



脑-心互动视角下运动锻炼对冰毒依赖者的康复效应研究： 来自 EEG 和 HRV 的关联性证据

王 坤¹, 张庭然¹, 李 艳², 刘恒旭¹, 罗 炯^{1*}

(1. 西南大学 体育学院 运动戒毒研究中心, 重庆 400715;

2. 重庆工业职业技术学院 通识教育学院 体育工作部, 重庆 401120)

摘要:目的:运动锻炼被认为能不同程度地调控冰毒依赖者的大脑、心脏及毒品渴求度,但变量间的内在关系及影响机制尚需进一步探讨。方法:选取重庆市某戒毒教育矫治所 55 名男性冰毒依赖者,随机分为有氧结合抗阻组、复合式有氧组和对照组,利用脑电和心率变异性仪器分别采集依赖者在不同线索暴露任务中的前额脑区 alpha 波能量值和心率变异性(HRV)活性,利用视觉模拟评分量表(VAS)评估其渴求度。结果:1)12 周干预后有氧结合抗阻组和复合式有氧组的毒品渴求度皆显著低于对照组;2)基线时,与中性任务相比,3 个组依赖者在毒品任务中的 Fz-alpha 波能量值、相邻 R-R 间期差值均方根值(RMSSD)、标准化高频功率(HFn)均显著更低,标准化低频功率(LFn)显著更高;干预后,2 个运动组在毒品任务中的 Fz-alpha、F3-alpha 及 F4-alpha 波均显著高于对照组,在毒品和中性任务中的正常窦性 R-R 间期的标准差(SDNN)、RMSSD 和 HFn 均显著高于对照组,且 Fz-alpha 波、RMSSD、LFn 及 HFn 已无显著性线索任务差异;2 个运动组在毒品和中性任务中的前额脑区 alpha 波和 HRV 均无显著性差异;复合式有氧组在中性任务中的 F3-alpha 波和有氧结合抗阻组的 F4-alpha 波均显著高于基线水平;干预后对照组在毒品和中性任务中的前额脑区 alpha 波和 HRV 均无显著性变化;3)在毒品和中性任务中,干预后 2 个运动组的前额脑区 alpha 波与 SDNN、RMSSD 及 HFn 均呈不同程度的正相关,与 LFn 呈不同程度的负相关,而对照组的相关性较弱;3 个组的毒品渴求度分别与前额脑区的 alpha 波、SDNN、RMSSD 及 HFn 呈显著负相关,与 LFn 呈显著正相关。结论:急性毒品暴露会诱发冰毒依赖者额叶中线和自主神经的异常激活现象,而中等强度有氧结合抗阻和复合式有氧运动皆能改善依赖者面临刺激时前额脑区的异常激活现象,并伴随心脏自主神经由交感神经占优势转变为迷走神经占优势的动态调控,这有助于保持在特定情景中的脑-心系统协调激活状态,进而有效降低依赖者的毒品渴求,但 2 种运动模式的效果并无显著差异。

关键词:冰毒依赖者;运动锻炼;渴求度;脑激活;心率变异性;脑-心互动

中图分类号:G804.2

文献标识码:A

近年来,甲基苯丙胺类毒品(methamphetamine),俗称“冰毒”,以易合成、低价格、便携带、成瘾快等特征,在世界范围内的滥用形势异常严峻。据报道,截至 2021 年底,我国现有吸毒人员 148.6 万名,同比下降 17.5%,其中,冰毒滥用的势头仍居高不下,滥用冰毒人员达 79.3 万名(国家禁毒委员会办公室,2022),而改善冰毒依赖者的戒断综合征,进而促进复吸率的降低或将是有效遏制冰毒滥用趋势的关键。研究表明,冰毒成瘾涉及大脑腹侧被盖区、伏隔核、纹状体、杏仁核和前额叶等多个脑区(Morales et al., 2015),其中前额叶被认为是迫使依赖者对毒品产生神经适应性行为和冲动渴求的重要脑区(Parsegian et al., 2014),亦是自我调控能力的关键脑区(Schmeichel et al., 2015)。长期滥用冰毒会导致前扣带回皮质和背外侧前额叶皮质等与抑制

相关的大脑区域功能障碍(Leland et al., 2008; Salo et al., 2009),并造成认知决策、反应抑制和工作记忆等认知障碍(Paneka et al., 2013; Peacock et al., 2018)以及焦虑、抑郁等情绪障碍(Darke et al., 2008)。而前额脑区激活水平的变化被认为与情绪调节(Hagemann et al., 1998)和认知加工(Giattino et al., 2017; Klimesch, 1999)密切相关,如前额脑区 alpha 波的水平主要反映大脑自发的觉醒意识,可调节正在执行的认知任务,能够有效揭示个体的注意调控

收稿日期:2022-05-11; 修订日期:2022-10-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWU2009103)。

第一作者简介:王坤(1996-),男,在读博士研究生,主要研究方向为运动戒毒与运动促进健康,E-mail:1361382842@qq.com。

*通信作者简介:罗炯(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为运动技术诊断与全民健身,E-mail:784682301@qq.com。

及抑制功能等认知功能变化特征。此外,急性冰毒使用还会刺激心脏交感神经系统,导致心率加快和高血压(Meredith et al., 2005);而慢性冰毒暴露亦被认为与心率变异性(heart rate variability, HRV)降低、迷走神经功能受损等自主神经系统功能障碍有关(Henry et al., 2012; Kaye et al., 2007),容易导致急性冠状动脉综合征、主动脉夹层及肺动脉高压等心血管并发症(谭晓辉, 2019)。可见,冰毒滥用的危害绝不仅涉及大脑层面,而是贯穿于大脑和心血管系统之中,从脑-心系统整体视角来探究冰毒依赖者的康复效应或许是改善其戒断综合征的新方向。

运动锻炼作为一种绿色、环保、安全的非药物治疗成瘾的辅助手段,在促进冰毒依赖者戒断康复中发挥着越来越重要的作用(李可峰等, 2021; 王东石等, 2017)。在脑机制方面, Hillman等(2012)研究表明,积极参与运动锻炼可在一定程度上修复毒品滥用者受损的认知控制能力,增强抑制用药冲动的能力,进而达到减缓戒断症状的目的。其中,规律的有氧运动被证实可通过调节脑内神经递质,提高冰毒依赖者的大脑抑制功能,进而有效降低毒品渴求度(王坤等, 2021; Rawson et al., 2015; Wang et al., 2015)。进一步研究发现,中等及高强度有氧运动均可有效改善毒品依赖者的抑制能力,其机制可能与前额叶皮层的激活水平有关(容浩等, 2019; Cabral et al., 2018)。同时,抗阻运动也被认为可通过调节毒品依赖者脑内多巴胺及其受体等神经递质,直接或间接起到康复效益(Robertson et al., 2016)。李可峰等(2021)指出,中等强度的抗阻训练可显著激活冰毒依赖者左、右前额叶,并增强不同脑区之间的功能连接,进而改善其睡眠质量、负性情绪及毒品渴求。在心血管系统方面,王坤等(2022)发现,运动干预能有效提高女性冰毒依赖者的心肺适能,但未在男性依赖者中进行相应的验证。同时有研究认为,与单纯的有氧运动相比,有氧结合抗阻运动对身体机能具有更优的改善效果(齐玉刚等, 2020)。实证研究表明有氧结合抗阻训练后,冰毒依赖者的HRV得以显著增加,迷走神经调节增加或自主神经平衡明显改善,显著降低了冰毒滥用导致的心血管发病率和死亡率风险(Dolezal et al., 2014; Rawson et al., 2015)。相关研究结果提示,运动锻炼对毒品依赖者的大脑和心血管系统具有一定的康复促进效应,但脑-心系统能否在运动锻炼的介导作用下共同发生适应性改变,进而协同改善依赖者的戒断综合征目前尚不可知。此外,与有氧运动相比,有氧结合抗阻运动或许具有更强的康复效益,这需要在冰毒依赖群体中进一步验证。

随着现代神经影像学的飞速发展,针对“大脑”与“心脏”之间的关系逐渐产生了一门新兴的交叉学科——神经心脏病学(Neurocardiology),而“脑-心互动”(brain-heart interactions)是其重要的理论支撑。该理论认为,大脑皮质及皮质下脑区与心脏自主神经系统之间形成了巨大的交互网络,

即中枢自主神经网络系统(Holzman et al., 2017)。研究发现,心率和血压等心血管系统会伴随自主神经系统受到大脑皮质刺激的调节而发生相应的变化(Critchley et al., 2000),应激引起的交感神经活动被认为与前扣带回和前额皮层的活动有关(Nugent et al., 2011; Yasui et al., 2010),且前额叶皮层活动还会影响迷走神经系统,参与自上而下的情绪调节,进而影响心脏活动(Webb et al., 2012)。同时,安静状态下HRV中的迷走神经系统与前额叶功能连接(Kumral et al., 2019)以及前额叶皮层的脑电图激活呈正相关(Patron et al., 2019),在特定任务下HRV的增加与不同脑区的神经振荡水平有关(Machetanz et al., 2021)。目前,脑-心互动主要被应用于临床医学领域,如脑卒中(Xu et al., 2020)、Tako-tsubo心肌病(Hrishi et al., 2019)及意识障碍(Riganello et al., 2021)等;在运动领域,仅有部分研究指出太极拳运动能够降低脑血管阻力并缓解脑血管痉挛状况,保证自主神经功能健全,加强脑组织的代谢功能,从而增加脑血流量(宋清华, 2014),但并未深入探究脑-心系统之间的关联性。综上,脑-心互动机制或许可以为运动锻炼促进毒品依赖者的戒断康复提供新视野。

基于此,本研究拟通过对冰毒依赖者采用复合式有氧运动和抗阻运动2种干预模式,以脑电图(electroencephalogram, EEG)和HRV为监测手段,考察在不同暴露情景中,运动锻炼对男性冰毒依赖者前额叶皮层alpha波激活水平、心脏自主神经活性及毒品渴求度的影响及不同锻炼模式的效果差异,并通过相关分析揭示运动锻炼后依赖者的脑-心系统及渴求度之间是否存在协同康复效应及耦合机制,将脑-心互动理论延伸至运动戒毒领域。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究在中国重庆市嘉陵戒毒教育矫治所共招募了55名男性冰毒依赖者,通过以下纳入与排除标准筛选了其中50名冰毒依赖者参加实验(表1)。纳入标准:1)年龄18~45岁;2)文化程度在小学及以上;3)当前处于监禁状态并经历了3个月以上的强制戒断康复;4)通过结构化的面谈诊断符合DSM-IV对药物依赖者的评定标准;5)自愿参与本研究,并签署知情同意书;6)通过身体活动适应能力问卷(PAR-Q)评估(Thompson et al., 2013),没有身体残疾或医疗问题阻止或禁止参加中等强度有氧运动无身体残疾并可以参加中等强度有氧运动;7)视力或矫正视力正常。排除标准:1)非冰毒依赖者;2)有精神疾病病史或治疗史;3)患先天性心脏或心血管疾病;4)患有获得性免疫缺陷综合征或性病等传染性疾病;5)有规律的运动习惯或近3个月内接受过运动干预者。本研究获得西南大学体育学院伦理委员会(编号:SWU-TY202107)的批准,并遵循《赫尔辛基宣言》,所有参与者均签署了书面知情同意书。

表 1 受试者的基本特征

变量	有氧结合抗阻组 (n=15)	复合式有氧组 (n=17)	对照组 (n=18)	P
年龄/岁	29.60±4.66	30.87±5.50	29.56±6.43	>0.05
BMI	22.17±2.35	21.35±2.52	22.06±3.02	>0.05
吸毒年限/年	7.93±2.37	8.27±2.76	6.94±2.54	>0.05
入所次数/次	1.73±1.03	1.74±0.96	1.94±1.34	>0.05
戒断时长/月	9.87±3.68	10.13±3.52	11.50±4.84	>0.05

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

本研究采用组别 3(有氧结合抗阻组、复合式有氧组、对照组)×线索任务 2(毒品、中性)×测试时间 2(基线、后测)的三因素混合实验设计, 因变量包括 EEG 和 HRV 指标; 而对毒品渴求度采用组别 3(有氧结合抗阻组、复合式有氧组、对照组)×测试时间 2(基线、后测)的两因素混合实验设计。所有通过筛选的受试者随机分成 3 组: 有氧结

合抗阻运动组、复合式有氧运动组和对照组。受试者首先需要完成基线测试, 包括人口统计学资料、毒品渴求度评估、不同线索任务下的 EEG 和 HRV 监测等; 基线测试结束后, 进入为期 12 周的正式实验干预, 每个组别的受试者分别进行相应的干预内容; 待 12 周干预结束, 全程参与了整个实验周期的受试者需完成与基线测试相一致的后测内容。需要指出的是, 在实验干预过程中, 有 4 名受试者(2 名复合式有氧运动组、2 名对照组)因不能坚持实验或离开戒毒所, 故最终纳入数据分析的样本为 46 人, 该样本量在本研究实验设计下的 G*power 统计检验力为 0.84。

1.2.2 干预方案

整个运动干预周期为 12 周, 每周 3 次, 每次干预时长约 35 min, 运动强度为中等强度(65%~75% HR_{max}, HR_{max}=206.9-0.67×年龄)(Wang et al., 2016), 每次干预前后均需进行 3 min 的热身准备活动和 3 min 的放松练习。干预时间为每周二、四、六, 干预地点为重庆市嘉陵戒毒教育矫治所, 运动过程中的心率通过心率表监控(Polar RCX3)。各组干预方案详见表 2。

表 2 戒毒康复运动锻炼方案

组别	n	干预时长/min	运动强度	干预内容
有氧结合抗阻组	15	单次跑步机运动: 15, 抗阻运动: 12	中等强度 (65%~75% HR _{max})	跑步机运动: 2 min 热身跑(5 km/h)、10 min 匀速跑(9 km/h)、3 min 恢复跑(5 km/h); 休息 2 min; 抗阻运动: 俯卧撑、单腿箭步蹲、高位下拉、坐式蹬腿等动作, 每个动作 15 次/组, 共 3 组, 组间休息 1 min。
复合式有氧组	15	单次太极锻炼: 15, 跳绳: 12	中等强度 (65%~75% HR _{max})	太极锻炼: 第 1~5 周主要进行起势、野马分鬃、白鹤亮翅、搂膝拗步、手挥琵琶等动作练习, 第 6~10 周主要进行闪通臂、转身搬拦锤(如封似闭、十字手)等动作练习, 第 11~12 周进行 24 式连贯练习; 休息 2 min; 单人跳绳: 3 组(200 个/组), 组间休息 1 min
对照组	16	35	—	常规矫治生活(如阅读、劳动、法制教育等)

1.2.3 测量指标及仪器

1.2.3.1 EEG 测量

在 12 周运动干预前后, 分别测量受试者在不同线索暴露任务中的脑电变化特征, 线索暴露任务由毒品任务(5 min)和中性任务(5 min) 2 个部分组成(图 1)。测试开始前, 向受试者讲解实验任务, 要求其在任务开始后集中注意力认真观看电脑上呈现的图片, 并尽量避免头部及躯干晃动, 受试者与电脑屏幕的距离约 80 cm。在实验过程中受试者无需做任何按键动作, 相应 mark 通过程序编码自动获取。在毒品任务中, 受试者会通过电脑屏幕看到一系列与吸食冰毒有关的图片(效价为 4.11, 唤醒为 4.24)(白露等, 2005), 主要包括冰毒、冰壶及吸食冰毒等(共 12 张)。采用 E-prime 软件编写实验任务程序, 任务以灰色屏幕中央呈现 1 个白色“+”开始, 接着出现 1 个 500 ms 的灰屏, 500 ms 后随机呈现毒品暴露刺激, 每个刺激呈现的时间为 3 000 ms, 最后以 1 个持续 1 000 ms 的灰屏结束单个试次, 反复如此直至 5 min 结束。在中性任务

中, 受试者会通过电脑屏幕看到一系列与日常生活相关的物品图片(效价为 5.08, 唤醒为 5.27), 主要包括纸杯、胶带及凳子等(共 12 张), 刺激呈现的方式及时间与毒品任务中完全一致。对受试者在毒品与中性刺激暴露任务的脑电波进行实时监测与记录。

采用 32 导便携式脑电监测设备(LiveAmp, Brainproducts, 德国)和电极帽采集并记录受试者的 EEG 活动, 采样率为 500 Hz, 头皮电阻小于 10 kΩ, 眼电 EOG 位于右侧眼眶下 1 cm 处, 数字滤波为 0.1~30 Hz 带通。参考电极置于头顶, 前额接地, 电极和皮肤的接触阻抗 < 5 kΩ。选取的指标为额叶中线(Fz)、左侧前额叶(F3)和右侧前额叶(F4)电极点的 alpha 波(8~13 Hz), 即 Fz-alpha 波、F3-alpha 波和 F4-alpha 波。

1.2.3.2 HRV 测量

在 12 周运动干预前后, 分别测量受试者在不同线索暴露任务中的 HRV。正式实验前, 将心电片分别贴于受试者的右锁骨中线和左腋前线处, 实验开始后同步监测受试

者在毒品和中性刺激暴露中的HRV,且HRV与EEG测试同步进行,毒品和中性刺激的测试时长均为5 min。测试期间受试者自行调整呼吸并安静坐于椅子上,周围环境尽量保持安静。

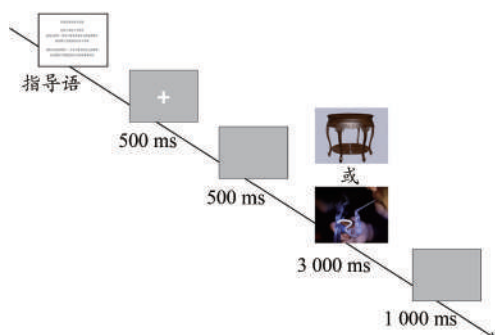


图1 单个实验试次的流程图

Figure 1. Flowchart of a Single Experimental Trial

采用国产HRV监测系统(HeaLink-R211B,中国蚌埠)采集受试者的HRV数据。设备的带宽为0.5~40 Hz,采样频率为400 Hz,V5-导,测量电极为Ag/AgCl的一次性ECG电极片(Junkang Ltd.,中国上海)。测量指标主要包括时域指标:正常窦性R-R间期的标准差(SDNN)、相邻R-R间期差值均方根值(RMSSD);频域指标:标准化低频功率(LFn)、标准化高频功率(HFn)。

1.2.3.3 渴求度测量

冰毒依赖者的毒品渴求度通过视觉模拟评分量表(visual analog scale, VAS)评估。首先以1 s的速度给受试者随机呈现冰毒、吸食冰毒的工具及场景等图片,要求受试者通过VAS评定自己当下对冰毒的渴求度。该量表由长10 cm的彩色线段构成,将11个评定点平均分割成10段,每段均代表相应的数值,最左端的“0”表示“一点都不想要”,最右端的“10”表示“非常想要”,从0~10表示对药物的渴求程度逐渐递增。这种评估方法已经被验证能够有效反映药物依赖者对相应药物的渴求程度(Wang et al., 2015)。

1.2.4 数据处理与分析

采用Matlab 2014b软件对EEG数据进行离线处理,离线滤波的高通为0.1 Hz,低通为30 Hz(24 dB/oct),运用独立成分分析(independent component analysis, ICA)去除眼电、肌电等,以双耳乳突作重参考;将EEG数据进行分段,截取每个刺激出现后的4 s脑电波,基线校正后手动去除伪迹,去除振幅超过 $\pm 80 \mu\text{V}$ 的分段,通过小波转换进行时频域转换,以第4 s为矫正基线,对前3 s数据进行叠加平均,获得相应的alpha波能量值。采用ECG viewer软件对心电数据进行R-R间期(R-R interval, RRI)提取,使用Kubios软件对HRV数据进行处理分析,获得不同线索任务下受试者的时域和频域值。

采用SPSS 21.0软件对实验数据进行统计分析,对人口

统计学基本资料进行单因素方差分析等描述性分析;对VAS得分进行组别 \times 测试时间的重复测量方差分析,对不同电极点的alpha波能量值和HRV分别进行组别 \times 线索任务 \times 测试时间的重复测量方差分析,利用Bonferroni法校正进行事后检验分析,当数据不符合球形检验时,采取Greenhouse & Geisser方法进行校正;对EEG、HRV及毒品渴求之间的关联性采用Pearson相关分析。统计检验的显著水平设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 运动锻炼对冰毒依赖者毒品渴求度的影响

对冰毒依赖者的毒品渴求度进行重复测量方差分析发现,组别主效应显著 $F_{(2,43)}=7.71, P < 0.01, \eta^2=0.26$;测试时间主效应显著 $F_{(1,43)}=20.74, P < 0.001, \eta^2=0.33$;二者的交互效应显著 $F_{(2,43)}=4.15, P < 0.05, \eta^2=0.16$ 。进一步简单效应分析发现:在基线时,3个组的渴求度无显著性差异[(5.27 \pm 1.39) vs (5.13 \pm 1.41) vs (5.50 \pm 1.90), $P > 0.05$];在第12周时,有氧结合抗阻组和复合式有氧组均显著低于对照组[(3.07 \pm 1.16) vs (3.40 \pm 1.35) vs (5.31 \pm 1.14), $P < 0.001$],而有氧结合抗阻组有低于复合式有氧组的趋势但并未达显著性水平;此外,有氧结合抗阻组($P < 0.001$)和复合式有氧组($P < 0.01$)在第12周分别显著低于基线水平。

2.2 运动锻炼对冰毒依赖者脑激活水平的影响

对Fz-alpha波能量值进行重复测量方差分析(表3)发现,组别主效应显著 $F_{(2,86)}=3.50, P < 0.05, \eta^2=0.08$;线索任务主效应显著 $F_{(1,86)}=14.76, P < 0.001, \eta^2=0.15$;测试时间主效应显著 $F_{(1,86)}=24.64, P < 0.001, \eta^2=0.22$;测试时间和组别的交互效应显著 $F_{(2,86)}=3.68, P < 0.05, \eta^2=0.08$;其余交互效应均不显著($P > 0.05$)。进一步简单效应分析(图2)发现,在基线测试时,3个组的受试者在毒品任务中的alpha波能量值均分别显著低于中性任务($P < 0.05$),而在第12周时,仅对照组存在显著性差异($P < 0.05$);在毒品任务中,有氧结合抗阻组($P < 0.001$)和复合式有氧组($P < 0.001$)第12周的值显著高于基线水平,而对照组无显著性差异;在中性任务中,3个组的值在干预前后均无显著性差异;此外,有氧结合抗阻组($P < 0.01$)和复合式有氧组($P < 0.01$)在第12周毒品任务中的值显著高于对照组,而在中性任务中3个组均无显著性差异(图3A)。

对F3-alpha波能量值进行重复测量方差分析(表3)发现,组别主效应显著 $F_{(2,86)}=7.70, P < 0.01, \eta^2=0.15$;线索任务主效应显著 $F_{(1,86)}=4.81, P < 0.05, \eta^2=0.05$;测试时间主效应显著 $F_{(1,86)}=26.63, P < 0.001, \eta^2=0.24$;交互效应均不显著($P > 0.05$)。事后比较(图2)发现,在基线和第12周时,3个组的受试者分别在毒品任务中的alpha波能量值均与中性任务无显著性差异;在毒品任务中,有氧结合抗阻组($P < 0.01$)和复合式有氧组($P < 0.05$)第12周的值均显著

高于其基线水平, 而对照组无显著性差异; 在中性任务中, 复合式有氧组第 12 周的值显著高于基线水平 ($P < 0.05$), 其余 2 个组无显著性差异; 此外, 有氧结合抗阻组

($P < 0.01$) 和复合式有氧组 ($P < 0.01$) 在第 12 周毒品任务中的值显著高于对照组, 而在中性任务中 3 个组均无显著性差异 (图 3B)。

表 3 干预前后受试者在不同电极点 alpha 波能量值的差异

Table 3 Differences in Alpha Wave Energy Values at Different Electrode Points before and after Intervention

电极点	组别	基线			第 12 周			P_1	P_2
		毒品任务	中性任务	P	毒品任务	中性任务	P		
Fz	有氧结合抗阻组	-0.57±0.61	-0.11±0.54	<0.05	0.17±0.41	0.19±0.53	>0.05	<0.001	>0.05
	复合式有氧组	-0.54±0.46	-0.10±0.45	<0.05	0.20±0.64	0.21±0.67	>0.05	<0.001	>0.05
	对照组	-0.51±0.43	-0.13±0.36	<0.05	-0.44±0.58	-0.02±0.32	<0.05	>0.05	>0.05
	P	>0.05	>0.05		a>c**, b>c**	>0.05			
F3	有氧结合抗阻组	-0.38±0.55	-0.12±0.46	>0.05	0.19±0.33	0.14±0.53	>0.05	<0.01	>0.05
	复合式有氧组	-0.28±0.64	-0.20±0.44	>0.05	0.26±0.47	0.32±0.61	>0.05	<0.01	<0.05
	对照组	-0.54±0.58	-0.22±0.34	>0.05	-0.38±0.59	-0.10±0.30	>0.05	>0.05	>0.05
	P	>0.05	>0.05		a>c**, b>c**	>0.05			
F4	有氧结合抗阻组	-0.49±0.52	-0.25±0.40	>0.05	0.19±0.50	0.23±0.60	>0.05	<0.01	<0.05
	复合式有氧组	-0.35±0.58	-0.04±0.40	>0.05	0.34±0.51	0.04±0.71	>0.05	<0.01	>0.05
	对照组	-0.50±0.52	-0.22±0.42	>0.05	-0.25±0.36	-0.06±0.38	>0.05	>0.05	>0.05
	P_3	>0.05	>0.05		a>c*, b>c*	>0.05			

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$; P 表示同一时间段毒品任务和中性任务的差异, P_1 表示毒品任务中干预前后的差异, P_2 表示中性任务中干预前后的差异, P_3 表示在相同时间与任务中的组别差异; a 代表有氧结合抗阻组, b 代表复合式有氧组, c 代表对照组, 下同。

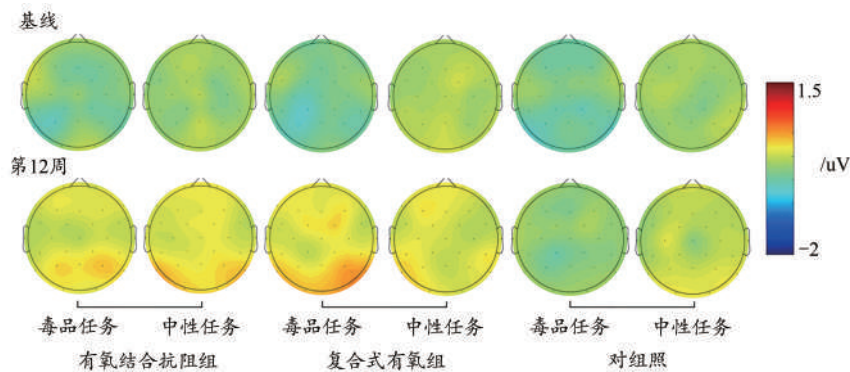


图 2 运动干预前后受试者在不同刺激任务中前额叶 alpha 波变化的地形图

Figure 2. Topographic Map of Changes in Prefrontal Alpha Waves before and after Exercise Intervention in Different Stimulus Tasks

对 F4-alpha 波能量值进行重复测量方差分析 (表 3) 发现, 组别主效应显著 $F_{(2, 86)} = 4.59, P < 0.05, \eta^2 = 0.10$; 线索任务主效应不显著 $F_{(1, 86)} = 3.36, P > 0.05, \eta^2 = 0.04$; 测试时间主效应显著 $F_{(1, 86)} = 25.52, P < 0.001, \eta^2 = 0.23$; 测试时间和线索任务的交互效应显著 $F_{(1, 86)} = 5.16, P < 0.05, \eta^2 = 0.06$; 其余交互效应均不显著 ($P > 0.05$)。进一步简单效应分析 (图 2) 发现, 在基线和第 12 周时, 3 个组的受试者分别在毒品任务中的 alpha 波能量值均与中性任务无显著性差异; 在毒品任务中, 有氧结合抗阻组 ($P < 0.01$) 和复合式有氧组 ($P < 0.01$) 第 12 周的值显著高于其基线水平, 而对照组无显著性差异; 在中性任务中, 有氧结合抗阻组第 12 周的值显著高于基线水平 ($P < 0.05$), 其余 2 个组无显著性差异; 此外, 有氧结合抗阻组 ($P < 0.05$) 和复合式有氧组 ($P < 0.05$) 在第 12 周毒品任务中的值显著高于对照组, 而在中性任务

中 3 个组均无显著性差异 (图 3C)。

2.3 运动锻炼对冰毒依赖者 HRV 的影响

对时域指标中的 SDNN 进行重复测量方差分析 (表 4) 发现, 组别主效应不显著 $F_{(2, 86)} = 3.05, P > 0.05, \eta^2 = 0.07$; 线索任务主效应不显著 $F_{(1, 86)} = 0.13, P > 0.05, \eta^2 = 0.00$; 测试时间主效应显著 $F_{(1, 86)} = 29.20, P < 0.001, \eta^2 = 0.25$; 测试时间和组别的交互效应显著 $F_{(2, 86)} = 6.92, P < 0.01, \eta^2 = 0.14$; 其余交互效应均不显著 ($P > 0.05$)。进一步简单效应分析发现, 在基线和第 12 周时, 3 个组的受试者分别在毒品任务中的 SDNN 均与中性任务无显著性差异; 在毒品任务中, 有氧结合抗阻组 ($P < 0.01$) 和复合式有氧组 ($P < 0.01$) 第 12 周的 SDNN 分别显著高于其基线水平, 而对照组无显著性差异; 在中性任务中, 有氧结合抗阻组 ($P < 0.01$) 和复合式有氧组 ($P < 0.001$) 第 12 周的值分别显著高于其

基线水平,而对照组无显著性差异;此外,有氧结合抗阻组($P<0.05$)和复合式有氧组($P<0.05$)在第12周毒品任务中的值显著高于对照组,且在中性任务中有氧结合抗阻

组($P<0.05$)和复合式有氧组($P<0.01$)也显著高于对照组,而2个运动组均无显著性差异。

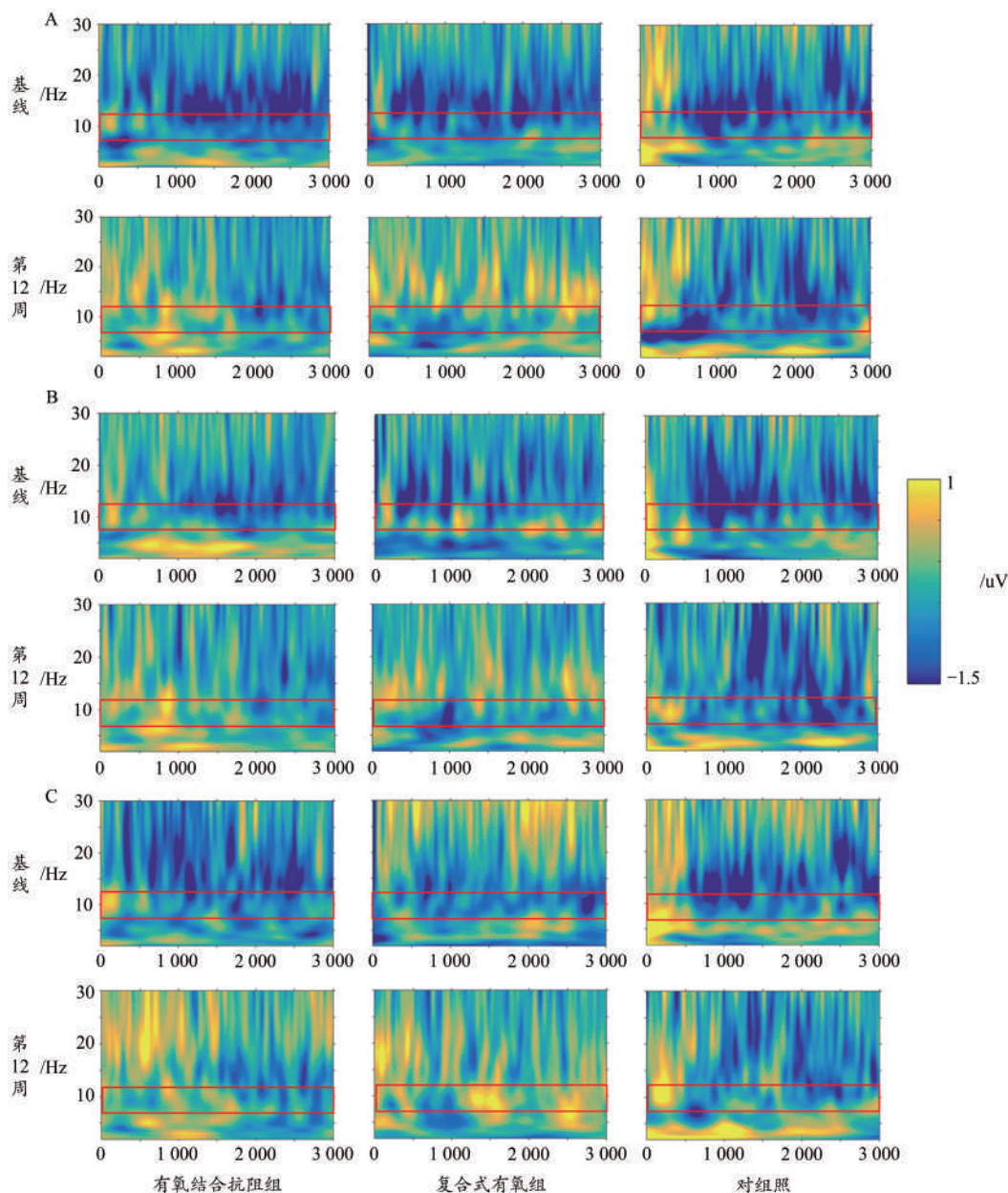


图3 Fz-alpha波(A)、F3-alpha波(B)、F4-alpha波(C)能量值在不同刺激任务中的差异时频图(毒品任务-中性任务)

Figure 3. Time-frequency Diagram of the Difference of Fz-alpha Wave (A), F3-alpha Wave (B), F4-alpha Wave (C) Energy Value in Different Stimulation Tasks (Drug Task-neutral Task)

对时域指标中的RMSSD进行重复测量方差分析(表4)发现,组别主效应显著 $F_{(2,86)}=4.63, P<0.05, \eta^2=0.10$;线索任务主效应显著 $F_{(1,86)}=21.70, P<0.001, \eta^2=0.20$;测试时间主效应显著 $F_{(1,86)}=26.85, P<0.001, \eta^2=0.24$;测试时间和组别的交互效应显著 $F_{(2,86)}=4.21, P<0.05, \eta^2=0.09$;其余交互效应均不显著($P>0.05$)。进一步简单效应分析发现:在基线测试时,3个组的受试者在毒品任务中的RMSSD均分别显著低于中性任务($P<0.05$),在第12周时,仅对照组存在显著性差异($P<0.05$);在毒品任务中,有氧结合抗

阻组($P<0.01$)和复合式有氧组($P<0.01$)第12周的值分别显著高于其基线水平,而对照组无显著性差异;在中性任务中,有氧结合抗阻组($P<0.01$)和复合式有氧组($P<0.05$)第12周的值分别显著高于其基线水平,而对照组无显著性差异;此外,有氧结合抗阻组($P<0.01$)和复合式有氧组($P<0.01$)在第12周毒品任务中的值显著高于对照组,且在中性任务中有氧结合抗阻组($P<0.05$)和复合式有氧组($P<0.05$)也显著高于对照组,而2个运动组均无显著性差异。

表 4 干预前后受试者时域指标的差异

Table 4 Differences of Subjects' Time-Domain Indicators before and after Intervention

指标	组别	基线			第 12 周			P_1	P_2
		毒品任务	中性任务	P	毒品任务	中性任务	P		
SDNN	有氧结合抗阻组	45.13±11.48	44.82±12.68	>0.05	53.95±7.52	53.98±8.99	>0.05	<0.01	<0.01
	复合式有氧组	43.89±7.91	44.14±8.50	>0.05	54.13±12.57	55.91±12.71	>0.05	<0.01	<0.001
	对照组	44.93±9.01	45.91±6.00	>0.05	45.22±6.18	46.39±7.00	>0.05	>0.05	>0.05
	F	>0.05	>0.05		a>c*, b>c*	a>c*, b>c**			
RMSSD	有氧结合抗阻组	31.19±12.17	38.25±9.59	<0.05	42.17±6.35	46.47±5.45	>0.05	<0.01	<0.01
	复合式有氧组	32.50±8.91	40.26±6.04	<0.05	42.08±8.50	46.96±13.22	>0.05	<0.01	<0.05
	对照组	30.99±10.84	38.79±8.81	<0.05	32.82±6.59	39.87±6.68	<0.05	>0.05	>0.05
	P_3	>0.05	>0.05		a>c**, b>c**	a>c*, b>c*			

对频域指标中的 LFn 进行重复测量方差分析(表 5)发现,组别主效应显著 $F_{(2,86)}=5.42, P<0.01, \eta^2=0.11$; 线索任务主效应显著 $F_{(1,86)}=19.73, P<0.001, \eta^2=0.19$; 测试时间主效应显著 $F_{(1,86)}=24.28, P<0.001, \eta^2=0.22$; 测试时间和组别的交互效应显著 $F_{(2,86)}=3.76, P<0.05, \eta^2=0.08$; 其余交互效应均不显著。进一步简单效应分析发现,在基线测试时,3 个组的受试者在毒品任务中的 LFn 均分别显著高于中性任务 ($P<0.05$),而在第 12 周时,仅对照组存在显著性差异 ($P<0.05$); 在毒品任务中,有氧结合抗阻组 ($P<$

0.01)和复合式有氧组 ($P<0.01$)第 12 周的值显著低于基线水平,而对照组无显著性差异;在中性任务中,有氧结合抗阻组 ($P<0.05$)和复合式有氧组 ($P<0.05$)第 12 周的值显著低于基线水平,而对照组无显著性差异;此外,有氧结合抗阻组 ($P<0.001$)和复合式有氧组 ($P<0.01$)在第 12 周毒品任务中的值显著低于对照组,在中性任务中有氧结合抗阻组 ($P<0.05$)和复合式有氧组 ($P<0.05$)也显著低于对照组,而 2 个运动组均无显著性差异。

表 5 干预前后受试者频域指标的差异

Table 5 Differences of Subjects' Frequency Domain Indicators before and after Intervention

指标	组别	基线			第 12 周			P_1	P_2
		毒品任务	中性任务	P	毒品任务	中性任务	P		
LFn	有氧结合抗阻组	63.53±9.49	55.53±11.12	<0.05	51.48±7.55	48.23±7.88	>0.05	<0.01	<0.05
	复合式有氧组	64.33±8.55	56.20±11.28	<0.05	52.49±8.95	48.07±10.85	>0.05	<0.01	<0.05
	对照组	64.69±11.10	56.99±12.12	<0.05	63.16±6.96	55.38±10.77	<0.05	>0.05	>0.05
	P	>0.05	>0.05		a<c***, b<c**	a<c*, b<c*			
HFfn	有氧结合抗阻组	24.60±5.29	31.40±12.49	<0.05	38.33±8.54	40.27±10.60	>0.05	<0.001	<0.01
	复合式有氧组	25.40±5.77	32.80±8.22	<0.05	39.13±10.12	41.27±10.17	>0.05	<0.001	<0.01
	对照组	25.38±6.42	32.06±12.09	<0.05	26.03±7.81	32.56±8.98	<0.05	>0.05	>0.05
	P	>0.05	>0.05		a>c***, b>c***	a>c*, b>c*			

对频域指标中的 HFfn 进行重复测量方差分析(表 5)发现,组别主效应显著 $F_{(2,86)}=5.36, P<0.01, \eta^2=0.10$; 线索任务主效应显著 $F_{(1,86)}=11.91, P<0.01, \eta^2=0.12$; 测试时间主效应显著 $F_{(1,86)}=44.53, P<0.001, \eta^2=0.34$; 测试时间和组别的交互效应显著 $F_{(2,86)}=9.94, P<0.001, \eta^2=0.19$; 其余交互效应均不显著。进一步简单效应分析发现:在基线测试时,3 个组的受试者在毒品任务中的 HFfn 均分别显著低于中性任务 ($P<0.05$),而在第 12 周时,仅对照组存在显著性差异 ($P<0.05$); 在毒品任务中,有氧结合抗阻组 ($P<0.001$)和复合式有氧组 ($P<0.001$)第 12 周的值显著高于基线水平,而对照组无显著性差异;在中性任务中,有氧结合抗阻组 ($P<0.01$)和复合式有氧组 ($P<0.01$)第 12 周的

值显著高于基线水平,而对照组无显著性差异;此外,有氧结合抗阻组 ($P<0.001$)和复合式有氧组 ($P<0.001$)在第 12 周毒品任务中的值显著高于对照组,在中性任务中有氧结合抗阻组 ($P<0.05$)和复合式有氧组 ($P<0.05$)也显著高于对照组,而 2 个运动组均无显著性差异。

2.4 运动后冰毒依赖者的渴求度、EEG 及 HRV 间的关联性

相关性分析发现,无论是在毒品任务还是中性任务中,12 周运动干预后有氧结合抗阻组的毒品渴求度与前额脑区 (Fz、F3 及 F4)的 alpha 波均呈显著负相关,与 HRV SDNN、RMSSD 及 HFfn 指标均呈显著负相关,与 LFn 呈显著正相关,且前额脑区的 alpha 波与 HRV 之间(如 Fz-SDNN、Fz-HFfn、F4-LFn 等)存在不同程度的相关性。同时,12 周

运动干预后复合式有氧组的毒品渴求度与前额脑区(Fz、F3及F4)的alpha波均呈显著负相关,与SDNN、RMSSD及HFfn指标均呈显著负相关,与LFfn呈显著正相关,且前额脑区的alpha波与HRV之间(如Fz-RMSSD、Fz-HFfn、F4-LFfn等)存在不同程度的相关性。此外,12周运动干预后

对照组在毒品任务中的渴求度与前额脑区(Fz、F3及F4)的alpha波均呈显著负相关,而在中性任务中仅具有部分相关性;在毒品和中性任务中渴求度与SDNN、RMSSD及HFfn指标均呈显著负相关,与LFfn呈显著正相关,但前额脑区的alpha波与HRV之间的相关性相对较弱(表6)。

表6 第12周有氧结合抗阻组、复合式有氧组和对照组在不同线索任务中各变量的相关性分析

Table 6 Correlation Analysis of Each Variable in Different Cue Tasks in the Aerobic Combined Resistance Group, Compound Aerobic Group and Control Group at the 12th Week

组别	变量	渴求度	Fz-alpha	F3-alpha	F4-alpha	SDNN	RMSSD	LFfn	HFfn
有氧结合	渴求度	—	—	—	—	—	—	—	—
抗阻组	Fz-alpha	-0.33**(-0.36**)	—	—	—	—	—	—	—
	F3-alpha	-0.21*(-0.18*)	0.42**(0.30*)	—	—	—	—	—	—
	F4-alpha	-0.24*(-0.25*)	0.36**(0.47**)	0.22*(0.30*)	—	—	—	—	—
	SDNN	-0.29*(-0.34**)	0.21*(0.26*)	0.14(0.21*)	0.20*(0.21*)	—	—	—	—
	RMSSD	-0.20*(-0.30*)	0.29*(0.28*)	0.13(0.09)	0.16*(0.18*)	0.53**(0.68***)	—	—	—
	LFfn	0.21*(0.27*)	-0.24*(-0.30*)	-0.11(-0.13)	-0.19*(-0.19*)	-0.50**(-0.52**)	-0.57***(-0.55**)	—	—
	HFfn	-0.30*(-0.35**)	0.27*(0.34**)	0.19*(0.22*)	0.22*(0.20*)	0.49**(0.56***)	-0.63***(-0.64***)	0.61***(-0.63***)	—
复合式	渴求度	—	—	—	—	—	—	—	—
有氧组	Fz-alpha	-0.34**(-0.35**)	—	—	—	—	—	—	—
	F3-alpha	-0.19*(-0.23*)	0.35**(0.44**)	—	—	—	—	—	—
	F4-alpha	-0.27*(-0.19*)	0.48**(0.32**)	0.33**(0.19*)	—	—	—	—	—
	SDNN	-0.32**(-0.33**)	0.23*(0.27*)	0.17*(0.22*)	0.23*(0.20*)	—	—	—	—
	RMSSD	-0.21*(-0.28*)	0.26*(0.28*)	0.08(0.12)	0.17*(0.17*)	0.55**(0.65***)	—	—	—
	LFfn	0.20*(0.25*)	-0.22*(-0.30*)	-0.11(-0.10)	-0.15*(-0.21*)	-0.49**(-0.53**)	-0.52**(-0.58***)	—	—
	HFfn	-0.32*(-0.36**)	0.29*(0.35**)	0.19*(0.23*)	0.16*(0.24*)	0.51**(0.60***)	-0.65***(-0.64***)	0.66***(-0.63***)	—
对照组	渴求度	—	—	—	—	—	—	—	—
	Fz-alpha	-0.26*(-0.18*)	—	—	—	—	—	—	—
	F3-alpha	-0.17*(-0.13)	0.14(0.16*)	—	—	—	—	—	—
	F4-alpha	-0.19*(-0.14)	0.17*(0.22*)	0.13(0.16*)	—	—	—	—	—
	SDNN	-0.21*(-0.20*)	0.17*(0.18*)	0.11(0.12)	0.13(0.16*)	—	—	—	—
	RMSSD	-0.16*(-0.22*)	0.13(0.10)	0.09(0.13)	0.11(0.12)	0.44**(0.45**)	—	—	—
	LFfn	0.15*(0.18*)	-0.21*(-0.22*)	-0.10(-0.14)	-0.16*(-0.17*)	-0.30*(-0.38**)	-0.37**(-0.39**)	—	—
	HFfn	-0.22*(-0.30**)	0.15*(0.18*)	0.14(0.16*)	0.12(0.15*)	0.40**(0.41**)	-0.35**(-0.40**)	0.36**(0.41**)	—

注:括号内数字为“中性任务”中的数据。

3 讨论与分析

3.1 运动锻炼对冰毒依赖者毒品渴求度的减弱效益

毒品渴求度是衡量冰毒依赖者康复效益的重要指标,而运动锻炼对药物依赖者毒品渴求的减弱效益已得到研究证实(Ellingsen et al., 2018; Rawson et al., 2015)。研究显示,有氧运动和抗阻运动均能有效降低冰毒依赖者的渴求度。如有中等或高强度有氧运动能够通过改善冰毒依赖者的大脑抑制功能,进而有效改善其对毒品的渴求度(王东石等, 2017; 赵琦等, 2020; Wang et al., 2016);而抗阻运动也可通过增强冰毒依赖者的正性情绪和改善注意偏向来减缓心理渴求,进而降低复吸风险,且中等强度抗阻运动的改善效益最佳(彭波等, 2021)。在此基础上,本研究主要考察了中等强度有氧结合抗阻运动以及复合式有氧运动对改善冰毒依赖者渴求度的效益,结果发现12周干预后2个运动组的渴求度均显著低于对照组和各自

的基线水平,这充分揭示了运动锻炼对冰毒依赖者的康复效应;同时,2个运动组的渴求度虽然无显著性差异,但有氧结合抗阻组的渴求度呈现出低于复合式有氧组的趋势。结果提示,随着干预周期的延长,或许有氧结合抗阻运动对降低依赖者毒品渴求度的效果更优,但这需要后续研究的深入探究。

3.2 运动锻炼对冰毒依赖者前额脑区的改善效益

在毒品成瘾环路中,前额叶是迫使依赖者对毒品产生神经适应性行为和冲动渴求的重要脑区(Parsegian et al., 2014)。研究表明,冰毒依赖者在执行相关功能时,前额叶和纹状体的激活会出现下降特征,并伴随认知控制能力的显著降低(London et al., 2004),而额区alpha波的能量值可有效反映大脑的认知功能(Schmeichel et al., 2015)。有研究以额区Fz电极点alpha波为靶点,发现有氧运动对冰毒成瘾者可通过对毒品线索暴露条件下alpha波的增强,

提升其在药物渴求状态下的自我调控功能(赵琦等,2020)。同时,左侧和右侧前额叶的活动与个体的积极和消极情绪有关(Jaworska et al.,2012;Reid et al.,2010),而通过对F3和F4电极点的alpha波能量值的监测,能分别有效反映左侧和右侧前额叶的活动(Allen et al.,2003)。

本研究通过EEG同步监测冰毒依赖者分别在毒品和中性任务中前额脑区的alpha脑波活动特征,结果发现,在基线测试时,无论是在毒品任务还是中性任务中,3个组依赖者的Fz-alpha、F3-alpha及F4-alpha波能量值均不存在显著的组别差异。然而,与中性任务相比,基线时不同组别的依赖者在毒品任务中的Fz-alpha波能量值均显著更低,而不同组别的F3-alpha波和F4-alpha波能量值均不存在显著的线索任务差异。12周运动干预后,2个运动组在毒品任务中的Fz-alpha、F3-alpha及F4-alpha波能量值均显著提高,且Fz-alpha波能量值与中性任务已无显著性差异,而在中性任务中无显著性变化;在中性任务中2个运动组第12周的Fz-alpha波能量值与其基线无显著性差异,而复合式有氧组的F3-alpha波能量值显著高于基线水平,有氧结合抗阻组的F4-alpha波能量值显著高于基线水平。在干预前后,对照组在毒品和中性任务中的Fz-alpha、F3-alpha及F4-alpha波能量值均无显著性变化,且在第12周时Fz-alpha波能量值仍显著低于中性任务。研究认为,alpha波能量值的升高反映了个体在有效抑制对环境的关注度,同时分散对不适当感知信息的注意力(Athanasidou et al.,2018)是抑制脑区异常激活的重要体现。这就表明,长期冰毒依赖会损伤个体的认知功能,导致依赖者相比于中性线索,在面临毒品暴露线索时额叶中线出现异常激活,进而难以有效抑制对毒品的渴望,这或许是复吸的重要生物学基础。而规律的运动锻炼可以调节依赖者在面临毒品暴露时额叶中线、左侧和右侧前额叶脑区等前额脑区的异常激活现象,进而提高在毒品暴露环境中的抑制控制和情绪调节能力并缓解复吸冲动,这与以往研究较为一致(赵琦等,2020)。此外,本研究并未发现干预后2个运动组在毒品或中性任务中的前额脑区激活水平存在显著性差异,说明2种运动模式对提升自我控制能力的作用相似;而对于复合式有氧运动和有氧结合抗阻运动分别提高了依赖者在中性任务中的左侧和右前额叶脑区激活水平,这或许与不同运动类型对动员个体左右脑区认知资源参与的差异有关。

3.3 运动锻炼对冰毒依赖者HRV的调控效益

HRV是通过逐次心跳间R-R间期随时间发生的微小差异,并以此反映心脏自主神经活性和定量评估心脏交感和迷走神经张力及其平衡性的非侵入性指标(Dreifus et al.,1993)。低水平的HRV与猝死、全因死亡率以及心血管疾病的风险增加有关(王婷婷等,2019;Frasure-Smith et al.,2008)。因此,提高HRV水平并促进交感和迷走神经的动

态平衡对于促进冰毒依赖者的康复至关重要。本研究发现,与中性任务相比,基线时不同组别的依赖者在毒品任务中的RMSSD和HF_n显著更低、LF_n显著更高,而SDNN无显著性差异。这就表明当急性暴露于毒品线索时,冰毒依赖者的迷走神经容易受到抑制,并引起交感神经的异常激活,两者间的平衡倾向于交感神经占优势,进而导致心率加快和心脏自主神经的失衡,这或许与长期冰毒滥用损伤了HRV活性有关(Dolezal et al.,2014;Henry et al.,2012)。12周运动干预后,2个运动组的冰毒依赖者在毒品和中性任务中的SDNN、RMSSD和HF_n均得以显著提高,LF_n显著降低,而对照组无显著性变化;同时,2个运动组的RMSSD、LF_n及HF_n已不存在显著的线索任务差异,而对照组在毒品任务中的RMSSD和HF_n仍显著低于中性任务,且LF_n显著高于中性任务。这与以往研究结果较为一致,即运动锻炼能够显著增加依赖者的HRV,正向调控迷走神经并促进自主神经平衡改善(Dolezal et al.,2014),而高HRV的个体在认知和注意任务中的情绪和自我调节能力更强(王维等,2015;Thayer et al.,2009)。但以往研究并没有实时监控并比较冰毒依赖者在不同线索暴露任务中HRV活动的特征及差异,而本研究揭示了急性毒品暴露可导致依赖者心脏自主神经的紊乱,而交感神经张力的升高和迷走神经张力的下降都容易引发心动过速或猝死,提高迷走神经张力可以增强迷走神经对心脏的保护作用(Huikuri et al.,1999)。同时,不论是在毒品还是中性线索暴露中,有氧结合抗阻或复合式有氧运动均可通过增强依赖者的迷走神经调节,减弱交感神经异常活化,进而改善心脏自主神经的动态平衡并提高整体HRV水平。但本研究并未观察到2种运动模式对冰毒依赖者HRV的调控效益存在显著差异,这需要在后续研究中进一步探究。

3.4 运动后冰毒依赖者渴求度、EEG及HRV间的关联效应

脑-心互动理论认为,大脑的兴奋度和心脏自主神经系统之间存在相互作用关系(Holzman et al.,2017;Natelson,1985),这在中风患者(Battaglini et al.,2020)、意识障碍(Riganello et al.,2021)等特殊人群中得到了证实,但在毒品依赖群体中的相关研究较少。上文已揭示了长期冰毒滥用会分别损伤依赖者的前额脑区功能和HRV活性,进而难以抑制面临毒品时的用药冲动和渴求,而规律的运动锻炼能够分别改善其前额脑区异常激活和调控心脏自主神经的动态平衡,最终弱化毒品渴求度。那么,运动锻炼对依赖者的康复促进效应背后是否存在大脑和心脏之间的关联性呢?基于此,本研究考察了运动锻炼后依赖者渴求度、EEG及HRV之间的关系,结果发现无论是在毒品任务还是中性任务中,12周有氧结合抗阻或复合式有氧运动后依赖者前额脑区的alpha波能量值与HRV中的SDNN、RMSSD及HF_n均呈不同程度的正相关,与LF_n呈不同程度的负相关,提示前额脑区激活水平越低,心脏迷走神经活性

越高,交感神经活性越低。在对照组中依赖者前额脑区的alpha波与交感神经和迷走神经的相关性较弱。同时,3个组第12周时的毒品渴求度分别与前额脑区的alpha波能量值和SDNN、RMSSD及HF_n呈显著负相关,与LF_n呈显著正相关,提示前额脑区激活水平越低,心脏迷走神经活性越高且交感神经活性越低,渴求度也就越低。研究表明,前额叶皮质活动可通过迷走神经系统影响心脏活动(Holzman et al., 2017; Lane et al., 2009),而抑制控制、注意调节和工作记忆等执行功能与HRV活性有关(Thayer et al., 2009),迷走神经激活与前额叶区域更大的皮质厚度(Mather et al., 2018)以及在注意力和执行功能测试中更好的任务表现相关(Forte et al., 2019; Stenfors et al., 2016)。故本研究推测在有氧结合抗阻或复合式有氧运动的介导下,可有效促进冰毒依赖者的前额叶皮质活动与心脏迷走神经介导的HRV活性的相互调节。表现为在特定情景任务下,当前额叶的异常激活受到抑制时,心脏迷走神经在自主神经的动态平衡中占主导作用,通过大脑自上而下和心脏自下而上的互动耦合模式,保持良性的脑-心系统协调激活状态。这有助于增强依赖者的抑制控制和情绪调节等自我调控能力,进而在脑-心系统相互作用下弱化依赖者的用药冲动和毒品渴求。

4 结论与展望

4.1 结论

1)中等强度的有氧结合抗阻运动和复合式有氧运动均能有效降低冰毒依赖者的毒品渴求度,且有氧结合抗阻运动或许更具改善潜力。

2)冰毒依赖者在急性毒品暴露情景中会出现额叶中线异常激活的现象,而有氧结合抗阻运动或复合式有氧运动均能调节依赖者在面临毒品暴露时前额脑区的异常激活,进而达到提高其在毒品暴露环境中的抑制控制能力并缓解复吸冲动的目的,且不同运动类型或许对动员左侧和右前额叶脑区的认知资源参与程度有所差异。

3)急性毒品暴露会引起冰毒依赖者交感神经的异常激活和迷走神经活性抑制,导致心脏自主神经紊乱。而运动锻炼可通过增强依赖者在毒品或中性线索暴露中的迷走神经调节,减弱交感神经异常活化,进而改善心脏自主神经的动态平衡并提高整体HRV水平。

4)规律的运动锻炼能改善依赖者面临刺激时前额脑区的异常激活现象,并伴随心脏自主神经由交感神经占优势转变为迷走神经占优势的动态调控,进而可能介导了情绪调节和抑制控制等能力的提高,有助于保持在特定情景中的脑-心系统协调激活状态,进而有效降低依赖者的毒品渴求,但2种运动模式的效果并无明显差异。

4.2 展望

1)在样本纳入上,本研究仅选取了男性冰毒依赖者,未

来研究可纳入女性依赖者,进行相应指标的跨性别比较,进而揭示运动锻炼后男、女依赖者在测量指标变化方面的异同。

2)在实验设计上,本研究主要考察了脑-心互动视角下中等强度运动锻炼对冰毒依赖者大脑、心脏及渴求度的康复促进效应及机制,未来可进一步探讨不同强度运动锻炼对调控冰毒依赖者脑-心系统的剂量效应。

3)在指标选取上,本研究主要探讨了运动锻炼后冰毒依赖者前额脑区与心脏自主神经的相关性,后续可通过采集更多的神经生理指标深入揭示多变量的综合效应,并挖掘大脑、自主神经与毒品渴求之间的因果关联。

参考文献:

- 白露,马慧,黄宇霞,等,2005.中国情绪图片系统的编制:在46名中国大学生中的试用[J].中国心理卫生杂志,19(11):719-722.
- 国家禁毒委员会办公室,2022.2021年中国毒情形势报告[M].北京:中华人民共和国公安部.
- 李可峰,闫前,丁荔洁,等,2021.中等强度抗阻训练对甲基苯丙胺成瘾者脑功能连接的影响[J].体育科学,41(3):25-33.
- 彭波,陈佳尘,苏锐,等,2021.抗阻运动对甲基苯丙胺类毒品依赖者心理渴求及诱发因素的影响及其剂量效应[J].中国运动医学杂志,40(1):46-54.
- 齐玉刚,王津,徐冬青,2020.有氧抗阻结合与单纯有氧运动减重干预的对比研究[J].天津体育学院学报,35(5):541-544.
- 容浩,刘佳宁,刘旭东,等,2019.有氧运动改善甲基苯丙胺成瘾者执行控制能力的脑机制研究[J].体育学刊,26(3):138-144.
- 宋清华,2014.太极拳运动对老年人呼吸及心脑血管循环功能的影响[J].中国老年学杂志,34(24):7074-7075.
- 谭晓辉,2019.甲基苯丙胺通过Chop相关内质网应激途径介导血管平滑肌细胞凋亡[D].广州:南方医科大学.
- 王东石,朱婷,2017.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[J].体育科学,37(7):50-59.
- 王坤,罗炯,张庭然,等,2022.间歇性有氧健身操对女性冰毒依赖者消极情绪、心肺适能及用药渴求的影响及其剂量效应[J].中国运动医学杂志,41(1):23-32.
- 王坤,张庭然,罗炯,2021.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[J].体育科学,41(40):88-97.
- 王婷婷,吴杰,张缙韬,等,2019.大学生焦虑状态下心率变异性指标分析[J].中国学校卫生,4(6):919-920.
- 王维,李须,陈红,2015.心率变异性是自我调节的生物指标[J].心理技术与应用,17(1):16-19.
- 赵琦,刘佳宁,陆颖之,等,2020.长期有氧运动改善甲基苯丙胺成瘾者对毒品的渴求:来自alpha波的证据[J].中国运动医学杂志,39(10):804-809.
- ALLEN J J, HARMON-JONES E, CAVENDER J H, 2003. Manipulation of frontal EEG asymmetry through biofeedback kalters self-reported emotional responses and facial EMG[J]. Psychophysiology, 38(4):685-693.
- ATHANASIOU A, KLADOS M A, STYLIADIS C, et al., 2018. Investigating the role of alpha and beta rhythms in functional motor networks[J]. Neuroscience, 378:54-70.
- BATTAGLINI D, ROBBA C, DA SILVA A L, et al., 2020. Brain-heart

- interaction after acute ischemic stroke[J]. *Critical Care*, 24(1): 163.
- CABRAL D A R, TAVARES V D O, DA COSTA K G, et al., 2018. The benefits of high intensity exercise on the brain of a drug abuser[J]. *Global J Health Sci*, 10(6): 123-135.
- CRITCHLEY H D, CORFIELD D R, CHANDLER M P, et al., 2000. Cerebral correlates of autonomic cardiovascular arousal: A functional neuroimaging investigation in humans [J]. *J Physiol*, 523 (1) : 259-270.
- DARKE S, DARKE S, KAYE S, et al., 2008. Major physical and psychological harms of methamphetamine use[J]. *Drug Alcohol Rev*, 27(3):253-262.
- DOLEZAL B A, CHUDZYNSKI J, DICKERSON D, et al., 2014. Exercise training improves heart rate variability after methamphetamine dependency[J]. *Med Sci Sports Exer*, 46(6): 1057-1066.
- DREIFUS L S, AGARWAL J B, BOTVINICK E H, 1993. Heart rate variability for risk stratification of life-threatening arrhythmias[J]. *J Am Coll Cardiol*, 22(3): 948-950.
- ELLINGSEN M M, JOHANNESSEN S L, MARTINSEN E W, et al., 2018. Effects of acute exercise on drug craving, self-esteem, mood and affect in adults with poly-substance dependence: Feasibility and preliminary findings[J]. *Drug Alcohol Rev*, 37(6): 789-793.
- FORTE G, FAVIERI F, CASAGRANDE M, 2019. Heart rate variability and cognitive function: A systematic review[J]. *Front Neurosci*, doi: 10.3389/fnins.2019.00710.
- FRASURE-SMITH N, LESPÉRANCE F, 2008. Depression and anxiety as predictors of 2-year cardiac events in patients with stable coronary artery disease[J]. *Arch Gen Psychiatry*, 65(1): 62-71.
- GIATTINO C M, GARDNER J E, SBAHI F M, et al., 2017. Intraoperative frontal alpha-band power correlates with preoperative neurocognitive function in older adults [J]. *Front Syst Neurosci*, doi: 10.3389/fnsys.2017.00024.
- HAGEMANN D, NAUMANN E, BECKER G, et al., 1998. Frontal brain asymmetry and affective style: A conceptual replication [J]. *Psychophysiology*, 35(4): 372-388.
- HENRY B L, MINASSIAN A, PERRY W, 2012. Effect of methamphetamine dependence on heart rate variability[J]. *Addict Biol*, 17(3): 648-658.
- HILLMAN C H, DROBES D J, 2012. Physical activity and cognitive control: Implications for drug abuse[J]. *Child Dev Perspect*, 6(4): 367-373.
- HOLZMAN J B, BRIDGETT D J, 2017. Heart rate variability indices as bio-markers of top-down self-regulatory mechanisms: A Meta-analytic review [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 74(8): 233-255.
- HRISHI A P, LIONEL K R, PRATHAPADAS U, et al., 2019. Head rules over the heart: Cardiac manifestations of cerebral disorders [J]. *Indian J Critical Care Med*, 23(7): 329-335.
- HUIKURI H V, MAKIKALLIO T, AIRAKSINEN K E, et al., 1999. Measurement of heart rate variability: A clinical tool or a research toy?[J]. *J Am Coll Cardiol*, 34(7): 1878-1883.
- JAWORSKA N, BLIER P, FUSEE W, et al., 2012. Alpha power, alpha asymmetry and anterior cingulate cortex activity in depressed males and females[J]. *J Psychiat Res*, 46(11): 1483-1491.
- KAYE S, MCKETIN R, DUFLOU J, et al., 2007. Methamphetamine and cardiovascular pathology: A review of the evidence[J]. *Addiction (Abingdon, England)*, 102(8): 1204-1211.
- KLIMESCH W, 1999. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis[J]. *Brain Res Rev*, 29(2-3): 169-195.
- KUMRAL D, SCHAARE H L, BEYER F, et al., 2019. The age-dependent relationship between resting heart rate variability and functional brain connectivity[J]. *Neuroimage*, 185: 521-533.
- LANE R D, MCRAE K, REIMAN E M, et al., 2009. Neural correlates of heart rate variability during emotion [J]. *Neuroimage*, 41 (1) : 213-222.
- LELAND D S, ARCE E, MILLER D A, et al., 2008. Anterior cingulate cortex and benefit of predictive cueing on response inhibition in stimulant dependent individuals[J]. *Biol Psychiatry*, 63(2): 184-190.
- LONDON E D, SIMON S L, BERMAN S M, et al., 2004. Mood disturbances and regional cerebral metabolic abnormalities in recently abstinent methamphetamine abusers[J]. *Arch Gen Psychiatry*, 61(1): 73-84.
- MACHETANZ K, BERELIDZE L, GUGGENBERGER R, et al., 2021. Brain-heart interaction during transcutaneous auricular vagus nerve stimulation[J]. *Front Neurosci*, doi: 10.3389/fnins.2021.632697.
- MATHER M, THAYER J, 2018. How heart rate variability affects emotion regulation brain networks[J]. *Curr Opin Behav Sci*, 19: 98-104.
- MEREDITH C W, JAFFE C, ANG-LEE K, et al., 2005. Implications of chronic methamphetamine use: A literature review[J]. *Harv Rev Psychiatry*, 13(3): 141-154.
- MORALES A M, KOHNO M, ROBERTSON C L, et al., 2015. Gray-matter volume, midbrain dopamine D2/D3 receptors and drug craving in methamphetamine users[J]. *Mol Psychiatr*, 20(6): 764-771.
- NATELSON B H, 1985. Neurocardiology: An interdisciplinary area for the 80 s[J]. *Archives Neurol*, 42(2): 178-184.
- NUGENT A C, BAIN E E, THAYER J F, et al., 2011. Sex differences in the neural correlates of autonomic arousal: A pilot PET study[J]. *Int J Psychophysiol*, 80(3): 182-191.
- PANENKA W J, PROCYSHYN R M, LECOMTE T, et al., 2013. Methamphetamine use: A comprehensive review of molecular, pre-clinical and clinical findings [J]. *Drug and Alcohol Dependence*, 129(3): 167-179.
- PARSEGAN A, SEE R E, 2014. Dysregulation of dopamine and glutamate release in the prefrontal cortex and nucleus accumbens following methamphetamine self-administration and during reinstatement in rats[J]. *Neuropsychopharmacology*, 39(4): 811-822.
- PATRON E, MENNELLA R, MESSEROTTI BENVENUTI S, et al., 2019. The frontal cortex is a heart-brake: Reduction in delta oscillations is associated with heart rate deceleration [J]. *Neuroimage*, 188: 403-410.
- PEACOCK A, LEUNG J, LARNEY S, et al., 2018. Global statistics on alcohol, tobacco and illicit drug use: 2017 status report[J]. *Addiction*, 113(10): 1905-1926.
- RAWSON R A, CHUDZYNSKI J, MOONEY L, et al., 2015. Impact of an exercise intervention on methamphetamine use outcomes post-residential treatment care[J]. *Drug and Alcohol Dependence*, 156: 21-28.
- REID S A, DUKE L M, ALLEN J, 2010. Resting frontal electroencephalographic asymmetry in depression: Inconsistencies suggest the need to identify mediating factors[J]. *Psychophysiology*, 35(4): 389-404.
- RIGANELLO F, VATRANO M, CAROZZO S, et al., 2021. The time-course of electrophysiological brain-heart interaction in DoC patients[J].

- Brain Sci, doi: 10.3390/brainsci11060750.
- ROBERTSON C L, ISHIBASHI K, CHUDZYNSKI J, et al., 2016. Effect of exercise training on striatal dopamine D2/D3 receptors in methamphetamine users during behavioral treatment [J]. *Neuropsychopharmacology*, 41(6): 1629-1636.
- SALO R, URSU S, BUONOCORE M H, et al., 2009. Impaired prefrontal cortical function and disrupted adaptive cognitive control in methamphetamine abusers: A functional magnetic resonance imaging study [J]. *Biol Psychiatry*, 65(8): 706-709.
- SCHMEICHEL B J, CROWELL A, HARMON-JONES E, 2015. Exercising self-control increases relative left frontal cortical activation [J]. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 11(2): 282-288.
- STENFORS C U, HANSON L M, THEORELL T, et al., 2016. Executive cognitive functioning and cardiovascular autonomic regulation in a population-based sample of working adults [J]. *Front Psychol*, doi: 10.3389/fpsyg.2016.01536.
- THAYER J F, HANSEN A L, SAUS-ROSE E, et al., 2009. Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: The neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health [J]. *Ann Behav Med*, 37(2): 141-153.
- THOMPSON P D, ARENA R, RIEBE D, et al., 2013. ACSM's new preparticipation health screening recommendations from ACSM's guidelines for exercise testing and prescription, ninth edition [J]. *Curr Sports Med Rep*, 12(4): 215-217.
- WANG D S, ZHOU C L, CHANG Y K, 2015. Acute exercise ameliorates craving and inhibitory deficits in methamphetamine: An ERP study [J]. *Physiol Behav*, 147: 38-46.
- WANG D S, ZHOU C L, ZHAO M, et al., 2016. Dose-response relationships between exercise intensity, cravings, and inhibitory control in methamphetamine dependence: An ERPs study [J]. *Drug Alcohol Depend*, 161: 331-339.
- WEBB T L, MILES E, SHEERAN P, 2012. Dealing with feeling: A Meta-analysis of the effectiveness of strategies derived from the process model of emotion regulation [J]. *Psychol Bull*, 138(4): 775-808.
- XU C Y, ZHENG A, HE T Y, et al., 2020. Brain-heart axis and biomarkers of cardiac damage and dysfunction after stroke: A systematic review and Meta-analysis [J]. *Int J Mol Sci*, doi: 10.3390/ijms21072347.
- YASUI H, TAKAMOTO K, HORI E, et al., 2010. Significant correlation between autonomic nervous activity and cerebral hemodynamics during thermotherapy on the neck [J]. *Auton Neurosci*, 156(1-2): 96-103.

Rehabilitation Effect of Exercise on Methamphetamine Addicts from the Perspective of Brain-Heart Interaction: The Linked Evidence from EEG and HRV

WANG Kun¹, ZHANG Tingran¹, LI Yan², LIU Hengxu¹, LUO Jiong^{1*}

1. Research Centre for Exercise Detoxification, College of Physical Education, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Sports Work Department, College of Liberal Studies, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China

Abstract: Objective: Exercise was considered to be able to regulate the brain, heart and drug craving of methamphetamine (MA) addicts, but the internal relationship and influencing mechanism of the variables needed to be further explored. Methods: Fifty-five male MA addicts in a drug rehabilitation education and correction center in Chongqing were selected. They were randomly divided into the aerobic + resistance training group, compound aerobic training group, and control group. The EEG and HRV instruments were used to collect the alpha wave energy value and HRV activity of the prefrontal brain area in different cue exposure tasks, and an analog rating scale (VAS) was used to assess cravings. Results: 1) After 12 weeks of intervention, the drug cravings in the aerobic + resistance training group and the compound aerobic training group were significantly lower than those in the control group. 2) Compared with the neutral task, the Fz-alpha wave energy value, RMSSD and HFn of the three groups of dependents were significantly lower in the drug task, but the LFn was significantly higher at baseline; after intervention, the Fz-alpha, F3-alpha, and F4-alpha wave of the two exercise groups in the drug task were significantly higher than that of the control group, and the SDNN, RMSSD, and HFn in drug and neutral tasks were significantly higher than that of the control group, and Fz-alpha wave, RMSSD, LFn and HFn had no significant difference in cue task; there was no significant difference in prefrontal alpha wave energy and HRV between the two exercise groups in drug and neutral tasks; the F3-alpha wave of the compound aerobic training group in the neutral task and the F4-alpha wave of the aerobic + resistance training group were significantly higher than the baseline level; there were no significant changes in the prefrontal alpha wave energy and HRV of the control group in the drug and neutral tasks after the intervention. 3) In the drug and neutral tasks, the alpha wave energy value of the prefrontal brain area in the two exercise groups was positively correlated with SDNN, RMSSD, and HFn, and negatively correlated with LFn after intervention, but the correlation in the control group was weak; the drug craving of the three groups was negatively correlated with the alpha wave, SDNN, RMSSD, and HFn in the prefrontal brain area, and positively correlated with LFn. Conclusions: Acute drug exposure could induce abnormal activation of frontal midline and autonomic nerves in MA addicts, while moderate-intensity aerobic combined with resistance training and compound aerobic training could improve the abnormal activation of prefrontal brain regions in addicts when facing stimulation, which can help to maintain the coordinated activation of the brain-heart system in a specific situation, thereby effectively reducing the drug craving in MA addicts, but there was no significant difference in the effectiveness of the two exercise prescriptions.

Keywords: MA addicts; exercise; drug craving; brain activation; heart rate variability; brain-heart interaction