni 修正两两比较方法定位所有检验的显著差异。连续性变量的描述性结果采用 $M\pm SE$ 表示,统计学显著性水平设为 $P<0.05$ 。

3.3 实验二研究结果

3.3.1 被试基本特征

最终完成实验二的有效被试共 64 人(表 3),年龄为 19~27 岁,平均年龄为 23.69 岁。其中,男性和女性各 32 人。

3.3.2 前测数据

各变量前测数据组间差异均无统计学意义($P>0.05$, 表 4),这表明后续观察到的组间差异可能归因于组别本身的差异。

3.3.3 后测数据

3.3.3.1 积极性/消极性情绪(I-PANAS-SF 得分)

1)积极情绪得分。以时间和组别为自变量、积极情

绪得分因变量进行重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,60)}=7.778, P=0.007, \eta_p^2=0.115$],组别主效应不显著 ($P=0.053$),时间 \times 组别交互作用显著 [$F_{(1,60)}=3.785, P=0.015, \eta_p^2=0.159$].对时间 \times 组别进行进一步简单效应分

析发现,听觉组的积极情绪得分在运动后相比于运动前显著升高 ($P<0.001$),其他组别的积极情绪得分均无显著变化 ($P>0.05$);运动后,听觉组的积极情绪得分显著高于嗅觉组 ($P=0.018$)与先嗅后听组 ($P=0.018$) (表4,图8A).

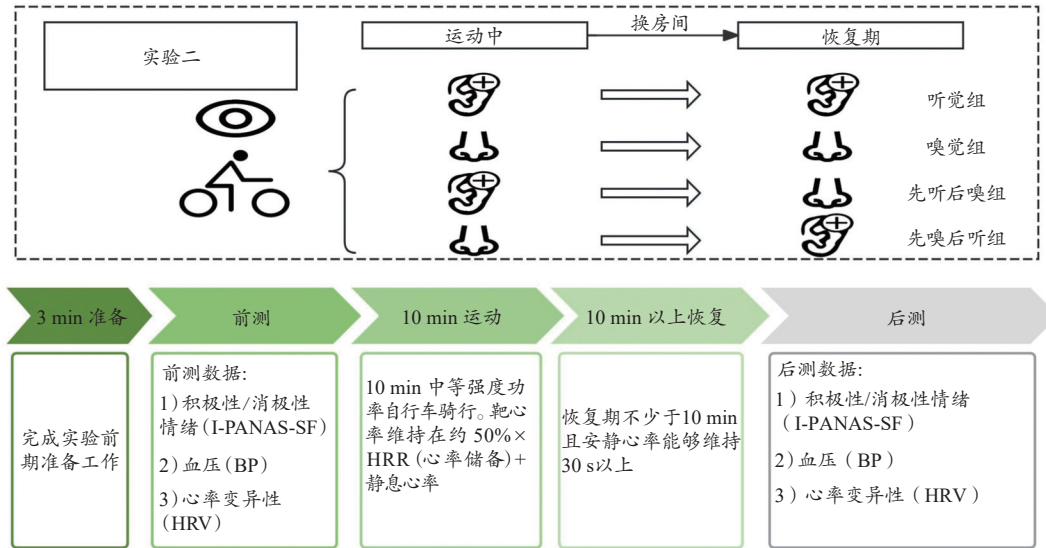


图7 实验二流程及分组图

Figure 7. Protocol of Experiment 2

表3 实验二被试基本特征

Table 3 Basic Characteristics of Participants in Experiment 2

变量	听觉组(n=16)	嗅觉组(n=16)	先听后嗅组(n=16)	先嗅后听组(n=16)
男/人	8	8	8	8
女/人	8	8	8	8
年龄/岁	23.81±0.56	23.93±0.49	23.75±0.60	23.25±0.60
身高/cm	171.43±2.02	170.75±1.98	171.00±2.46	168.87±2.20
体重/kg	65.43±3.03	66.37±3.34	63.81±3.67	62.31±3.11

表4 实验二因变量指标的前测与后测数据

Table 4 Pre-test and Post-test Data of Dependent Variable Index in Experiment 2

M±SE

指标	时间	组别			
		听觉组	嗅觉组	先听后嗅组	先嗅后听组
积极性/消极性情绪(I-PANAS-SF得分)					
积极情绪得分 ^{AA#}	前测	13.44±0.86	13.63±0.81	14.38±0.67	12.69±0.77
	后测	17.13±0.80	13.19±0.95	15.69±0.64	13.19±1.13
消极情绪得分 ^{AAA#}	前测	8.88±0.55	8.25±0.67	8.31±0.47	8.06±0.48
	后测	6.06±0.23	7.69±0.48	6.38±0.44	6.81±0.45
BP/mmHg					
SBP ^{AAA}	前测	104.88±2.49	105.06±2.73	107.00±2.31	107.38±1.67
	后测	99.56±1.41	97.00±1.88	98.19±1.55	100.88±1.35
DBP ^{AA}	前测	64.56±1.49	64.00±1.75	66.13±1.82	64.63±1.44
	后测	64.38±1.07	62.25±1.59	63.31±1.62	63.69±1.36
HRV					
SDNN/ms ^{AAA}	前测	62.35±4.91	58.77±4.64	59.72±3.89	62.62±4.85
	后测	43.02±3.59	51.09±4.27	50.05±2.91	45.58±3.96
RMSSD/ms ^{AAA}	前测	35.40±2.85	37.08±3.66	36.79±3.13	32.63±2.74
	后测	24.92±2.22	34.55±2.84	32.80±2.08	25.65±2.28
LF/ms ^{2AA}	前测	2 420.96±433.79	2 061.85±307.99	2 528.58±395.78	2 152.85±351.86
	后测	1 420.17±293.69	1 742.69±401.49	2 411.98±383.52	1 306.37±211.14
HF/ms ^{2AAA}	前测	1 164.69±252.68	1 338.44±250.31	1 412.47±223.01	1 019.10±160.69
	后测	721.17±108.52	1 297.51±238.38	1 249.81±195.90	682.56±110.63
LF/HF	前测	3.22±0.43	2.57±0.53	2.51±0.38	2.78±0.29
	后测	2.86±0.69	2.23±0.40	2.38±0.30	2.68±0.49

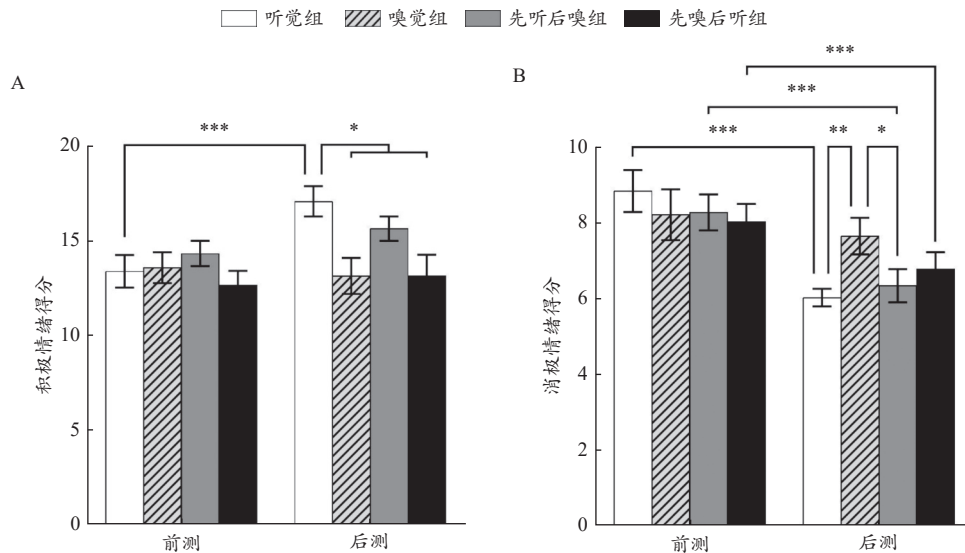


图8 实验二不同条件下积极与消极情绪得分的变化图

Figure 8. The Variation of Positive and Negative Emotion Scores under Different Conditions in Experiment 2

2)消极情绪得分。以时间和组别为自变量、消极情绪得分为因变量进行广义估计方程分析发现,时间主效应显著($Wald \chi_1^2=44.045, P<0.001$),组别主效应不显著($P=0.752$),时间 \times 组别交互作用显著($Wald \chi_1^2=10.668, P=0.014$)。对时间 \times 组别进行进一步简单效应分析发现,听觉组、先听后嗅组和先嗅后听组的消极情绪得分在运动后相比于运动前显著降低($P<0.001$),嗅觉组无显著变化($P=0.363$);运动后听觉组($P=0.002$)和先听后嗅组($P=0.037$)的消极情绪得分显著低于嗅觉组(表4,图8B)。

3.3.3.2 BP

1)SBP。以时间和组别为自变量、SBP为因变量进行重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,60)}=96.404, P<0.001, \eta_p^2=0.616$],组别主效应不显著($P=0.700$),时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.335$)。事后检验显示,运动后的SBP相比于运动前显著降低($P<0.001$,表4)。

2)DBP。以时间和组别为自变量、DBP为因变量进行重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,60)}=8.915, P=0.004, \eta_p^2=0.129$],组别主效应不显著($P=0.874$),时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.253$)。事后检验显示,运动后的DBP相比于运动前显著降低($P=0.004$,表4)。

3.3.3.3 HRV

1)SDNN。以时间和组别为自变量、SDNN为因变量进行重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,60)}=40.677, P<0.001, \eta_p^2=0.404$],组别主效应不显著($P=0.968$),时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.159$)。事后检验显示,运动后的SDNN相比于运动前显著降低($P<0.001$,表4)。

2)RMSSD。以时间和组别为自变量、RMSSD为因变量进行重复测量方差分析发现,时间主效应显著 [$F_{(1,60)}=24.772, P<0.001, \eta_p^2=0.292$],组别主效应不显著($P=0.163$),

时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.106$)。事后检验显示,运动后的RMSSD相比于运动前显著降低($P<0.001$,表4)。

3)LF。以时间和组别为自变量、LF为因变量进行广义估计方程分析发现,时间主效应显著($Wald c_1^2=11.470, P=0.001$),组别主效应不显著($P=0.287$),时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.186$)。事后检验显示,运动后的LF相比于运动前显著降低($P=0.001$,表4)。

4)HF。以时间和组别为自变量、HF为因变量进行广义估计方程分析发现,时间主效应显著($Wald c_1^2=12.986, P<0.001$),组别主效应不显著($P=0.096$),时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.206$)。事后检验显示,运动后的HF相比于运动前显著降低($P<0.001$,表4)。

5)LF/HF。以时间和组别为自变量、LF/HF为因变量进行广义估计方程分析发现,LF/HF的时间($P=0.347$)和组别($P=0.631$)主效应不显著,时间 \times 组别交互作用不显著($P=0.971$,表4)。

3.4 实验二小结

结果发现,听觉组、先听后嗅组与先嗅后听组的消极情绪都具有明显的缓解,而仅有听觉组的积极情绪具有显著改善。这一结果表明多感官整合锻炼中给予听觉刺激对积极情绪的提升和消极情绪的缓解效果更为有效。相比之下,虽然在多感官整合锻炼中给予嗅觉刺激,能在一定程度上缓解消极情绪,但嗅觉刺激的单独情绪缓解效果不明显。听觉刺激能通过影响大脑的情绪处理中心,如颞叶的听觉皮层与边缘系统的直接联系,更快速地引发情绪反应,提升个体的积极情绪体验,并减轻消极情绪(Bigliassi et al., 2018; Bishop et al., 2014)。此外,各组间的生理指标差异均未达到显著性水平,这表明在视觉刺激的基础上,

听觉与嗅觉刺激不同刺激组合和不同阶段刺激顺序对 PSNS 的活性耗损抑制作用均不明显。值得注意的是,嗅觉组和先听后嗅组 BP 的均值下降幅度大于听觉组和先嗅后听组,并且 RMSSD、SDNN、LF、HF 的均值下降幅度小于听觉组和先嗅后听组,提示嗅觉刺激可能存在对 ANS 的潜在调节作用。

4 讨论与分析

4.1 有氧运动联合多感官比单一感官刺激具有更好的情绪效益

实验一通过对比有氧运动联合单一自然环境视觉刺激和联合自然环境视听嗅觉多感官刺激,验证有氧运动中多感官刺激对情绪的改善效益及其生理机制。实验一结果显示,中等强度有氧运动联合单一或多感官刺激均能有效降低消极情绪得分,但只有联合多感官刺激能的积极情绪得分显著提高。这一结果表明多感官整合锻炼对参与者的情绪效益有着积极作用,该结果与前人的研究类似(Wooller et al., 2015)。相比于单一感官刺激,多感官整合锻炼有助于促进注意力分离,从而对情绪产生积极作用以及提高运动体验(Bird et al., 2019; Hutchinson et al., 2017)。不同感官的信息在大脑中通过不同的路径传递,当这些信息在时间上和空间上一致时,大脑会将它们整合起来,形成一个更加完整和丰富的感知体验(Klasen et al., 2012)。这种协同效应使得大脑对刺激的处理更加高效,从而产生更强的效果。Chen 等(2010)发现多感官刺激在岛叶和边缘区域诱发了更高的 α 活性,提示多感官刺激具有情绪效益。此外,多感官信息输入激活相应的感觉皮层,神经信号迅速传递至大脑中负责情绪反应的关键区域,包括杏仁核、岛叶皮层和眶额皮质等。这些区域能帮助个体快速确定外界刺激是愉快还是不愉快(Cui et al., 2022; Koelsch, 2018; Veldhuizen et al., 2020)。

本研究主要关注如何减少运动后 ANS 活性耗损程度。目前,国际上广泛认同 RMSSD 与 HF 是反映 PSNS 活动的重要指标(Gaertner et al., 2023)。实验一发现,视听嗅组的 RMSSD 与 HF 虽然未完全恢复到运动前安静状态,但相比于仅视觉刺激,有氧运动联合视听嗅觉刺激的 RMSSD 与 HF 下降程度更低。同时,仅视觉组与视听嗅组的 SBP 均显著下降,但多感官刺激的改善效果更优。由于 BP 变化受到 ANS 的调控,其结果与 HRV 呈现一致性(Mena-Martin et al., 2006; Park et al., 2010)。这些生理指标都在一定程度上反映多感官刺激能够有效减少运动引起的 PSNS 活性下降(Gaertner et al., 2023)。ANS 功能改善与高 PSNS 活性有关,PSNS 主导表示机体处于放松状态(Song et al., 2024)。因此,多感官整合锻炼的情绪改善效益重要生理机制可能在于 PSNS 活性耗损程度降低。

4.2 多感官整合锻炼中给予听觉比嗅觉刺激具有更好的情绪效益

本研究发现,多感官整合锻炼中给予听觉比嗅觉刺激具有更好的情绪效益,这与先前研究结果类似(Bird et al., 2019; Qi et al., 2022; Song et al., 2021)。具体表现在听觉组、先听后嗅组与先嗅后听组的消极情绪得分均显著降低,而仅有听觉组的积极情绪得分显著升高。相比之下,多感官整合锻炼中给予嗅觉刺激,虽然能在一定程度上缓解消极情绪,但其缓解效果仅在先听后嗅组和先嗅后听组中发现,其单独的情绪缓解效果不明显。高梦茹等(2024)认为,有氧运动中给予自然环境的视觉、听觉联合刺激干预有助于个体产生积极正向的身心状态,能够从生理和心理方面综合改善个体情绪。听觉刺激还能通过影响大脑的情绪处理中心,更快地引发情绪反应(Bigliassi et al., 2018)。Ferreri 等(2019)发现听觉刺激可以通过激活多巴胺能系统来唤起愉悦情绪。Bishop 等(2014)发现运动联合听觉刺激比无听觉刺激产生更大的听觉皮层激活,能引起胼胝体下回的激活,这一变化代表着情绪的改善。此外,个体身处没有听觉刺激的虚拟森林,可能会引发不确定或不安心理,从而阻碍压力恢复(翁羽西等, 2021; Annerstedt et al., 2013)。自然环境暴露的恢复功能极大程度受益于听觉刺激,甚至在一定程度上超越了视觉刺激(Hedblom et al., 2019; Wooller et al., 2015)。上述研究结果提示,在进行多感官整合锻炼时,应重点考虑整合听觉元素以增强对参与者情绪效益的潜在影响。

本研究发现 BP 与 HRV 的时间主效应均显著,运动后 BP 与 HRV 均发生变化。这一发现与 Stuckey 等(2012)的研究结果一致,即急性运动会引起 SNS 活性升高并抑制 PSNS 活性,且在运动后短时间内无法完全恢复。此外,本研究进一步检验了听觉与嗅觉感官刺激不同组合和不同阶段(运动中与运动后恢复期)刺激顺序对 PSNS 活性耗损程度的影响。但各组间生理指标差异均未达到显著性水平。综合两次实验数据可发现,仅当视觉、听觉和嗅觉 3 种感官同时接受刺激时,PSNS 活性耗损程度得到有效降低,而接受两种感官刺激时,不同组合或不同刺激顺序的效果均不显著。值得注意的是,实验二发现嗅觉组和先听后嗅组 BP 的均值下降幅度大于听觉组和先嗅后听组,并且 RMSSD、SDNN、LF、HF 的均值下降幅度小于听觉组和先嗅后听组。上述结果提示,自然环境下的不同感官刺激组合可能会产生生理与心理的结果偏差。在多感官整合锻炼中给予听觉刺激,可直接作用于情绪调节,诱导被试产生主观的积极体验,更快地引发情绪反应(Ferreri et al., 2019; Wang, 2023)。而在多感官整合锻炼中给予嗅觉刺激则可能间接影响 ANS,并引发相应的生理反应(Okada et al., 2024)。这种生理变化可能尚未被主观意识捕获,或

需要更长时间才能转化为情绪体验(Qi et al., 2022)。

4.3 不足与展望

本研究存在一定的局限性。首先,本研究验证了视听嗅多感官整合刺激的协同效应,但交感迷走神经代偿机制仍有待阐明。未来研究可结合神经影像技术(如磁共振成像、近红外光谱等)和血液生化指标(如皮质醇、内啡肽、去甲肾上腺素等),揭示多感官整合锻炼在情绪调节中的生化与神经基础。其次,本研究主要聚焦于有氧运动中的自然环境视觉、听觉和嗅觉体验,但忽略了自然环境中触觉对体验效果的潜在影响。触觉作为人类感知环境的重要方式,对于自然环境体验具有不可忽视的作用。因此,未来可以考虑将触觉纳入研究范畴,设计更为细致和全面的实验,以评估有氧运动中各感官刺激的影响。最后,未来研究可以扩大样本范围,包括不同年龄段、性别、健康状况等多样化的人群,以提高研究结果的普适性。

5 结论

中等强度有氧运动联合单一或多感官刺激均能有效缓解消极情绪,但只有多感官刺激能有效提升积极情绪,其重要生理机制在于能有效降低副交感神经活性耗损程度。多感官整合锻炼中给予听觉刺激比嗅觉刺激具有更好的积极情绪提升和消极情绪缓解主观体验。综合两个实验,本研究发现只有视觉、听觉和嗅觉3种感官同时接受刺激,才能有效降低副交感神经活性耗损程度,两种感官接受刺激的效果不明显。

参考文献:

- 高景川,陶猛, KUBIS Hans-Peter, 等, 2023. 绿蓝色视野暴露结合运动的积极和消极情绪效益研究 [J]. 体育科学, 43(6): 39-52.
- 高梦茹,张丹璇,司文娜,等, 2024. 有氧运动中不同绿视率与音乐节节奏联合刺激的情绪改善效益研究 [J]. 中国体育科技, 60(8): 41-51.
- 何晓龙,沈军,姜小平,等, 2020. 身体锻炼与绿、蓝色景观暴露改善人体精神健康的耦合: 路径、实证与协同效应 [J]. 体育与科学, 41(3): 94-109.
- 黄煜州,何晓龙,尤敏莎,等, 2024. 身体锻炼联合多感官刺激对心理健康影响的系统综述 [J]. 中国体育科技, 60(9): 61-70.
- 李汉森,陈欣,刘昊为,等, 2021. 绿色锻炼对心率变异性和血压影响的系统评价 [J]. 环境与职业医学, 38(4): 379-388.
- 林华,贺业恒,徐瑞, 2016. 心率变异性在大众健身领域的研究进展与展望 [J]. 体育科学, 36(6): 55-60.
- 刘飞,蔡厚德, 2010. 情绪生理机制研究的外周与中枢神经系统整合模型 [J]. 心理科学进展, 18(4): 616-622.
- 孙朋,季浏,李世昌,等, 2015. 有氧运动对青少年自主神经功能的急性影响 [J]. 体育科学, 35(3): 30-38.
- 王昊,王文迪,吴东哲,等, 2024. 心率变异性生物反馈调节自主神经系统的机制及应用 [J]. 中国组织工程研究, 28(26): 4257-4264.

- 翁羽西,朱玉洁,董嘉莹,等, 2021. 校园绿地声景观对情绪和注意力的影响: 以福建农林大学为例 [J]. 中国园林, 37(2): 88-93.
- 文小辉,刘强,孙弘进,等, 2009. 多感官线索整合的理论模型 [J]. 心理科学进展, 17(4): 659-666.
- 张少华,桑标,刘影,等, 2020. 不同抑郁症状青少年日常情绪调节策略使用的差异 [J]. 心理科学, 43(6): 1296-1303.
- ALI A, DUIZER L, FOSTER K, et al., 2011. Changes in sensory perception of sports drinks when consumed pre, during and post exercise [J]. *Physiol Behav*, 102(5): 437-443.
- ANNERSTEDT M, JÖNSSON P, WALLERGÅRD M, et al., 2013. Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest: Results from a pilot study [J]. *Physiol Behav*, 118: 240-250.
- BASEVITCH I, THOMPSON B, BRAUN R, et al., 2011. Olfactory effects on attention allocation and perception of exertion [J]. *Sport Psychol*, 25(2): 144-158.
- BERNSTEIN E E, MCNALLY R J, 2017. Acute aerobic exercise helps overcome emotion regulation deficits. *Cogn Emot*, 31(4): 834-843.
- BIGLIASSI M, KARAGEORGHIS C I, NOWICKY A V, et al., 2018. Effects of auditory distraction on voluntary movements: Exploring the underlying mechanisms associated with parallel processing [J]. *Psychol Res*, 82(4): 720-733.
- BIRD J M, KARAGEORGHIS C I, BAKER S J, et al., 2019. Effects of music, video, and 360-degree video on cycle ergometer exercise at the ventilatory threshold [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 29(8): 1161-1173.
- BIRENBOIM A, DIJST M, ETTEMA D, et al., 2019. The utilization of immersive virtual environments for the investigation of environmental preferences [J]. *Landsc Urban Plan*, 189: 129-138.
- BISHOP D T, WRIGHT M J, KARAGEORGHIS C I, 2014. Tempo and intensity of pre-task music modulate neural activity during reactive task performance [J]. *Psychol Music*, 42(5): 714-727.
- BONIFÁCIO K L, BARBOSA D S, MOREIRA E G, et al., 2021. Increased nitro-oxidative stress toxicity as a major determinant of increased blood pressure in mood disorders [J]. *J Affect Disorders*, 278: 226-238.
- BRICKMAN H M, FRISTAD M A, 2022. Psychosocial Treatments for Bipolar Disorder in Children and Adolescents [J]. *Annu Rev Clin Psychol*, 18(1): 291-327.
- CHEN Y H, EDGAR J C, HOLROYD T, et al., 2010. Neuromagnetic oscillations to emotional faces and prosody [J]. *Eur J Neurosci*, 31(7): 1818-1827.
- CHEN Y C, SPENCE C, 2011. Crossmodal semantic priming by naturalistic sounds and spoken words enhances visual sensitivity [J]. *J Exp Psychol Human*, 37(5): 1554-1568.
- CHIRICO A, CIPRESSO P, YADEN D B, et al., 2017. Effectiveness of immersive videos in inducing awe: An experimental study [J]. *Sci Rep*, 7(1): 1218.
- CORRALES M, TORRES B, ESQUIVEL A, et al., 2012. Normal values of heart rate variability at rest in a young, healthy and active Mexican population [J]. *Health*, 4(7): 377-385.
- CUI J Q, LI M, WEI Y Y, et al., 2022. Inhalation aromatherapy via brain-targeted nasal delivery: Natural volatiles or essential oils on mood disorders [J/OL]. *Front Pharmacol*, 13: 860043 [2025-01-10]. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.860043>.

- DAMASIO A R, GRABOWSKI T J, BECHARA A, et al., 2000. Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions[J]. *Nat Neurosci*, 3(10): 1049-1056.
- DAVIDS K, ARAÚJO D, BRYMER E, 2016. Designing affordances for health-enhancing physical activity and exercise in sedentary individuals[J]. *Sports Med*, 46(7): 933-938.
- DIEMER J, ALPERS G W, PEPERKORN H M, et al., 2015. The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality[J/OL]. *Front Psychol*, 6: 26[2025-01-10]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00026>.
- ERNST M O, BANKS M S, 2002. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion[J]. *Nature*, 415(6870): 429-433.
- ERNST M O, BÜLTHOFF H H, 2004. Merging the senses into a robust percept[J]. *Trends Cogn Sci*, 8(4): 162-169.
- FERRERI L, MAS-HERRERO E, ZATORRE R J, et al., 2019. Dopamine modulates the reward experiences elicited by music[J]. *P Natl Acad Sci USA*, 116(9): 3793-3798.
- GAERTNER R J, KOSSMANN K E, BENZ A B E, et al., 2023. Relaxing effects of virtual environments on the autonomic nervous system indicated by heart rate variability: A systematic review[J/OL]. *J Environ Psychol*, 88: 102035[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102035>.
- HEDBLM M, GUNNARSSON B, IRAVANI B, et al., 2019. Reduction of physiological stress by urban green space in a multisensory virtual experiment[J/OL]. *Sci Rep*, 9(1): 10113[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46099-7>.
- HUTCHINSON J C, KARAGEORGHIS C I, JONES L, 2015. See hear: Psychological effects of music and music-video during treadmill running[J]. *Ann Behav Med*, 49(2): 199-211.
- HUTCHINSON J C, KARAGEORGHIS C I, BLACK J D, 2017. The Dia beat es Project: Perceptual, affective and psychophysiological effects of music and music-video in a clinical exercise setting[J]. *Can J Diabetes*, 41(1): 90-96.
- JONES L, KARAGEORGHIS C I, EKKEKAKIS P, 2014. Can high-intensity exercise be more pleasant? Attentional dissociation using music and video[J]. *J Sport Exerc Psychol*, 36(5): 528-541.
- KARAGEORGHIS C I, PRIEST D L, 2012. Music in the exercisedomain: a review and synthesis (Part I)[J]. *Int Rev Sport Exerc Psychol*, 5(1): 44-66.
- KARIM J, WEISZ R, REHMAN S U, 2011. International positive and negative affect schedule short-form (I-PANAS-SF): Testing for factorial invariance across cultures[J]. *Procedia Soc Behav Sci*, 15: 2016-2022.
- KIM C, SONG C, 2022. Physiological and psychological relaxation effects of fir essential oil on university students[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 19(5063): 5063.
- KLASEN M, CHEN Y H, MATHIAK K, 2012. Multisensory emotions: Perception, combination and underlying neural processes[J]. *Rev Neurosci*, 23(4): 381-392.
- KOELSCH S, 2018. Investigating the neural encoding of emotion with music[J]. *Neuron*, 98(6): 1075-1079.
- LEE K, AHN H Y, KWON S, 2017. Music's Effect on Exercise Participants by Exercise Session[J]. *Journal of Applied Sport Psychology*, 29(2): 167-180.
- LEZAMA-ESPINOSA C, HERNANDEZ-MONTIEL H L, 2020. Neuroscience of the auditory-motor system: How does sound interact with movement?[J/OL]. *Behav Brain Res*, 384: 112535[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112535>.
- LI H S, ZHANG X, BI S L, et al., 2021. Green exercise: Can nature video benefit isometric exercise?[J/OL]. *Int J Environ Res Public Health*, 18(11): 5554[2025-01-10]. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115554>.
- LIN P H, LIN Y P, CHEN K L, et al., 2021. Effect of aromatherapy on autonomic nervous system regulation with treadmill exercise-induced stress among adolescents[J/OL]. *PLoS One*, 6(4): e0249795[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249795>.
- LIU Y P, HU M J, ZHAO B, 2020. Interactions between forest landscape elements and eye movement behavior under audio-visual integrated conditions[J]. *J For Res*, 25(1): 21-30.
- MENA-MARTÍN F J, MARTÍN-ESCUADERO J C, SIMAL-BLANCO F, et al., 2006. Influence of sympathetic activity on blood pressure and vascular damage evaluated by means of urinary albumin excretion[J]. *J Clin Hypertens*, 8(9): 619-624.
- MURRAY N, LEE B, QIAO Y, et al., 2016. Olfaction-enhanced multimedia: A survey of application domains, displays, and research challenges[J]. *ACM Comput Surv*, 48(4): 1-34.
- NORMAN G J, BERNTSON G G, CACIOPPO J T, 2014. Emotion, somatovisceral afference, and autonomic regulation[J]. *Emot Rev*, 6(2): 113-123.
- NUUTTILA O P, NIKANDER A, POLOMOSHOV D, et al., 2017. Effects of HRV-guided vs. predetermined block training on performance, HRV and serum hormones[J]. *Int J Sports Med*, 38(12): 909-920.
- OKADA K, SHIMATANI K, 2024. Effect of olfactory stimulation from aromatherapy on the autonomic nervous activity during aerobic exercises[J/OL]. *Sci Rep*, 14(1): 11198[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61732-w>.
- PARK B J, TSUNETSUGU Y, KASETANI T, et al., 2010. The physiological effects of Shinrin-yoku (taking in the forest atmosphere or forest bathing): Evidence from field experiments in 24 forests across Japan[J]. *Environ Health Preventative Med*, 15(1): 18-26.
- PATIL S L, SREEKUMARAN E, KRISHNA A P, 2011. Evaluation of the efficacy of cardamom aromatherapy on aerobic fitness & autonomic functions among students[J]. *J Health Allied Sci NU*, 1(1/3): 23-29.
- PELLEGRINO R, SINDING C, DE WIJK R A, et al., 2017. Habituation and adaptation to odors in humans[J]. *Physiol Behav*, 177: 13-19.
- QI Y, CHEN Q J, LIN F, et al., 2022. Comparative study on birdsong and its multi-sensory combinational effects on physio-psychological restoration[J/OL]. *J Environ Psychol*, 83: 101879[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101879>.
- RAZON S, BASEVITCH I, LAND W, et al., 2009. Perception of exertion and attention allocation as a function of visual and auditory conditions[J]. *Psychol Sport Exerc*, 10(6): 636-643.
- ROGERSON M, BROWN D K, SANDERCOCK G, et al., 2016. A comparison of four typical green exercise environments and predic-

- tion of psychological health outcomes[J]. *Perspect Public Heal*, 136(3): 171-180.
- SATO N, MIYAMOTO M, SANTA R, et al., 2023. Cross-modal and subliminal effects of smell and color[J/OL]. *PeerJ*, 11: e14874[2025-01-10]. <https://doi.org/10.7717/peerj.14874>.
- SCHELIGA S, KELLERMANN T, LAMPERT A, et al., 2023. Neural correlates of multisensory integration in the human brain: An ALE meta-analysis[J]. *Rev Neurosci*, 34(2): 223-245.
- SCHUCH F B, VANCAMPFORT D, FIRTH J, et al., 2018. Physical activity and incident depression: A Meta-analysis of prospective cohort studies. *Am J Psychiat*, 175(7), 631-648.
- SCOTT A, CARTER C, BROWN K, et al., 2009. 'Seeing is not everything': Exploring the landscape experiences of different publics[J]. *Landscape Res*, 34(4): 397-424.
- SHAFFER F, GINSBERG J P, 2017. An overview of heart rate variability metrics and norms[J/OL]. *Front Public Health*, 5: 258[2025-01-10]. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>.
- SHAMS L, SEITZ A R, 2008. Benefits of multisensory learning[J]. *Trends Cognit Sci*, 12(11): 411-417.
- SHIMOJO S, 2001. Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions[J]. *Curr Opin Neurobiol*, 11(4): 505-509.
- SONG C, CAO S, LUO H, et al., 2024. Effects of simulated multisensory stimulation integration on physiological and psychological restoration in virtual urban green space environment[J/OL]. *FrontPsychol*, 15: 1382143[2025-01-10]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1382143>.
- SONG C, IKEI H, MIYAZAKI Y, 2019. Physiological effects of forest-related visual, olfactory, and combined stimuli on humans: An additive combined effect[J/OL]. *Urban For Urban Greening*, 44: 126437[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126437>.
- SONG C, IKEI H, MIYAZAKI Y, 2021. Effects of forest-derived visual, auditory, and combined stimuli[J/OL]. *Urban For Urban Greening*, 64: 127253[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127253>.
- STUCKEY M I, TORDI N, MOUROT L, et al., 2012. Autonomic recovery following sprint interval exercise[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 22(6): 756-763.
- TANG X Y, WU J L, SHEN Y, 2016. The interactions of multisensory integration with endogenous and exogenous attention[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 61: 208-224.
- TEIXEIRA-ARAÚJO A A, R G S ALMEIDA J, C CRUZ L, et al., 2017. Aerobic exercise and eucalyptus globulus: Cardio-affective effects on recovery and stress[J]. *Int J Cardiovasc Pract*, 2(1): 1-6.
- THEPSATITPORN S, RUJIGANJANARAT K, MAKMEE P, 2024. Multi-sensory stimuli improve relaxation and sleep quality in rotating-shift workers: A randomized controlled trial[J]. *J Multidiscip Health*, 17: 1435-1445.
- THOMPSON E R, 2007. Development and validation of an internationally reliable short-form of the positive and negative affect schedule(PANAS)[J]. *J Cross Cult Psychol*, 38(2): 227-242.
- VELDHUIZEN M G, FARRUGGIA M C, GAO X, et al., 2020. Identification of an amygdala-thalamic circuit that acts as a central gain mechanism in taste perceptions[J]. *J Neurosci*, 40(26): 5051-5062.
- WANG Y B, 2023. Can acute exercise be more pleasant? Using audiovisual stimuli: A Meta-analysis[J]. *Appl Psychol Health Well Being*, 15(1): 354-368.
- WOOLLER J J, BARTON J, GLADWELL V F, et al., 2015. Occlusion of sight, sound and smell during Green Exercise influences mood, perceived exertion and heart rate[J]. *Int J Environ Health Res*, 26(3): 267-280.
- WOOLLER J J, ROGERSON M, BARTON J, et al., 2018. Can simulated green exercise improve recovery from acute mental stress?[J/OL]. *Front Psychol*, 9: 2167[2025-01-10]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02167>.
- YEH H P, STONE J, CHURCHILL S, et al., 2017. Physical and emotional benefits of different exercise environments designed for treadmill running[J/OL]. *Int J Environ Res Public Health*, 14(7): 752[2025-01-10]. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070752>.
- ZAWADZKI M J, GRAHAM-ENGELAND J E, ROBLES P L, et al., 2023. Acute Experiences of Negative Interpersonal Interactions: Examining the Dynamics of Negative Mood and Ambulatory Blood-Pressure Responses Among Black and Hispanic Urban Adults[J]. *Ann Behav Med*, 57(8): 630-639.
- ZHANG D X, JIN X H, WANG L N, et al., 2023. Form and color visual perception in green exercise: Positive effects on attention, mood, and self-esteem[J/OL]. *J Environ Psychol*, 88: 102028[2025-01-10]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102028>.
- ZHANG Y J, YU Z F, LIU JIAN K, et al., 2022. Neural decoding of visual information across different neural recording modalities and approaches[J]. *Mach Intell Res*, 19(5): 350-365.
- ZHENG H H, LUO M, WANG Y H, et al., 2024. Multi-sensory interaction and spatial perception in urban microgreen spaces: A focus on vision, Auditory, and Olfaction[J/OL]. *Sustainability*, 16(20): 8809[2025-01-10]. <https://doi.org/10.3390/su16208809>.
- ZUFALL F, 2000. The cellular and molecular basis of odor adaptation[J]. *Chem Senses*, 25(4): 473-481.

The Effect and Physiological Mechanism of Aerobic Exercise Combined with Multi-sensory Stimulation on Mood Improvement

HUANG Yuzhou, ZHENG Zhe, ZHANG Danxuan, SHEN Jun, HE Xiaolong*

School of Physical Education and Health Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004

Abstract: Objective: This study explored the improvement and physiological mechanisms of moderate-intensity aerobic exercise

(下转第 78 页)

significantly reduction in proportion of deep sleep time (DST) and rapid eye movement (REM) sleep ($P<0.01$). During the sleep initiation stage, the power spectral density of δ and σ bands were increased more slowly, while the β band were decreased significantly more slowly in the chronic insomnia group compared to the normal sleep group ($P<0.05$). During the sleep maintenance stage, the DST phase exhibited lower θ and σ bands power, while the REM phase showed higher α band power density ($P<0.001$). During the sleep transition stage, the α , σ , and β bands powers were higher ($P<0.001$), whereas the δ band power was lower ($P<0.01$). Throughout the whole night and in the first 10 minutes of the non-rapid eye movement (NREM) phase, chronic insomnia athletes had fewer sleep spindles ($P<0.01$) and lower spindle density ($P<0.01$). From the brain source localization results, chronic insomnia athletes exhibited higher δ -band activity in the left prefrontal cortex (e.g., medial frontal gyrus) before sleep ($P<0.05$) compared with normal sleep athletes. Regarding brain functional network connectivity, the local efficiency of the δ band before sleep and in the morning, the clustering coefficient of the β band, the global efficiency of the θ and σ bands in the morning, the Laplacian eigenvalue of the β band in the morning, and the Laplacian eigenvalues of the α and β bands before sleep were all lower in the chronic insomnia group compared to the normal sleep group ($P<0.05$). Conclusions: In chronic insomnia athletes, the δ -band activity of the left prefrontal cortex (e.g., medial frontal gyrus) is excessively elevated before sleep, leading to decreased brain functional network efficiency and disrupting the wake-sleep transition process. Accordingly, these changes prolonged SOL and increased AT, ultimately reducing SE. Additionally, the slow increase in low-frequency brain waves and the delayed decrease in high-frequency brain waves during sleep may contribute to a reduced proportion of DST and REM sleep, further impairing the functional network connectivity of the brain upon waking.

Keywords: EEG; sleep quality; central nervous system; brain functional connectivity; athletic performance

(上接第63页)

combined with multisensory stimulation on emotions through randomized controlled trials. Methods: The 1st experiment employed a 2 (time: pre-test, post-test) \times 2 (visual stimulation only, audio-visual-olfactory combined stimulation) two-factor mixed design, 48 participants were grouped randomly and conducted a 10-minute moderate-intensity aerobic exercise experiment. Because of the visual stimulation is the basic sensory stimulation method in multisensory stimulation, the 2nd experiment used a two-factor mixed design of 2 (time: pre-test, post-test) \times 4 (audio, olfactory, audio-then-olfactory, and olfactory-then-audio stimulation), and 64 participants were recruited and conducted a 10-minute moderate-intensity aerobic exercise experiment. Results: Experiment 1: 1) After exercise, the positive and negative emotion scores of the audio-visual-olfactory group were significantly higher than those of the visual-only group; 2) after exercise, the root mean square of successive differences (RMSSD) and high frequency (HF) of the audio-visual-olfactory group were significantly higher than those of the visual-only group, and the systolic pressure (SBP) was significantly lower than that of the visual-only group. Experiment 2: 1) After exercise, the positive emotion score of the audio group was significantly higher than that of the olfactory group and the olfactory-then-audio group; 2) after exercise, the negative emotion scores of the audio group and the audio-then-olfactory group were significantly lower than those of the olfactory group; 3) the mean decrease of blood pressure (BP) in the olfactory group and the audio-then-olfactory group were greater than that in the audio group and the olfactory-then-audio group, and the mean decrease of low frequency (LF), HF, RMSSD, and standard deviation of the nn intervals (SDNN) were smaller than those in the audio group and the olfactory-then-audio group, but the differences did not reach significance. Conclusions: Moderate-intensity aerobic exercise combined with single or multiple sensory stimulations can effectively alleviate negative emotions, but only multisensory stimulation can effectively enhance positive emotions, the reduction of parasympathetic nerve activity depletion is the potential physiological mechanism. In the combination of aerobic exercise and multisensory stimulation, auditory stimulation is better than olfactory stimulation in improving subjective emotional experience. Only when the three senses of vision, auditory, and olfaction are simultaneously stimulated, the depletion of parasympathetic nerve activity is effectively reduced. When two senses are stimulated, the effects of different combinations or sequences of stimulation are not significant.

Keywords: aerobic exercise; multi-sensory stimulation; emotion; autonomic nerve function