

·运动人体科学·

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

容浩¹, 刘佳宁², 刘旭东², 周成林², 陈一凡²

(1.暨南大学珠海校区 体育部, 广东 珠海 519070; 2.上海体育学院 心理学院, 上海 200438)

摘要: 探究不同强度急性有氧运动对甲基苯丙胺类(methamphetamine, MA)成瘾者前额皮层活性及其执行控制能力的影响, 并明确能够最大程度改善 MA 成瘾者执行控制能力的短时有氧运动干预方式。通过行为测量和功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS), 将 MA 成瘾者分为两组, 分别接受 30 min 中等或高强度功率自行车运动干预, 以探测干预前后 MA 成瘾者在 Stroop 任务中的行为表现和前额皮层活动变化。结果显示: (1)行为层面上不同强度急性有氧运动间无显著差异, 均显著降低了 Stroop 效应的反应时; (2)神经层面上两组被试者间存在差异, 中等强度组被试者右侧 DLPFC 的[HbO]显著高于高强度组; 而高强度组被试者左侧 DLPFC 及右侧 VLPFC 的[HbO]在运动干预后显著增加。结论: 30 min 的中等、高强度有氧运动均能够提高 MA 成瘾者执行控制的任务表现, 但高强度带来了更多前额皮层的活性增强(包括左侧 DLPFC 及右侧 VLPFC), 推测高强度急性有氧运动更有利于成瘾个体恢复执行控制能力。

关键词: 甲基苯丙胺成瘾; 急性有氧运动; 执行控制; 功能性近红外光谱技术

中图分类号: G804.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2019)03-0138-07

A study of the brain mechanism of aerobic exercise improving the execution control ability of methamphetamine addicts

RONG Hao¹, LIU Jia-ning², LIU Xu-dong², ZHOU Cheng-lin², CHEN Yi-fan²

(1.Department of Physical Education, Zhuhai Campus of Jinan University, Zhuhai 519070, China;

2.Department of Psychology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: In order to probe into the effect of different intensities of acute aerobic exercise on the prefrontal cortical activity and execution control ability of methamphetamine (MA) addicts, and to specify the way of short-term aerobic exercise intervention that can improve the execution control ability of MA addicts to the maximum extent, the authors, by means of behavior measurement and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), divided MA addicts into two groups, which accepted 30min medium or high intensity cycle ergometer exercise intervention respectively, so as to detect the changing of behavior performance and prefrontal cortical activity of MA addicts during the Stroop task before and after intervention. The results showed the followings: (1) in terms of behavior, there was no significant difference between different intensities of acute aerobic exercise, both reduced the response time of the Stroop effect significantly; (2) in terms of nerve, there was a difference between the testees in the two groups, the [HbO] of the right DLPFC of the testees in the medium intensity group was significantly higher than that of the testees in the high intensity group; while the [HbO] of the left DLPFC and the right VLPFC of the testees in the high intensity group increased significantly after exercise intervention. Conclusions: 30min medium and high intensity aerobic exercise can improve the task performance of execution control of MA addicts, but high intensity aerobic exercise brought the activity enhancement of more prefrontal cortex (including the left DLPFC and the right VLPFC). It was speculated that high intensity acute aerobic exercise is more conducive to MS addiction individuals

收稿日期: 2019-02-21

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(17ZDA330)。

作者简介: 容浩(1979-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向: 锻炼心理学、体育人文社会学。E-mail: ronghao2005@163.com 通讯作者: 陈一凡

recovering their execution control ability.

Key words: methamphetamine addiction; acute aerobic exercise; executive control; fNIRS

药物成瘾是一种表现为持续性渴求和强迫性觅药行为的慢性复发性脑病^[1]。众多研究发现,执行控制缺陷在药物成瘾的发展和维持中起着关键作用^[2]。执行控制是对任务活动的监控、调节并做出计划的认知控制加工过程,其功能失调是成瘾的核心特征之一^[3]。大量影像学研究已证明,成瘾人群的执行控制等功能存在异常,与长期使用成瘾物质致使的前额皮层受损有关^[4]。受损后的成瘾个体无法正确做出计划、决策,进行自我调整等^[5],难以控制强迫性的药物寻求,即使戒断后仍然容易出现复吸^[6]。近年来有研究者提出,通过针对性地提高成瘾个体的认知功能来治疗药物成瘾^[7],有助于提高戒断成功率。而有氧运动作为一种常见的康复治疗手段,已经被众多的研究证明能够有效改善个体的执行控制功能^[8]。有氧运动能够通过促进脑区血管发生和血流量增加改善脑组织血液循环^[9],从而增强脑区活性、提高神经功能。因此,有氧运动也被认为是治疗药物成瘾的一种潜在模式:有氧运动能够通过恢复成瘾个体脑区功能,改善其执行控制能力以减缓药物成瘾者对成瘾物质的依赖,而其中前额皮层功能的恢复可能是关键。

目前对于有氧运动改善药物成瘾者执行控制的研究还比较少,先前研究内容普遍为成瘾者渴求度、情绪等方面的变化^[10],而成瘾药物也多为尼古丁^[11]、酒精^[12]等,对甲基苯丙胺(Methamphetamine, MA)这类滥用最为广泛的毒品研究还比较少。仅有的一些研究多采用电生理技术探究有氧运动对 MA 成瘾者抑制能力的影响^[13],但该技术无法直接探测到前额皮层如何受到运动影响从而改变了激活情况。因此,本研究采用了功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS),一种通过监测脑组织血氧信号的变化来反映局部脑区血氧动力学信号变化的非介入性脑成像技术^[14],其允许监测运动环境中的皮层血液动力学变化特点也为运动负荷对认知表现及脑激活模式影响方面的研究提供了现实条件。认知任务则选择了经典的色-词 Stroop 任务,该范式是考察执行控制能力的经典范式^[15],并且主要相关脑区为外侧前额皮层(lateral prefrontal cortex, LPFC)和前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)^[16]。尽管 fNIRS 的测量范围仅限于外侧皮层表面,无法监测到 ACC 的激活情况,但已有研究采用该技术成功探测到与 Stroop 任务相关的 LPFC 激活^[17],而且也有研究观察到色-词 Stroop 任务并不总是涉及 ACC 的激活^[18]。因此,本研究采用该任

务来探测前额皮层在有氧运动对 MA 成瘾者执行控制影响中的激活变化,并将 fNIRS 的探测区域全部布置在了外侧前额皮层。

此外,不同强度有氧运动对执行控制的改善效果也存在着差异:有理论认为运动强度与执行控制呈倒 U 型曲线关系,采用中等强度的有氧运动会最大限度地提高执行功能;而驱动理论则认为,在高强度下将得到最大收益^[19]。众多实证研究也有发现中等或高强度的有氧运动均能提高个体执行控制功能^[8],但是对于 MA 成瘾者的作用及两种运动强度间是否存在效果差异还不清晰。因此,本研究拟从行为和脑机制两方面的角度,验证有氧运动能够提高前额皮层活性,增强 MA 成瘾者的执行控制能力;并在此基础上,以期明确能够最大程度改善 MA 成瘾者执行控制能力的短时有氧运动方式。

1 研究方法

1.1 实验对象

从浙江十里坪强制隔离戒毒所筛选了 35 名处于教育矫治期的男性 MA 成瘾者参与本次实验。筛选标准为:(1)年龄在 20~40 岁之间;(2)当前处于监禁状态并经历了 3 个月以上的强制戒断康复;(3)根据 DSM-IV 依赖综合诊断标准为 MA 依赖者,排除其他物质(如大麻、海洛因和可卡因等)共用依赖;(4)没有身体残疾或医疗问题而被阻止或禁止参加中、高强度有氧运动;(5)无精神病史和脑部创伤及酒精依赖等影响大脑结构或功能的疾病,近期末服用精神类药物;(6)文化程度在小学及以上;(7)右利手;(8)非色盲。所有被试者均知晓实验任务并签署知情同意书,本实验通过上海体育学院伦理委员会批准。将被试者随机分为中等强度(18 人)和高强度(17 人)有氧运动干预组,采用独立样本 *t* 检验对两组被试者的基本信息进行对比,结果显示年龄、复吸次数、吸毒年限、体质量、身高、体质量指数(BMI)及受教育年限均无显著性差异($P>0.05$)。

1.2 实验任务

1) Stroop 任务。

实验刺激通过一台与被试者观察距离为 80 cm 的电脑屏幕呈现(分辨率为 1920 × 1080 像素,刷新率为 60 Hz),呈现背景为黑色。在每个试次中,屏幕中央首先会呈现一个白色“+”注视点 1 000 ms,之后随机出现一个大小为 7° × 4° 视角的实验刺激 1 000 ms,要求被试者根据实验刺激的颜色尽量快速而正确地按

键,记录被试者在 2 500 ms 内的反应。每个试次间隔 9 000 ms(实验流程见图 1)。实验开始前进行适当练习,以确保被试者能够理解实验任务。刺激材料包括“红”“黄”“绿” 3 个字,分别呈现红、黄、绿 3 种颜色,组成 3 个字色一致类型的刺激和 6 个字色不一致类型的刺激,其中字色一致的刺激重复呈现 4 次,字色不一致的刺激重复呈现 2 次,最终字色一致与字色不一致的刺激各 12 次,呈现比例为 1 : 1。

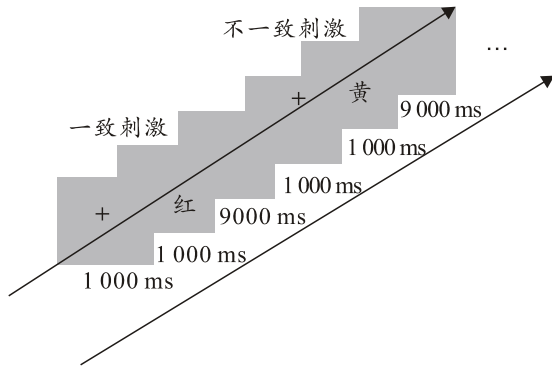


图 1 Stroop 任务刺激呈现流程

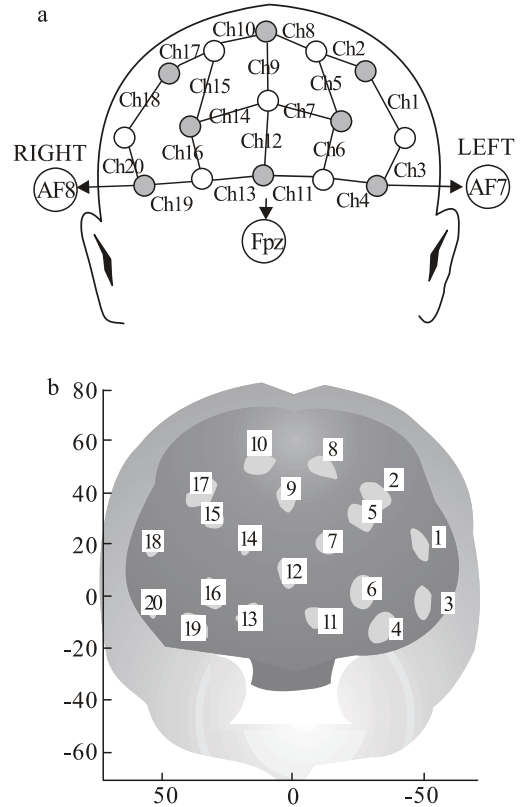
2)有氧运动干预方案。

中、高强度组完成 30 min 的功率自行车运动,其中核心运动 25 min;中等强度组运动中心率需维持在最大心率的 65%~75%,高强度组则维持在最大心率的 75%~85%,最大心率通过 $(206.9-0.67 \times \text{年龄})$ 来界定^[20]。有氧运动过程中,运动强度的调控主要通过调节功率自行车(型号 SHUA_SH_5000U)阻力大小,及被试者自我控制运动频率来完成。运动中通过 SUUNTO Smart Sensor 蓝牙耳机率带监控被试者心率变化。实验开始前,被试者先进行 5 min 的热身运动,当心率水平达到相应数值后再开始 30 min 的有氧运动。有氧运动结束后,被试者进行 5 min 左右的整理运动。

1.3 fNIRS 数据测量

本研究采用美国 NIRx 公司研制的 NIRScout 台式近红外脑功能成像系统,以检测被试者认知任务期间局部脑区的血氧动力学信号。使用 8 个发射器(波长为 780 nm 和 830 nm)和 7 个探测器,一个发射器和一个探测器间的连线形成一个通道,共形成 20 个通道分布在前额叶。传感器(包括发射器与探测器)根据 10~20 脑电图系统进行排列,将 D4、S4 和 S5 分别与 AFZ、FZ 和 FPZ 重合,并进行一些调整以确保每个发射器离其相应的探测器 3 cm(图 2a)。通过 Okamoto 等^[23]和 Tsuzuki 等^[22]研究最终确定了 fNIRS 通道位置与特定脑区之间的对应关系(图 2b),具体信息见表 1。通过佩戴压缩帽和调整传感器与被试者头皮接触程度使每个通道信号的增益系数(Gain)低于 7,以确保通道的信号

保持较高质量,采样频率为 7.81Hz。



a. fNIRS 通道分布 图中深色圆形代表探测器,白色圆形代表发射器,一个发射器和一个探测器之间的连线代表一个通道,数字表示通道序号。发射器和探测器位于国际 10~20 标准位置。b. fnirs 通道对应脑区分布 图中数字表示 1~20 个通道。

图 2 fNIRS 通道及对应脑区分布情况

表 1 各通道在前额叶皮层对应位置

前额叶皮层区域	通道
腹外侧前额叶皮层 Ventrolateral prefrontal cortex(VLPFC)	1、3、4、18、19、20
背外侧前额叶皮层 Dorsolateral prefrontal cortex(DLPFC)	2、5、7、8、9、10、14、15、17
额极区 Frontopolar prefrontal cortex(FPA)	6、12、16
眶额皮层 Orbitofrontal cortex(OFC)	11、13

1.4 实验流程

被试者首先完成 Stroop 任务的前测,时长约 5 min。为了减少练习效应的干扰,被试者在一周之后完成了 30 min 的有氧运动干预,休息 15 min 之后被试者完成后测。在每个阶段的测试中,被试者在静息状态下进行 Stroop 任务,并通过 fNIRS 监测 Stroop 任务过程中的大脑活动情况。

1.5 数据处理

1)行为学数据。

为了考察急性有氧运动对行为表现的影响,接下来对 Stroop 任务的干扰效应(简称 Stroop 效应)进行分析。Stroop 效应是指当被试者被要求去确定一个颜色

单词的颜色时,会受到字色不一致的干扰,对比一致情况时出现反应时更长的现象,通常通过计算不一致刺激与一致刺激的行为学数据差值来表示 Stroop 效应^[23]。反应时数据仅统计反应正确的试次,且为了尽量减少极端值的影响,反应时小于 150 ms 或大于 1 500 ms 的试次也被剔除。此外,平均值 ± 3 个标准差范围以外的数据也被删除,没有进入后续的统计分析。借助 SPSS 20.0 软件,首先分别对所有一致或不一致条件下的正确率与反应时(截尾平均数)使用配对样本 t 检验进行比较,以期发现 Stroop 效应;随后,再对 Stroop 效应的数值进行了运动强度(中等强度与高强度)和前后测的重复测量方差分析。若出现交互作用则采用 Bonferroni 方法进行简单效应分析,显著性水平设为 $P < 0.05$,行为数据的变异程度用标准误报告。

2) fNIRS 数据。

fNIRS 数据借助 NIRSout 系统,通过 Beer-Lambert 定律^[24]对采集的光学数据进行解算,这是一种分光光度法的基本定律,是描述物质对某一波长光吸收的强弱与吸光物质的浓度及其液层厚度间的关系,最终得到含氧血红蛋白浓度([HbO])、脱氧血红蛋白浓度([Hb])和总血红蛋白浓度的变化量 3 组数据。由于含氧血红蛋白信号对任务的刺激更加敏感,相对脱氧血红蛋白和总血红蛋白而言有较高的信噪比^[25],因此在当前研究中只利用了[HbO]数据。

对 20 个通道的原始信号预处理则是通过基于 Matlab(Mathworks, Natick, MA, United States)环境下的 Homer 工具箱(MGH-Martinos Center for Biomedical Imaging, Boston, MA, United States)进行的。为了消除头动等带来的影响,使用 Spline interpolation 方法对有运动伪迹的试次进行矫正^[26];接着,频率大于 0.7 Hz 和频率小于 0.04 Hz 的成分被滤除,以消除高频生理信号和低频基线漂移的影响。随后平均各任务条件下所有试次的[HbO]数值,得到了各任务条件下每个通道在单位时间内(刺激呈现前 1 s 至刺激呈现后 9 s)每个采样点的[HbO]均值。根据预处理的时间序列数据结果,对各任务水平均进行了以下处理:刺激呈现后 4~8 s 内所有采样点数据进行了平均并记为峰值,刺激呈现前 0~1 s 内所有采样点的数据进行了平均并记为基线,后用峰值减去基线,最终获得各任务条件下各通道的[HbO]数据。根据各通道在前额叶皮层对应位置(见表 1),共划分出 7 个感兴趣区(region of interesting, ROI):左侧 VLPFC(包括通道 1、3、4),右侧 VLPFC(包括通道 18、19、20),左侧 DLPFC(包括通道 2、5、7、8),右侧 DLPFC(包括通道 9、10、14、15、17)、FPA(包括通道 6、12、16)以及 OFC(包括通道 11、13)。然后将

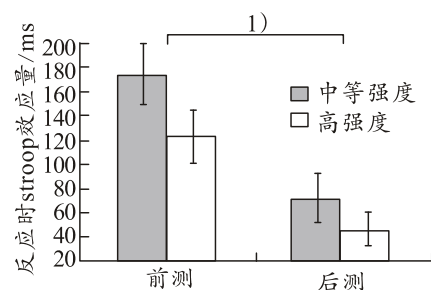
ROIs 所包含的一个或多个通道的[HbO]数据进行平均,该均值即为该 ROI 的血氧信号。同行为学数据,fNIRS 数据的 Stroop 效应用不一致条件与一致条件的[HbO]数据差值来表示。随后借助 SPSS 20.0 软件,对 Stroop 效应的[HbO]数据进行了运动强度和前后测的重复测量方差分析。若出现了交互作用则采用 Bonferroni 方法进行简单效应分析,显著性水平设为 $P < 0.05$,[HbO]数据的变异程度用标准误报告。

2 结果与分析

2.1 行为学结果

首先对实验任务是否有效诱发出 Stroop 效应进行验证。对所有被试者在前、后测时的一致与不一致条件下的反应时、正确率数据分别进行配对样本 t 检验,结果显示:不一致条件下的反应时显著长于一致条件(不一致条件: (936.93 ± 21.49) ms;一致条件: (832.27 ± 19.47) ms; $t = -8.83$, $df = 69$, $P = 0.00$);不一致条件下的正确率显著低于一致条件(不一致条件: (0.95 ± 0.012) ;一致条件: (0.98 ± 0.0052) ; $t = 2.50$, $df = 69$, $P = 0.015$)。结果表明该任务诱发了显著的 Stroop 效应,被试者对刺激颜色的判断反应受到了刺激字义的干扰,出现了反应时增长。

接着分别对 Stroop 效应的反应时及正确率进行运动强度和前后测的重复测量方差分析。反应时结果显示(如图 3):前后测主效应显著($F(1, 33) = 20.19$, $P = 0.00$),两组被试者后测时的 Stroop 效应量显著小于前测(前测 (149.67 ± 16.68) ms;后测 (59.66 ± 13.12) ms);运动强度主效应和交互效应均未达到显著性水平($P > 0.05$)。此外,正确率方面主效应和交互效应均不显著($P > 0.05$)。上述结果表明不同强度急性有氧运动均促进了 MA 成瘾者 Stroop 任务的行为表现,强度间无显著差异,且反应时比正确率能更有效地反映 Stroop 效应的变化。



1) 两组被试者后测时的 Stroop 效应量显著小于前测, $P < 0.05$ 。

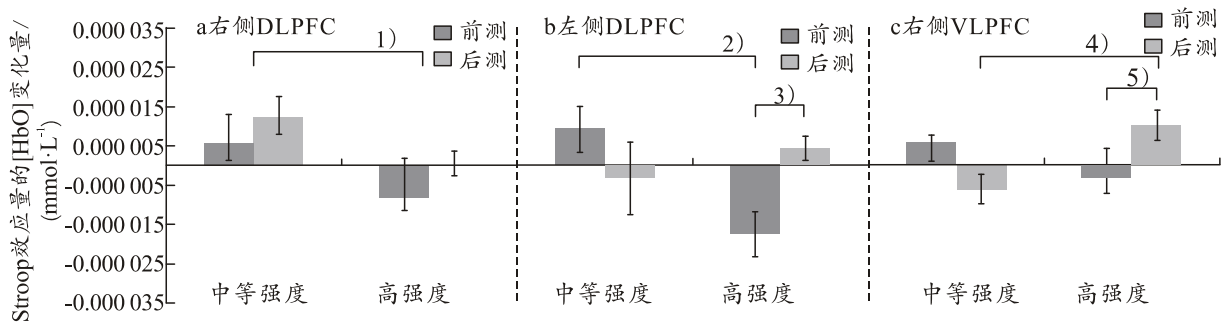
图3 不同强度有氧运动干预前后的 stroop 效应量

2.2 fNIRS 结果

分别对各 ROI 的 Stroop 效应的[HbO]数据进行运

动强度和前后测的重复测量方差分析。结果显示：在右侧 DLPFC，运动强度主效应显著($F(1, 33)=4.23$, $P=0.048$)，中等强度组的[HbO]显著高于高强度组(见图 4a)。此外，在右侧 VLPFC 及左侧 DLPFC 发现了运动强度与前后测的交互效应显著(右侧 VLPFC： $F(1, 33)=5.07$, $P=0.031$ ；左侧 DLPFC： $F(1, 33)=6.42$, $P=0.016$)。简单效应分析发现(见图 4b、4c)：相较于前测，后测时高强度组左侧 DLPFC 的[HbO]显著增加($F(1, 33)=4.90$, $P=0.034$)，右侧 VLPFC 的[HbO]则有

显著增加的趋势($F(1, 33)=3.02$, $P=0.092$)；而中等强度组前测时左侧 DLPFC 的[HbO]显著高于高强度组($F(1, 33)=5.98$, $P=0.020$)，但后测时两组并无显著性差异。此外，后测时中等强度组右侧 VLPFC 的[HbO]也有显著低于高强度组的趋势($F(1, 33)=2.99$, $P=0.093$)。上述结果表明在 Stroop 任务中，不同强度急性有氧运动带来了不同前额皮层的[HbO]变化。中等强度主要增强右侧 DLPFC 的活性，而高强度则主要增强左侧 DLPFC 和右侧 VLPFC 的活性。



1)中等强度组右侧 DLPFC 的[HbO]显著高于高强度组, $P<0.05$; 2)中等强度组前测时左侧 DLPFC 的[HbO]显著高于高强度组, $P<0.05$; 3)高强度组后测时左侧 DLPFC 的[HbO]显著高于前测, $P<0.05$; 4)5)高强度组后测时右侧 VLPFC 的[HbO]有显著高于前测及中等强度组后测的趋势, $0.05<P<0.1$ 。

图 4 不同任务条件下各 ROI Stroop 效应量的[HbO]变化量

3 讨论

本研究旨在通过行为实验和神经影像学方法来验证有氧运动能够提高前额皮层活性，增强 MA 成瘾者的执行控制能力。实验借助 Stroop 效应的行为数据和血氧信号来反映成瘾者执行控制功能及前额皮层活性的前后变化，并对中等和高强度组进行了对比，以期明确能够最大程度改善 MA 成瘾者执行控制能力的短时有氧运动方式。

行为学结果显示：被试者对一致条件的反应时显著短于不一致条件，正确率也更高，并且这种差异出现在组别和前后测的各个水平。因此，可以通过反应时在各变量水平上的差异来评价不同强度有氧运动对 MA 成瘾者执行控制功能的影响。其中，反应时的 Stroop 效应量越小，说明不一致条件的干扰越小，相应的执行控制功能也更好。对反应时的 Stroop 效应量进行运动强度和前后测的重复测量方差分析后发现，中等和高强度组后测的 Stroop 效应量均显著低于前测，说明 30 min 的中等和高强度有氧运动均可以提高 MA 成瘾者的执行控制，并且两种不同强度有氧运动的影响效果并无显著差异。此外，正确率在各变量水平上变化不显著，这一结果可能是因为正确率的变化不如反应时那么敏感。

其次，fNIRS 结果发现了急性有氧运动对被试者在 Stroop 任务过程中的 HbO 信号产生了显著影响。首先研究发现了强度间的显著差异，中等强度相较于高强度更多地增加了右侧 DLPFC 区域的[HbO]。另外，研究还发现了前后测与组别间的交互效应：相较于中等强度，高强度更多地增加了后测时左侧 DLPFC 和右侧 VLPFC 的[HbO]；而中等强度组则在左侧 DLPFC 和右侧 VLPFC 区域出现了较之前测，后测时该区域的[HbO]下降现象。上述结果表明，不同强度急性有氧运动对被试者完成 Stroop 任务时的前额皮层活性有着不同程度的增强，而前额皮层活性增强与 Stroop 任务过程中行为表现提高同步出现，也为急性有氧运动有效提高成瘾者执行控制功能提供了神经层面的证据。

此外，研究也发现了不同强度有氧运动对被试者完成 Stroop 任务时的脑区活动模式有着显著差别：中等强度的激活偏向于背外侧前额皮层的右背侧，而高强度则集中于外侧前额皮层的左背侧及右腹侧。根据前人研究，右侧 DLPFC 与维持注意、调整行为以解决冲突干扰有关^[27]。中等强度组被试者右侧 DLPFC 活性较强表明被试在任务过程中意在减少注意力冲突，分开任务相关信息与无关信息，将注意焦点置于刺激的颜色而非单词^[28]，从而降低抑制优势反应(判断字义)

的需求;右侧 VLPFC 激活较低的现象也证明了该点。有研究认为腹侧额叶加工的抑制表明被试者减少了对视觉言语信息的加工,与任务无关的语义编码被抑制了^[29];而左侧 DLPFC 出现活性降低,推测可能有两个原因:一是右侧 DLPFC 区域的[HbO]上升后的代偿反应;另一个可以用 Dietrich 的“额叶瞬间激活降低假说”解释——有氧运动过程中或者之后一段时间内的大脑某特定区域会存在瞬时抑制现象^[30]。

而高强度组被试者与中等组表现相反,干预前后出现了左侧 DLPFC 及右侧 VLPFC 活性显著上升的现象。左侧 DLPFC 的激活上升表明被试者提高了对 Stroop 任务中即将可能出现的不一致冲突干扰的预知,从而开始注意力的集中^[31]。此外,已有大量研究发现右侧 VLPFC 是动作控制的关键脑区^[32],并且与维持刺激的特征信息(如颜色等)有关^[33];并且能够将注意力重新转移到当前注意焦点之外的事物上^[34]。该区域活性增强则代表被试者的抑制功能及对亚目标控制的增强^[29],表明被试者在 Stroop 任务中能够控制对刺激语义进行自动化反应,抑制对其进行加工判断,而将注意资源重新转移到刺激的颜色上来。

综合行为与 fNIRS 结果发现,两种强度干预方式均对 MA 成瘾者产生了显著影响。在行为表现上,均有效提升了 MA 成瘾者的执行控制能力。但两者在神经层面上有着差异:中等强度倾向于增强右背外侧前额皮层的活动,而高强度则带来了更强的脑区活动,主要集中于左背外侧及右腹外侧前额皮层。研究推测:接受中等强度干预的被试者可能在 Stroop 任务中偏向于策略控制加工^[15],选择将更多的注意力集中于任务相关的刺激颜色上,忽略对刺激语义的加工以减少字色不一致情况的干扰;而接受高强度干预的被试者在任务中则偏向于反应抑制加工^[35],更多地是去提前预知冲突并集中注意力,主动抑制对刺激语义的加工,最终将注意力转移到任务相关的刺激颜色上。

本研究验证了 30 min 的中等、高强度有氧运动能够提高前额皮层活性,增强 MA 成瘾者的执行控制能力。并且神经层面上,高强度带来了更多前额皮层的活性增强:高强度更多地增强了左侧 DLPFC 及右侧 VLPFC 的神经激活水平,而中等强度的效应则集中于右侧 DLPFC。推测高强度的急性有氧运动可能会引起更多的前额脑区活动,更有利于成瘾个体恢复执行控制能力,降低戒断后的复吸率。

参考文献:

[1] VOLKOW N D, WANG G J, FOWLER J S, et al. Addiction circuitry in the human brain[J]. Annual Re-

view of Pharmacology and Toxicology, 2012, 52: 321-336.

[2] HUGH G, STOUT J. Neurocognitive insights into substance abuse[J]. Trends in Cognitive Sciences, 2005, 9(4): 195-201.

[3] DAWE S, GULLO M J, LOXTON N. Reward drive and rash impulsiveness as dimensions of impulsivity: Implications for substance misuse[J]. Addictive Behaviors, 2004, 29(7): 1389-1405.

[4] RITA Z G, NORA D V. Dysfunction of the prefrontal cortex in addiction: Neuroimaging findings and clinical implications[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2011, 12(11): 652.

[5] FUNAHASHI S. Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex[J]. Neuroscience Research, 2001, 39(2): 147-165.

[6] CHAMBERS C D, HUGH G, BELLGROVE M A. Insights into the neural basis of response inhibition from cognitive and clinical neuroscience[J]. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 2009, 33(5): 631-646.

[7] SOFUOGLU M, DEVITO E E, WATERS A J, et al. Cognitive enhancement as a treatment for drug addictions[J]. Neuropharmacology, 2013, 64(1): 452-463.

[8] HIROKI Y, IPPEITA DDAISUKE T, et al. Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test[J]. Neuroimage, 2010, 50(4): 1702-1710.

[9] BROWN A D, MCMORRIS C A, R STEWART L, et al. Effects of cardiorespiratory fitness and cerebral blood flow on cognitive outcomes in older women[J]. Neurobiology of Aging, 2010, 31(12): 2047-2057.

[10] WANG D, WANG Y, WANG Y, et al. Impact of physical exercise on substance use disorders: A meta-analysis[J]. Plos One, 2014, 9(10): e110728.

[11] HAASOVA M, WARREN F C, USSHER M, et al. The acute effects of physical activity on cigarette cravings: Systematic review and meta-analysis with individual participant data[J]. Addiction, 2013, 108(1): 26-37.

[12] BROWN R A, ABRANTES A M, HARUKA M, et al. A preliminary, randomized trial of aerobic exercise for alcohol dependence[J]. Journal of Substance Abuse Treatment, 2014, 47(1): 1-9.

[13] 王艳秋,施大庆,赵敏,等. 有氧运动对改善甲基苯丙胺类成瘾者抑制能力的研究——来自 ERP 的

- 证据[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(3): 297-302.
- [14] CHEN L C, SANDMANN P, THORNE J D, et al. Association of concurrent fNIRS and EEG signatures in response to auditory and visual stimuli[J]. *Brain Topography*, 2015, 28(5): 710-725.
- [15] MACDONALD A W, COHEN J D, STENGER V A, et al. Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control[J]. *Science*, 2000, 288(5472): 1835-1838.
- [16] LEUNG H C, SKUDLARSKI P, GATENBY J C, et al. An event-related functional MRI study of the stroop color word interference task[J]. *Cerebral Cortex*, 2000, 10(6): 552-560.
- [17] SCHROETER M L, ZYSSET S, KUPKA T, et al. Near-infrared spectroscopy can detect brain activity during a color-word matching Stroop task in an event-related design[J]. *Human Brain Mapping*, 2002, 17(1): 61-71.
- [18] ZYSSET S, MILLER K, LOHMANN G, et al. Color-word matching stroop task: Separating interference and response conflict[J]. *Neuroimage*, 2001, 13(1): 29-36.
- [19] CHANG Y K, LABBAN J D, GAPIN J I, et al. The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis[J]. *Brain Research*, 2012, 1453(1): 87-101.
- [20] FERGUSON B. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription 9th Ed. 2014[J]. *Journal of the Canadian Chiropractic Association*, 2014, 58(3): 328.
- [21] OKAMOTO M, DAN H, SAKAMOTO K, et al. Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping[J]. *Neuroimage*, 2004, 21(1): 99-111.
- [22] TSUZUKI D, JURCAK V, SINGH A K, et al. Virtual spatial registration of stand-alone fNIRS data to MNI space[J]. *Neuroimage*, 2007, 34(4): 1506-1518.
- [23] 钱秀莹, 李传. Stroop 效应及其脑机制研究概述[J]. *心理学探新*, 2003, 23(3): 33-36.
- [24] COPE M, DELPY D T, REYNOLDS E O R, et al. Methods of quantitating cerebral near infrared spectroscopy data[J]. *Oxygen Transport to Tissue XXXIII*, 1987, 222: 183.
- [25] SCHAEFFER J D, YENNU A S, GANDY K C, et al. An fNIRS investigation of associative recognition in the prefrontal cortex with a rapid event-related design[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2014, 235(10): 308-315.
- [26] SCHOLKMANN F, SPICHTIG S, MUEHLEMANN T, et al. How to detect and reduce movement artifacts in near-infrared imaging using moving standard deviation and spline interpolation[J]. *Physiological Measurement*, 2010, 31(5): 649.
- [27] MANSOURI F A, BUCKLEY M J, TANAKA K. Mnemonic function of the dorsolateral prefrontal cortex in conflict-induced behavioral adjustment[J]. *Science*, 2007, 318(5852): 987-990.
- [28] BANICH M T, MILHAM M P, ATCHLEY R, et al. fMRI studies of stroop tasks reveal unique roles of anterior and posterior brain systems in attentional selection[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2000, 12(6): 988-1000.
- [29] HARRISON B J, SHAW M, YCEL M, et al. Functional connectivity during stroop task performance[J]. *Neuroimage*, 2005, 24(1): 181-191.
- [30] DIETRICH A, SPARLING P B. Endurance exercise selectively impairs prefrontal-dependent cognition[J]. *Brain Cogn*, 2004, 55(3): 516-524.
- [31] VANDERHASSELT M A, RAEDT R D, BAEKEN C. Dorsolateral prefrontal cortex and Stroop performance: Tackling the lateralization[J]. *Psychon Bull Rev*, 2009, 16(3): 609-612.
- [32] ARON A R, ROBBINS T W, POLDRACK R A. Inhibition and the right inferior frontal cortex[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2014, 18(4): 177-185.
- [33] LEE T G, BLUMENFELD R S, MARK D E. Disruption of dorsolateral but not ventrolateral prefrontal cortex improves unconscious perceptual memories[J]. *Journal of Neuroscience the Official Journal of the Society for Neuroscience*, 2013, 33(32): 13233-13237.
- [34] LEVY B J, WAGNER A D. Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2011, 1224(1): 40-62.
- [35] KEMMOTSU N, VILLALOBOS M E, GAFFREY M S, et al. Activity and functional connectivity of inferior frontal cortex associated with response conflict[J]. *Cognitive Brain Research*, 2005, 24(2): 335-342.