

急性中等强度持续运动和高强度间歇运动对注意缺陷症状男大学生抑制控制的影响

史磊¹, 还沐阳¹, 何畅爽¹, 彭晓莹², 全明辉¹

(1.上海体育大学 运动健康学院, 上海 200438; 南通第二人民医院 康复医学科, 江苏 南通 226002)

摘 要: 对比急性中等强度持续运动(MICT)和高强度间歇运动(HIIT)对注意缺陷症状男大学生抑制控制的影响, 采用功能性近红外光谱技术(fNIRS)探究其脑机制。采用随机交叉设计, 受试者按随机顺序接受3种干预措施(MICT、HIIT和静坐休息), 并在干预前、干预后20和50 min进行色词 Stroop 任务和 fNIRS 测量, 共20名受试者完成所有试验。结果表明, MICT和HIIT均改善 Stroop 任务的正确率, 但HIIT仅在干预后50 min的不一致条件下有显著改善($t=3.41, P=0.002$)。此外, MICT显著改善 Stroop 一致任务的反应时($t=-4.12, P=0.001$)并持续至运动后50 min($t=-3.45, P=0.001$)。运动后20 min, MICT显著提高一致条件任务下右侧腹外侧前额叶皮质(R-VLPFC)的激活状态($t=2.92, P=0.005$), 且反应时和R-VLPFC激活改善正相关($r=-0.37, P=0.02$)。研究认为, 相较于HIIT, MICT对抑制控制任务的更多维度产生显著改善, R-VLPFC激活增加可能是MICT改善抑制控制的潜在机制。

关 键 词: 中等强度持续运动; 高强度间歇运动; 注意缺陷症状; 功能性近红外光谱技术; 抑制控制

中图分类号: G804.86 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2025)02-0147-08

The effects of acute moderate-intensity continuous training and high-intensity interval training on inhibitory control in male university students with attention deficit symptoms

SHI Lei¹, HUAN Muyang¹, HE Changshuang¹, PENG Xiaoying², QUAN Minghui¹

(1.School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2.Department of Rehabilitation Medicine, The Second People's Hospital of Nantong, Nantong 226002, China)

Abstract: To compare the effects of acute moderate-intensity continuous training (MICT) and high-intensity interval training (HIIT) on inhibitory control in male university students with attention deficit symptoms, and to explore their underlying neural mechanisms using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS), this study employed a randomized crossover design and then participants underwent three interventions (MICT, HIIT, and sedentary rest) in random order. Color-word stroop task and fNIRS measurements were also conducted before the intervention and 20 and 50 minutes post-intervention. A total of 20 subjects completed all trials. Both MICT and HIIT improved accuracy in the Stroop task, but however, a significant improvement in the incongruent condition was observed only 50 minutes after HIIT intervention ($t=3.41, P=0.002$). The study also found that MICT significantly improved reaction time in the congruent Stroop task ($t=-4.12, P=0.001$), and this effect persisted for 50 minutes post-exercise ($t=-3.45, P=0.001$). Twenty minutes post-exercise, MICT significantly increased activation in the right ventrolateral prefrontal cortex (R-VLPFC) during congruent condition tasks ($t = 2.92, P = 0.005$).

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(22BTY099)。

作者简介: 史磊(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 运动与健康促进。E-mail: susshilei@163.com 通信作者: 全明辉

Furthermore, the improvements in reaction time were positively correlated with the increases in R-VLPFC activation ($r = -0.37$, $P = 0.02$). The conclusion reveals that compared to HIIT, MICT resulted in significant improvements across more dimensions of inhibitory control tasks, and then the increase in R-VLPFC activation may be a potential mechanism through which MICT enhances inhibitory control.

Keywords: moderate-intensity continuous training; high-intensity interval training; attention deficit symptoms; functional near-infrared spectroscopy; inhibitory control

注意缺陷多动障碍(ADHD)是一种始发于儿童时期的慢性神经发育障碍,其核心症状为注意力不集中和多动/冲动^[1]。60%的 ADHD 儿童症状(主要为注意力缺陷)可持续到成年^[2-3],成人的患病率约为 2.58%^[4],但就诊率较低^[5]。因此,有注意缺陷症状的成年人是患 ADHD 的高风险人群。抑制控制是指通过调节人们的注意、行为、思想和情绪等来克服内外部干扰,从而有效地完成预期目标的能力^[6]。抑制控制的损害被认为是 ADHD 人群的核心损害^[7],且与暴饮暴食^[8]、网络成瘾^[9]等对生活有负面影响的行为相关。因此,改善抑制控制是 ADHD 干预的重要内容。

研究表明,中等强度持续运动(MICT)^[10]和高强度间歇运动(HIIT)^[11]都能改善 ADHD 成年人抑制控制。从机制上讲,前额叶皮质(PFC)是调节抑制控制的关键脑区^[12],急性运动可能通过增加 PFC 的激活进而增强抑制控制^[13]。Yanagisawa 等^[13]和 Byun 等^[14]的研究分别发现,10 min 急性中等强度运动或低强度运动都可以改善年轻人左侧背外侧前额叶皮质(L-DLPFC)的激活状态,同时改善抑制控制任务表现。Shao 等^[15]也指出,HIIT 干预改善年轻人在抑制控制任务中左右两侧背外侧前额叶皮质和右侧腹外侧前额叶皮质(R-VLPFC)的激活状态。然而,MICT 和 HIIT 对抑制控制的影响是否存在差异,且这种差异是否与 PFC 的激活程度有关,目前仍有待研究。前人研究在健康成年人^[16-18]、健康儿童^[19]和肥胖青少年人群^[20]中对比 MICT 和 HIIT 对抑制控制的影响,但未考虑干预间的能量消耗匹配问题,所以无法确认干预效果的差异来源于干预方式不同还是能量消耗差异。因此,基于能量消耗匹配的运动干预方式间的比较,能为精准运动处方的制定提供证据支持。

基于现有研究的不足且 ADHD 以男性为主^[21]、成年人就诊率低等特点,本研究以有注意缺陷症状的男大学生(高风险 ADHD 成人)为研究对象,以期探讨:(1)能量消耗匹配的 MICT 和 HIIT 对注意缺陷症状男大学生抑制控制的影响是否存在差异;(2)MICT 和 HIIT 对注意缺陷症状男大学生抑制控制的影响是否与 PFC 的激活程度有关。参照前期研究成果^[17-18],本研究假设:MICT 和 HIIT 均可以改善注意缺陷症状男大学生

抑制控制任务表现,但两种干预方式对抑制控制的改善存在差异且这种差异可能与 PFC 的激活程度有关。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

根据 G-Power 软件进行样本量计算,参考前人研究^[22],设置效应量 $f=0.25$, α 为 0.05,统计效力为 0.8,得出需 12 位受试者。考虑到样本丢失,本研究计划招募 20 名受试者。受试者招募通过网络方式进行,并通过成人注意缺陷多动障碍自我报告量表(ASRS)进行受试者筛选。ASRS 量表中文版已经过信效度验证,被广泛应用于成人 ADHD 的筛查。ASRS 量表包括注意力不集中和多动(冲动)2 个分量表,每个分量表 9 个题目,共 18 个题目。每个题目赋值 0~4 分,分数越高代表症状越严重。每个分量表得分界点为 17, ≥ 17 分代表相应症状明显。

本研究的纳入标准为:(1)有注意缺陷症状的男大学生(ASRS 注意力不集中分量表得分 ≥ 17 分);(2)半年内无长期锻炼习惯(近 3 个月内,每周中高强度运动次数 ≤ 3 次,每次 < 30 min);(3)右利手,视力正常或矫正视力正常;(4)自愿参与并签署知情同意书。排除标准为:(1)不适合参加中等及以上强度运动(如近 3 个月内下肢损伤;患有心血管疾病和代谢疾病);(2)患有其他精神类疾病(如抑郁症、焦虑症等);(3)有吸烟饮酒习惯(近半年内,每日吸烟一根及以上;每周 3 次及以上饮酒,每次 > 750 mL 啤酒或者 50 mL 白酒);(4)服用精神类药物;(5)患有色盲或色弱。

所有实验干预均在上海体育大学进行,研究遵循《赫尔辛基宣言》在中国临床试验中心进行注册(注册号:ChiCTR2300067833),并得到上海体育大学伦理委员会的批准(伦理委员会登记编号:102772022RT010)。

1.2 实验流程

本研究要求受试者分 4 次到访实验室。第一次到访时,测量受试者的身高、体重、体脂率、最大心率(HR_{max})和最大摄氧量(VO_{2max})等基础信息。在后 3 次到访时,受试者按照随机顺序接受 3 种不同的干预,在每种干预前进行抑制控制任务和血流动力学数据测试。为消除运动后头皮血流增加对近红外数据采集的

影响,受试者通常需要安静休息 15 min 以上^[23]。因此,在干预结束后 20 min、50 min 钟进行测试,以观测不同干预方式对抑制控制和血流动力学的影响及其持续效应。为避免残余效应,4 次试验测试之间至少需要 7 天的洗脱期。

1.3 最大摄氧量测试

采用逐级递增负荷法测量 VO_{2max} 。在测试过程中,通过便携式心肺功能仪(COSMED K5, Italy)和心率臂带 Polar OH1,采集受试者运动过程中的气体代谢参数和连续心率。受试者先以 30W 负荷进行 3 min 热身,随后以 70W 负荷开始测试,每隔 1 min 增加 10 W 负荷,转速设置为 60 r/min。在测试过程中,每个 1 min 结束时,询问并记录受试者 Borg 主观疲劳程度量表(RPE),该量表评分范围从 6(非常容易)到 20(非常困难)。最大摄氧量测试的终止标准是受试者至少满足以下 3 种情况之一:(1)摄氧量出现平台期而不再增加;(2)达到根据年龄预测的最大心率($220 - \text{年龄}$);(3)无法保持设置的节奏,个体达到意志力衰竭(即无法继续蹬车, $RPE \geq 17$)。选取测试过程最后阶段最高的 10 s 平均摄氧量和心率的极大值作为 VO_{2max} 和 HR_{max} 。

1.4 运动干预措施

干预措施共分为 3 组,分别为对照组、HIIT 组和 MICT 组(具体方案见图 1)。

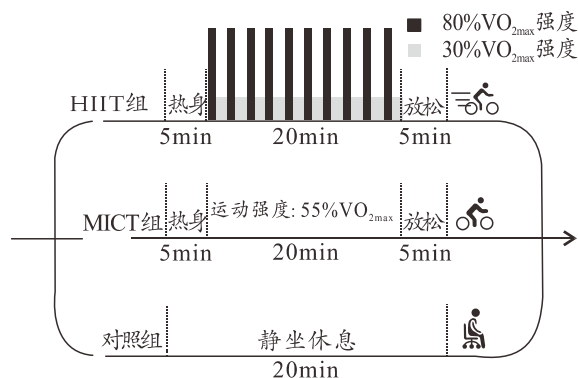


图1 干预方案详情示意

运动干预组使用功率自行车(Monark 839E, Sweden)进行干预。在运动干预前后分别进行 5 min 负荷 30 W 的热身和 5 min 负荷 0 W 的放松整理活动,对照组不接受热身和放松整理活动。在 HIIT 组中,受试者首先以 80% VO_{2max} 对应的功率值进行 1 min 运动,紧接着以 30% VO_{2max} 对应的功率值进行 1 min 运动,两种强度依次交替进行 10 次、共 20 min。在 MICT 组干预中,受试者以 55% VO_{2max} 对应的功率值进行 20 min 运动。对照组中,受试者不接受任何运动干预,仅进行 30 min 静坐休息。强度设定依据 HIIT 和 MICT 的强度要

求,同时参考前人的能量消耗公式^[24],以确保两种干预方式的能量消耗相似。能量消耗公式如下:

$$\text{能量消耗} = VO_2(\text{mL/Kg/min}) \times \text{bodymass}(\text{kg}) / 1000 \text{ mL} \\ \times \text{time}(\text{min}) \times 5(\text{kcal/min}) \quad (1)$$

1.5 运动干预过程监控

为监控运动过程中强度是否达到预设要求,在最大摄氧量测试时分别记录个体 80% VO_{2max} ($\approx 88\% HR_{max}$) 和 55% VO_{2max} ($\approx 71\% HR_{max}$) 强度下达到的心率,并在运动干预中使用 Polar OH1 进行心率监控。因此,运动中要求 HIIT 组最大心率达到且维持在 88% HR_{max} , MICT 组心率在运动开始后 2 min 内达到且维持在 71% HR_{max} 。

1.6 测试指标

(1)色词 Stroop 任务。使用 Stroop 任务评估受试者的抑制控制,Stroop 任务包含一致条件和不一致条件 2 个部分。采用组块设计,总计 6 个组块,其中一致条件和不一致条件交替出现,每个组块包括 15 个试次,每个组块开始前有 30 s 休息时间。每个试次呈现上下两排单词:一致条件时上排显示的单词为“红色”“绿色”“蓝色”或“黄色”字样,其颜色与词义一致(例如,以红色呈现的“红色”字样);不一致条件时上排呈现的颜色和词义不一致(例如,以绿色呈现的“红色”字样),而下排所有单词均以颜色为黑色呈现。受试者需判断上排颜色和下排词义是否一致,一致则按 A 键,不一致则按 L 键。每个试次在屏幕上显示 1 700 ms,试次之间以 300 ms 的“十”字图案作为分隔。在正式任务开始前先进行练习,正确率达到 80% 以上进入正式测试。正式测试中受试者需要尽可能快速、准确地做出反应。使用 E-Prime 3.0.9 软件呈现所有刺激,并以反应时间和正确率作为抑制控制的评估指标。

(2)血流动力学数据。多通道连续波的功能性近红外光谱设备(NIRSports, NIRx Medical Technologies LLC, Minneapolis, MN, USA)被用于监测在 Stroop 任务进行时 PFC 各脑区的血流动力学活动情况。fNIRS 的探头由 8 个双波长的光源(785 nm 和 830 nm)和 7 个光源探测器组成,采样率为 10.2 Hz。探头的位置根据 10/20 脑电系统排布并进行一定的调整,确保每个光源及其相应的光源探测器间隔为 3 cm,光源与其对应的探测器组成通道,共形成 20 个通道。根据前人文献^[25]将 fNIRS 的通道映射到相关脑区,右侧腹外侧前额叶(R-VLPFC): 16、19、20;左侧腹外侧前额叶(L-VLPFC): 3、4、6;右侧背外侧前额叶(R-DLPFC): 15、17、18;左侧背外侧前额叶(L-DLPFC): 1、2、5;内侧前额叶(M-PFC): 7、8、9、10、11、12、13、14,这些通道覆盖了 PFC 对应的投影区域。使用 Homer 2 开源软件和 MATLAB 对 fNIRS 数据进行处理。通过运动伪影矫

正算法,检测超过均值 10 个标准差的采样点,并使用小波变换进行矫正去除伪影。使用频率为 0.2 Hz 和 0.01 Hz 的高通滤波和低通滤波去除基线漂移和生理噪声。根据 Beer-Lambert 定律,将采集到的 fNIRS 光学信号转换为以 mol/L 为单位的氧合血红蛋白(HbO)信号,分别计算各个脑区任务中的 HbO 平均变化浓度。

1.7 统计方法

对受试者的基本信息和干预过程中的心率数据进行描述统计并且结果以均数 \pm 标准差表示。Stroop 任务数据先排除结果中的异常值(反应时 < 200 ms,以及超出平均值 ± 3 倍标准差的数据)。Stroop 任务和 fNIRS 的组内数据分析,3 种干预方式分别在 3 个时间段:干预前、干预后 20 min、干预后 50 min 进行比较。首先对反应时、正确率的得分以及 HbO 值进行正态性检验和方差齐性检验,若满足正态和方差齐则进行单因素方差分析,若数据方差不齐则采用韦尔奇检验,并对事后检验的 P 值进行 Bonferroni 校正。

Stroop 任务和 fNIRS 的组间分析采用混合线性模型,以两次干预后(干预后 20 和 50 min)与干预前的净差异值为因变量,年龄、最大摄氧量、干预方法、体脂率、基线数据为固定效应,受试者编号为随机效应,以评估 3 种干预方法对 Stroop 任务及脑血流动力学产生的

差异。研究中进行 3 次比较(MICT vs. CoN, HIIT vs. CoN, HIIT vs. MICT),为有效降低 I 类错误,将显著水平调整为 $0.05/3 \approx 0.017$, $0.017 \leq P < 0.05$ 定义为具有边际显著效应。

采用 Pearson 相关检验,检验 Stroop 任务正确率和反应时的变化值与各脑区在任务过程中 HbO 变化值的相关性。使用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析和 Pearson 相关检验,显著水平定义为 $P < 0.05$,边际显著水平定义为 $0.05 \leq P < 0.1$ 。使用 JMP 软件构建线性混合效应模型,显著水平定义为 $P < 0.017$,边际显著水平定义为 $0.017 \leq P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 受试者基本特征

本研究共招募到 20 名受试者且完成全部实验,在进行 HIIT 和 MICT 时均无不良反应。表 1 呈现受试者的基本信息,包括年龄、身高、体重和体脂,通过测试收集受试者的 ASRS 得分、 VO_{2max} 和 HR_{max} 。运动干预过程中 HIIT 和 MICT 的平均心率分别为 147.9 次/min 和 145.69 次/min,两者无统计学差异($t=0.68$, $P=0.50$)。根据能量消耗预测公式^[26],提示两种运动干预方案的能量消耗基本一致。

表 1 受试者信息

基本情况	$M \pm SD$	范围
年龄/岁	20.90 \pm 2.71	18~27
身高/cm	176.31 \pm 4.37	168~182.50
体重/kg	73.99 \pm 14.52	52.5~110
体脂率/%	19.41 \pm 8.25	7.50~35.70
成人注意缺陷多动障碍自我报告量表得分	20.05 \pm 3.38	17~28
最大摄氧量/(mL \cdot kg ⁻¹ \cdot min ⁻¹)	39.52 \pm 7.75	30.23~63.90
最大心率/(次 \cdot min ⁻¹)	191.89 \pm 8.25	172~203
高强度间歇运动平均心率/(次 \cdot min ⁻¹)	147.90 \pm 9.71	132~168
高强度间歇运动最大心率/(次 \cdot min ⁻¹)	170.41 \pm 10.38	154~187
高强度间歇运动最大心率占最大心率的百分比/%	88.81 \pm 4.57	83.02~99.25
中等强度持续运动平均心率/(次 \cdot min ⁻¹)	145.69 \pm 12.04	130~165
中等强度持续运动平均心率占最大心率的百分比/%	75.92 \pm 4.87	68.35~82.50

2.2 MICT 和 HIIT 对抑制控制的影响

3 种干预方法的组内方差分析结果显示,MICT 组内不一致条件正确率($f=4.548$, $P=0.015$)和一致条件反应时($f=4.349$, $P=0.017$)存在显著差异。Bonferroni 多重均数比较结果显示,运动干预后 20 min 和 50 min 的正确率与干预前相比显著提高,运动干预后 50 min 的反应时比干预前显著缩短(见表 2)。

受试者在 MICT 和 HIIT 干预后的 Stroop 任务多个维度中显著改善(见表 3)。与对照组相比,在运动后 20 min,MICT 显著改善一致条件和不一致条件的正确

率($t=2.54$, $P=0.015$; $t=3.97$, $P=0.001$)以及一致条件的反应时($t=-4.12$, $P=0.001$);HIIT 对不一致条件正确率($t=2.19$, $P=0.035$)和一致条件的反应时($t=-2.23$, $P=0.032$)呈现出改善趋势。此外,结果还提示改善效果能持续至运动后 50 min,MICT 显著改善不一致条件正确率($t=3.50$, $P=0.001$)和一致条件反应时($t=-3.45$, $P=0.001$),一致条件正确率($t=2.36$, $P=0.024$)和不一致条件反应时($t=-2.41$, $P=0.022$)呈现出改善趋势;HIIT 显著改善不一致条件正确率($t=3.41$, $P=0.002$)以及一致条件正确率($t=2.16$, $P=0.038$)呈现出改善趋势。关于两

种干预方式的比较, 结果提示在运动后 50 min, MICT ($t=2.12, P=0.041$)。对一致条件反应时的改善呈现出优于 HIIT 的趋势

表 2 Stroop 任务正确率与反应时组内对比结果($\bar{x} \pm s$)

条件	时间	高强度间歇运动(HIIT)		中等强度持续运动(MICT)		对照组(CON)	
		正确率/%	反应时/ms	正确率/%	反应时/ms	正确率/%	反应时/ms
一致条件	干预前	97.54±2.28	665.63±160.40	96.96±4.14	694.38±165.40	97.93±2.50	646.00±142.90
	干预后 20 min	98.22±2.12	614.37±142.10	98.83±1.72	594.47±136.30	97.16±2.80	647.50±167.60
	干预后 50 min	97.89±2.84	612.90±145.50	98.25±2.73	581.20±97.70	96.14±5.38	632.35±154.80
	<i>f</i> 值	0.385	0.806	1.898	4.349 ¹⁾	1.064	0.121
不一致条件	干预前	92.72±4.90	733.20±164.12	93.31±4.84	705.08±161.02	94.82±3.18	706.30±176.89
	干预后 20 min	93.91±3.53	674.00±134.79	96.52±3.08	651.90±148.32	91.95±6.09	689.25±189.60
	干预后 50 min	95.56±2.86	672.90±159.71	96.52±2.82	636.40±131.33	91.84±5.30	696.46±169.44
	<i>f</i> 值	2.577	1.009	4.548 ¹⁾	1.192	2.252	0.046

1) $P<0.05$

表 3 Stroop 任务正确率与反应时组间对比结果

条件	时间	高强度间歇运动 VS 对照组 <i>t</i> 值		中等强度持续运动 VS 对照组 <i>t</i> 值		高强度间歇运动 VS 中等强度持续运动 <i>t</i> 值	
		正确率	反应时	正确率	反应时	正确率	反应时
一致条件	干预后 20 min-干预前	1.95	-2.23 ²⁾	2.54 ¹⁾	-4.12 ¹⁾	-0.61	1.93
	干预后 50 min-干预前	2.16 ²⁾	-1.36	2.36 ²⁾	-3.45 ¹⁾	-0.22	2.12 ²⁾
不一致条件	干预后 20 min-干预前	2.19 ²⁾	-1.54	3.97 ¹⁾	-1.51	-1.81	-0.03
	干预后 50 min-干预前	3.41 ¹⁾	-1.77	3.50 ¹⁾	-2.41 ²⁾	-0.11	0.63

1) $P<0.017$; 2) $0.017 \leq P < 0.05$

2.3 运动干预对前额叶血流动力学的影响

受试者在 MICT 和 HIIT 干预后, 多个脑区在任务过程中的 HbO 浓度发生显著变化或提高趋势(见图 2)。与对照组相比, 在运动后 20 min, MICT 显著提高一致条件下 R-VLPFC 的 HbO 浓度($t=2.92, P=0.005$, 图 2 A);

HIIT 对一致条件下 R-DLPFC 和 R-VLPFC 的 HbO 浓度的提高呈现出优于对照组的趋势($t=2.24, P=0.029$; $t=2.02, P=0.049$, 图 2 B)。任务过程中, 两干预组各脑区的 HbO 浓度未发现显著差异。

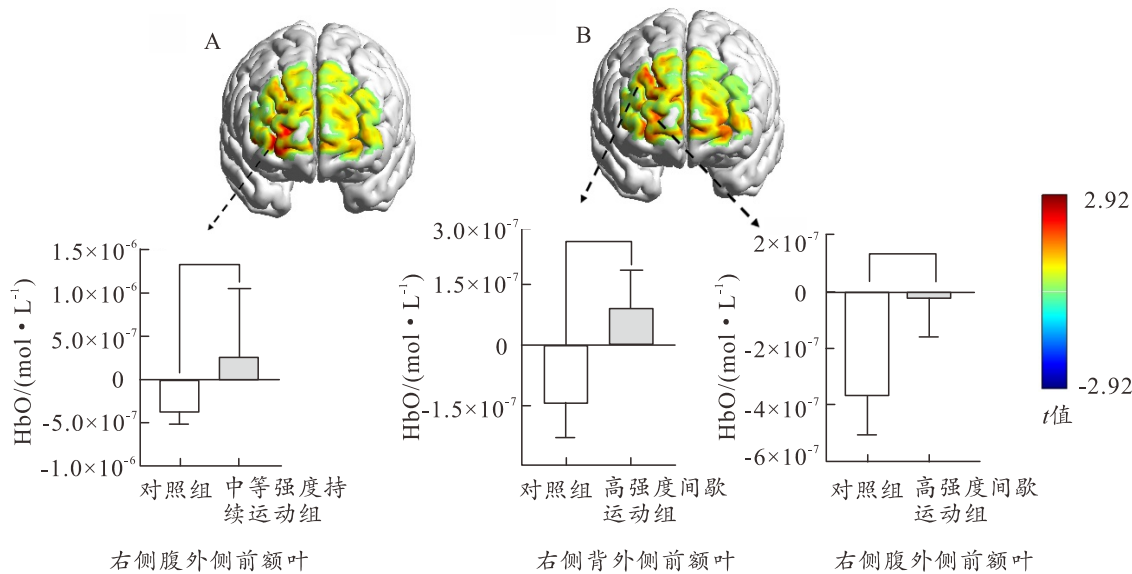


图 2 前额叶皮层各脑区在 Stroop 任务中前后测 HbO 浓度变化的组间结果

2.4 Stroop 任务表现变化与前额叶血流动力学变化之间的关系

Stroop 任务反应时的变化与 R-VLPFC 的 HbO 浓度变化呈相关性(见图 3)。在 Stroop 任务一致条件下, 干预后 20 min-干预前 MICT 组和 CON 组反应时的变

化与 R-VLPFC 的 HbO 浓度变化呈显著负相关($r=-0.37$, $P=0.02$, 图 3 A); HIIT 组和 CON 组反应时的变化与 R-VLPFC 的 HbO 浓度变化呈负相关趋势($r=-0.29$, $P=0.074$, 图 3 B)。在正确率方面, 未发现与各脑区 HbO 浓度变化的显著相关性。

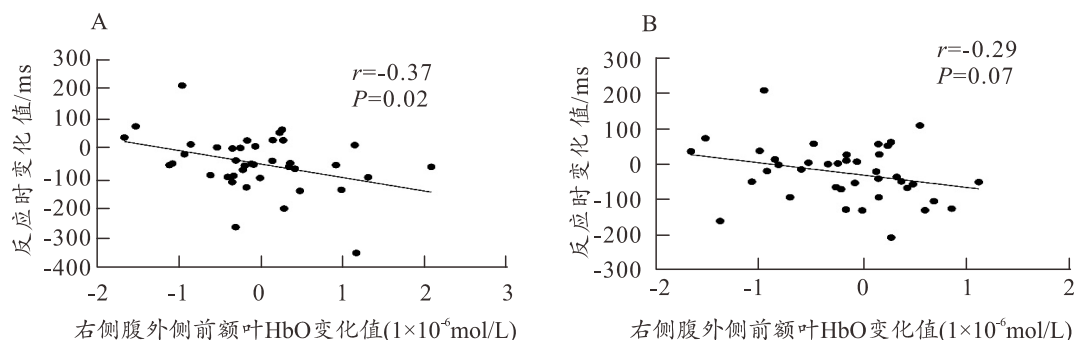


图 3 Stroop 任务的反应时变化与右侧腹外侧前额叶 HbO 浓度变化之间的相关性

3 讨论

本研究的目的是比较急性 MICT 和 HIIT 对注意缺陷症状男大学生抑制控制的影响, 并探讨这些影响的脑机制。前人研究发现, HIIT 相对于 MICT 在改善抑制控制方面可能表现更佳^[17-18], 但本研究的结果却与之不同, 显示出 MICT 可能具有更好的效果。这种差异可能有以下 2 个原因: (1) 先前研究未考虑干预间的能量消耗匹配问题。例如, Tian 等^[17]的研究中 HIIT 方案的能量消耗大于 MICT 方案, 结果表明仅 HIIT 组对抑制控制任务有显著改善, 而 MICT 组未发现显著改善。因此, 不同的能量消耗可能会对抑制控制任务产生不同的影响。(2) 研究人群不同。相较于前人 3 项针对健康成年人的研究^[16-18], 本研究中的受试者可能在注意力方面更差。MICT 干预后可能诱导适宜的唤醒水平, 这有利于注意缺陷症状患者注意力的稳定提高, 进而产生更好的认知表现。总之, 基于能量消耗基本一致的情况下, 本研究发现 MICT 对有注意缺陷症状男大学生抑制控制任务反应速度改善效果更佳。

前人研究发现, PFC 是调节抑制控制的关键脑区^[12], 尤其是 R-VLPFC。例如, 通过功能性磁共振成像研究发现, 当受试者执行停止信号任务时 R-VLPFC 显著激活^[27]; 通过 fNIRS 设备在 Stroop 任务中也发现相似结果^[28]。这些研究结果提示 R-VLPFC 是参与抑制控制过程的重要脑区, 主要负责抑制无关信息和冲动反应的产生^[29]。在本研究中, MICT 干预后的 Stroop 任务和 fNIRS 数据也提示, MICT 对抑制控制的影响可能与 R-VLPFC 的激活变化有关。但在 50 min 后的不一致条件下, MICT 改善 Stroop 任务的反应时并未观察到 PFC

激活显著变化。前人研究也报告过类似的发现^[15, 30], 即运动干预后行为学表现显著改善, 而 PFC 激活未见明显变化。结合目前的研究进展, 认为这可能与急性 MICT 通过提升 PFC 神经效率实现有关。神经效率的提高代表着以较低的大脑激活达到较好的认知任务表现^[31]。目前已有研究表明, 运动干预有利于神经效率提高^[32]。此外, 还有研究发现, 与较易任务(如一致任务)相比, 在充分练习后的较难任务(不一致任务)中神经效率更容易提高。这是因为在面对更复杂任务时, 个体经过充分练习后可能形成适当的应对策略^[31]。因此, 本研究中 MICT 干预后的不一致任务可能表现出神经效率提高, 即大脑激活水平没有显著增加, 但任务表现有显著改善。

目前, 关于 MICT 和 HIIT 对注意缺陷症状大学生 PFC 激活状态的研究仍然缺乏, 在本研究中也并未观察到两种干预方式对脑区激活状态产生显著差异。先前基于 fNIRS 设备对其他人群进行的研究中, 发现与本研究相似的结果, 即两种干预方式之间没有差异^[22], 但也有研究发现 HIIT 干预后产生比 MICT 更大的脑区激活^[33]。结果不一致的原因可能与测试任务、研究人群以及运动干预方案的差异有关。由于现有相关研究较少, 未来还需要更多的研究来探讨 MICT 和 HIIT 对抑制控制影响的脑机制。

本研究通过行为学和 fNIRS 数据发现, 急性 MICT 和 HIIT 均可以显著改善注意缺陷症状男大学生的抑制控制任务表现, 但与 HIIT 相比, MICT 的改善效果更显著且延续时间更长。fNIRS 数据显示, MICT 提高 R-VLPFC 脑区激活状态, 而 HIIT 仅存在激活提高趋势。

因此,急性运动改善抑制控制的原因可能与R-VLPFC激活增加有关,故本研究为注意缺陷症状男大学生运动干预方案的制定提供实践参考和理论依据。

本研究也存在以下局限性:(1)由于fNIRS的穿透深度较浅,只能探测到大脑皮层,无法深入到与抑制控制相关的大脑深部结构,如前扣带回(ACC)^[34]。因此,本研究无法确认抑制控制的改善是否与运动后ACC的激活相关;(2)本研究为探讨急性运动对抑制控制影响的延后效应,在基线测试后进行两次相同测试,因此测试成绩可能会受到练习效应的影响。(3)本研究只涉及注意缺陷症状男大学生,因此结果可能无法推广到其他人群。

参考文献:

- [1] SAYAL K, PRASAD V, DALEY D, et al. ADHD in children and young people: Prevalence, care pathways, and service provision[J]. *Lancet Psychiatry*, 2018, 5(2): 175-186.
- [2] ADLER L A, FARAONE S V, SPENCER T J, et al. The structure of adult ADHD[J]. *Int J Methods Psychiatr Res*, 2017, 26(1): 56-71.
- [3] VOLKOW N D, SWANSON J M. Clinical practice: Adult attention deficit-hyperactivity disorder[J]. *N Engl J Med*, 2013, 369(20): 1935-1944.
- [4] SONG P, ZHA M, YANG Q, et al. The prevalence of adult attention-deficit hyperactivity disorder: A global systematic review and meta-analysis[J]. *J Glob Health*, 2021, 11: 04009.
- [5] MAK A D P, CHAN A K W, CHAN P K L, et al. Diagnostic outcomes of childhood ADHD in Chinese adults[J]. *J Atten Disord*, 2020, 24(1): 126-135.
- [6] DIAMOND A. Executive functions[J]. *Annu Rev Psychol*, 2013, 64: 135-168.
- [7] SENKOWSKI D, ZIEGLER T, SINGH M, et al. Assessing inhibitory control deficits in adult ADHD: A systematic review and meta-analysis of the stop-signal task[J]. *Neuropsychol Rev*, 2023, 61(8): 536-551..
- [8] GIEL K E, SCHAG K, MAX S M, et al. Inhibitory control training enhanced by transcranial direct current stimulation to reduce binge eating episodes: Findings from the randomized phase ii accelect trial[J]. *Psychother Psychosom*, 2023, 92(2): 101-112.
- [9] DONG G, DEVITO E E, DU X, et al. Impaired inhibitory control in internet addiction disorder: A functional magnetic resonance imaging study[J]. *Psychiatry Res*, 2012, 203(2-3): 153-158.
- [10] GAPIN J I, LABBAN J D, BOHALL S C, et al. Acute exercise is associated with specific executive functions in college students with ADHD: A preliminary study[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2015, 4(1): 89-96.
- [11] LACOUNT P A, HARTUNG C M, VASKO J M, et al. Acute effects of physical exercise on cognitive and psychological functioning in college students with attention-deficit/hyperactivity disorder[J]. *Ment Health Phys Act*, 2022, 22(6): 713-732.
- [12] EGNER T, HIRSCH J. Cognitive control mechanisms resolve conflict through cortical amplification of task-relevant information[J]. *Nat Neurosci*, 2005, 8(12): 1784-1790.
- [13] YANAGISAWA H, DANI I, TSUZUKI D, et al. Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test[J]. *Neuroimage*, 2010, 50(4): 1702-1710.
- [14] BYUN K, HYODO K, SUWABE K, et al. Positive effect of acute mild exercise on executive function via arousal-related prefrontal activations: An fNIRS study[J]. *Neuroimage*, 2014, 98: 336-345.
- [15] SHAO X, HE L, LIU Y, et al. The effect of acute high-intensity interval training and Tabata training on inhibitory control and cortical activation in young adults[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1229307.
- [16] KAO S-C, WESTFALL D R, SONESON J, et al. Comparison of the acute effects of high-intensity interval training and continuous aerobic walking on inhibitory control[J]. *Psychophysiology*, 2017, 54(9): 1335-1345.
- [17] TIAN S, MOU H, QIU F. Sustained effects of high-intensity interval exercise and moderate-intensity continuous exercise on inhibitory control[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(5): 722-736.
- [18] TSUKAMOTO H, SUGA T, TAKENAKA S, et al. Greater impact of acute high-intensity interval exercise on post-exercise executive function compared to moderate-intensity continuous exercise[J]. *Physiol Behav*, 2016, 155: 224-230.
- [19] KAO S C, BAUMGARTNER N, NOH K, et al. Acute effects of intense interval versus aerobic exercise on children's behavioral and neuroelectric measures of inhibitory control[J]. *J Sci Med Sport*, 2023, 26(6): 316-321.
- [20] FENG Z T, MAO Z X, LIU F B, et al. Time course efficiency of MICE and HIIE on inhibitory control and

- HRV in adolescents with obesity and different cardiorespiratory fitness[J]. *Front Psychol*, 2023, 14: 1242190.
- [21] HUANG C L C, WENG S F, HO C H. Gender ratios of administrative prevalence and incidence of attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD) across the lifespan: A nationwide population-based study in Taiwan[J]. *Psychiatry Res*, 2016, 244: 382-387.
- [22] ZHU Y, SUN F, CHIU M M, et al. Effects of high-intensity interval exercise and moderate-intensity continuous exercise on executive function of healthy young males[J]. *Physiol Behav*, 2021, 239: 113505.
- [23] OCHI G, YAMADA Y, HYODO K, et al. Neural basis for reduced executive performance with hypoxic exercise[J]. *Neuroimage*, 2018, 171: 75-83.
- [24] 陈佩杰, 王人卫. 健康体适能评定理论与方法[M]. 上海: 上海教育出版社, 2013.
- [25] GILMAN J M, Y ü C E L M A, PACHAS G N, et al. Delta-9-tetrahydrocannabinol intoxication is associated with increased prefrontal activation as assessed with functional near-infrared spectroscopy: A report of a potential biomarker of intoxication[J]. *Neuroimage*, 2019, 197: 575-585.
- [26] KEYTEL L R, GOEDECKE J H, NOAKES T D, et al. Prediction of energy expenditure from heart rate monitoring during submaximal exercise[J]. *J Sports Sci*, 2005, 23(3): 289-297.
- [27] ARON A R, FLETCHER P C, BULLMORE E T, et al. Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans[J]. *Nat Neurosci*, 2003, 6(2): 115-116.
- [28] KUJACH S, BYUN K, HYODO K, et al. A transferable high-intensity intermittent exercise improves executive performance in association with dorsolateral prefrontal activation in young adults[J]. *Neuroimage*, 2018, 169: 117-125.
- [29] RAVINDRANATH O, CALABRO F J, FORAN W, et al. Pubertal development underlies optimization of inhibitory control through specialization of ventrolateral prefrontal cortex[J]. *Dev Cogn Neurosci*, 2022, 58: 101162.
- [30] TAKAHASHI S, GROVE P M. Impact of acute open-skill exercise on inhibitory control and brain activation: A functional near-infrared spectroscopy study [J]. *PLoS One*, 2023, 18(3): e0276148.
- [31] NEUBAUER A C, FINK A. Intelligence and neural efficiency[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2009, 33(7): 1004-1023.
- [32] 殷春宇, 史利, 张文. 不同水平足球运动员空间知觉能力差异: 基于行为学和 fNIRS 的研究[J]. *体育学刊*, 2024, 31(1): 143-148.
- [33] PARK S-Y, REINL M, SCHOTT N. Effects of acute exercise at different intensities on fine motor-cognitive dual-task performance while walking : A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Eur J Neurosci*, 2021, 54(12): 8225-8248.
- [34] LELAND D S, ARCE E, MILLER D A, et al. Anterior cingulate cortex and benefit of predictive cueing on response inhibition in stimulant dependent individuals [J]. *Biol Psychiatry*, 2008, 63(2): 184-190.

