



经颅脉冲电刺激对不同训练任务后运动员疲劳感及 大脑皮层局部血流的影响

申阳阳, 刘建, 武庆昌, 娄虎*

(南通大学 体育科学学院, 江苏 南通 226019)

摘要:目的:采用自主研发的便携式经颅脉冲电刺激仪(transcranial pulsed current stimulation, tPCS)对完成体力任务、认知任务和混合任务后的运动员进行干预,探讨tPCS干预对运动员疲劳感及大脑皮层局部血流的影响。方法:24名大学生运动员随机分为真刺激组($n=12$, 电流1.5 mA, 持续15 min)和假刺激组($n=12$),在刺激前后进行疲劳感的问卷测试和功能性近红外光谱技术(fNIRS)数据采集。结果:真刺激组RPE结果显著优于假刺激组($P<0.05$);真刺激组体力任务tPCS干预后被显著激活的通道为ch3、ch5、ch8;认知任务tPCS干预后被显著激活的通道为ch2、ch6、ch9、ch10、ch14、ch18、ch21;混合任务tPCS干预后被显著激活的通道为ch1、ch2、ch6、ch12、ch13、ch17、ch22。结论:tPCS能够有效降低运动员主观疲劳感;tPCS能够选择性增加与任务有关脑区的血氧含量,具体表现为,体力任务后tPCS干预显著激活大脑运动皮层,认知任务后tPCS干预显著激活大脑额极区、Broca三角部、背外侧前额叶皮质,混合任务后tPCS干预显著激活大脑体感联合皮层、运动皮层、前辅助运动区、前额叶皮质。

关键词:运动员;疲劳感;便携式经颅脉冲电刺激仪;非侵入性脑刺激;功能性近红外光谱技术

中图分类号:G804.8

文献标识码:A

非侵入性脑刺激是通过对大脑特定区域施加一定强度的电流刺激,从而调节大脑皮层神经活动的一种神经刺激技术(王开元等, 2019)。近年来,由于非侵入性脑刺激具有无创、安全等优点,使得该技术广泛应用于医疗、运动等领域(卞秀玲等, 2018)。便携式经颅脉冲电刺激仪(transcranial pulsed current stimulation, tPCS)是一种非侵入性脑刺激技术,采用可变频率、强度等选择性激活内啡肽和皮质神经元活动进行神经调控(Lebedev et al., 2002)。由于tPCS能够进行大脑深部刺激,改变内啡肽分泌,从而可能对提升某些运动相关的功能具有潜在应用价值。但与经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)成果相比,tPCS的研究还有较大空间。

实际上,tPCS已经被认为是一种有前途的临床康复治疗技术。有研究表明,tPCS是一种安全的干预措施,可用于治疗抑郁、焦虑、疼痛障碍等临床疾病,也可用于改善帕金森病患者的步态平衡等康复治疗(Alon et al., 2012; Kirsch et al., 2000)。近年来有研究将tPCS应用到运动领域中,用于缓解运动员疲劳,已有研究从血液指标、行为学指标、主观问卷等维度证实了tPCS缓解运动员疲劳的有效性(Fudin et al., 2019)。

疲劳是所有运动员必须面对的问题,加速疲劳恢复是

提高训练质量的重要环节,也是运动训练研究领域的热点。疲劳研究中既需要关注肌肉力量的减弱,也需要注意疲劳感的产生(Giulio et al., 2006)。运动所诱发的疲劳感被认为是疲劳产生和恢复系统的关键,它源于神经网络中的内稳态控制系统由于激活水平变化导致潜意识表征间的时间差异,这些不匹配被大脑中产生意识的结构感知为疲劳感(Gibson et al., 2003)。但在以往的疲劳恢复研究中,多聚焦于肌肉疲劳或心理疲劳的恢复,而疲劳感恢复是一个被广泛提及,却较少研究的现象(Ishii et al., 2019)。

运动员疲劳感可能是一个复杂的心理觉察,代表维持一定水平运动行为的神经性努力,而不是实际动作所产生的身体感觉。Swart等(2012)区分了运动中的这2种疲劳现象,指出运动诱发的疲劳感不仅是基于由运动引起的生理变化,也是由大脑对运动的评估后所做出的系统

收稿日期:2021-10-20; 修订日期:2022-03-22

基金项目:国家科技冬奥重点研发计划项目(2019YFF0301600)。

第一作者简介:申阳阳(1998-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为运动员心理疲劳的干预,E-mail:1518793976@qq.com。

*通信作者简介:娄虎(1980-),男,教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为运动员心理调控与训练,E-mail:15692068@qq.com。

反应,即疲劳与个体的主观判断有关,也与大脑的状态有关。因此,可以采用疲劳的主观问卷和监测脑部血流活动对运动员疲劳感进行评估。主观疲劳量表(rating of perceived exertion, RPE)是一种主观评价运动疲劳的评估手段,常在运动疲劳研究中使用,具有经济、便捷、高效的优点(何志金等, 2021)。功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是近年来快速发展起来的一项非侵入光学测量方法,在脑组织中,主要的近红外光吸收体是氧合血红蛋白(Oxy-Hb)和脱氧血红蛋白(Deoxy-Hb)(刘佳宁等, 2020)。目前, fNIRS已用于体育研究领域,包括对运动过程中的神经加工(Khan et al., 2018);运动训练过程中的肌氧监测、脑氧监测(Chang et al., 2017);运动疲劳、运动认知领域的脑机制研究等(蒋长好, 2010)。

对不同的训练任务, fNIRS研究常采用不同的兴趣脑区(region of interest, ROI)探讨局部血流的情况。在体力任务的研究中,有研究发现,体力任务后运动皮层的氧合水平显著增加(Shibusawa et al., 2010; Shibuya et al., 2006, 2007)。而注意、记忆、执行、计算等高级认知能力与前额叶皮层氧合血红蛋白浓度密切相关(林无忌等, 2021; 王莉等, 2019)。在体力与认知的混合任务研究中,通常兴趣脑区包括与感觉系统、运动系统和自主系统等相关的脑区。Nielsen(2002)认为,需要体力与认知混合的任务, ROI与初级感觉皮层、初级运动皮层和辅助运动皮层的激活有关。而Thornton等(2001)发现, ROI为右背外侧前额叶和右侧前运动皮层被激活。王碧天(2017)对驾驶行为的研究结果显示,驾驶员为了完成混合任务,需要多个脑区的协同作用,而任务态的驾驶任务设计重点在于保持驾驶员大脑前额叶区和运动区2部分脑区的活跃。

综上,本研究体力任务的ROI为顶叶,认知任务的ROI为前额叶,混合任务的ROI为顶叶和前额叶,通过RPE和fNIRS进行测量,探讨体力任务、认知任务、混合任务后, tPCS干预对运动员疲劳感及前额叶、顶叶局部血流的影响。

1 实验对象与方法

1.1 研究对象

本实验共招募30名大学生运动员参加训练,为提高分组后2组被试的同质性,第一次训练后将RPE得分相同或相近的被试随机分为真、假刺激组。实验发现,个别被试出现未达到疲劳即要求停止实验的情况,因此,为确保被试有一定的疲劳感,排除RPE评分低于5的被试(第1次训练后排除2人,第2次训练后排除4人,第3次训练后没有被试排除),最终共24名被试完整的参加了全部实验。真刺激组12名被试[男性8名,女性4名;平均年龄(20.67±0.65)岁;平均训练年限(4.17±0.72)年],假刺激组

12名被试[男性8名,女性4名;平均年龄(20.50±0.80)岁;平均训练年限4.08±0.67)年]。

所有被试均无任何神经或精神疾病史以及其他运动功能障碍疾病,且均为右利手。实验前告知实验内容,要求被试能明确理解实验过程。2组被试的男女比例、年龄、训练年限均无显著差异($P>0.05$)。所有被试均在实验前签署了知情同意书,本研究通过南通大学伦理委员会批准[通大伦审(2020)1号]。

1.2 训练任务

本实验共分为3种训练任务:体力任务、认知任务和混合任务。基于实验前对专业运动员、教练员的访谈,结合实际训练任务,专业运动员可能既存在体力诱发的疲劳又存在认知诱发的疲劳。因此,本研究选择体力、认知与混合3种训练任务。体力任务要求被试在室内进行跑台训练,女生以7 km/h开始,男生以8 km/h开始,递增幅度为1 km/2 min,保持水平坡度不变。随负荷增加,被试主观感觉很疲劳并已尽最大能力即停止训练(陶坚等, 2014)。认知任务要求被试完成心算(20 min)与脑筋急转弯/谜题(20 min),为避免被试手动的干扰,全程由同一名实验人员进行辅助操作,被试只需口头回答(Klaassen et al., 2013, 2016)。混合任务要求被试在跑台训练的同时加以心算与脑筋急转弯任务。

实验中被试均参与3种训练任务,为避免前一任务的累加实验效应,在3种训练任务之间各进行48 h间隔。因此,在被试参与全部实验任务的情况下,可确保3种实验任务相对独立(王建凯等, 2020; 夏忠梁, 2014)。

1.3 实验工具

1.3.1 fNIRS

采用Brite便携式无线近红外脑成像系统(Artinis公司, 荷兰),监测被试相应脑区血氧信号。Brite共有10个发射器(Tx),每个发射器发射2个波长(760 nm与850 nm),8个探测器(Rx),采样率为50 Hz。

fNIRS测试后,使用3D定位仪(FASTRAK, Polhemus, 美国)与概率配准方法将fNIRS通道位置与MNI空间坐标进行配准,获得与布鲁德曼分区之间的对应关系(表1)。

1.3.2 经颅脉冲电刺激仪

采用项目组研发的运动员经颅脉冲电刺激仪,额部正中位置放置1片面积为5 cm×9 cm的电极片,左右两耳乳突处放置2片面积均为5 cm×5 cm的电极片,布局方案参考Lebedev等(2001, 2002)研究。脉冲波形为方波,双向脉冲,占空比29.7%,脉冲频率60~80 Hz,电流强度调节范围0~2 mA,最大电压20 V。仪器已通过深圳华通威国际检验有限公司(具有CMA、ilac-MRA、CNAS质量检查资质)的全项目检验(报告编号CHTSM21040050-52),获得安全认证。

表1 体力任务通道布局与布鲁德曼分区间的对应关系

Table 1 Correspondence between Physical Task Channel Layout and Brodmann Area

训练任务	布鲁德曼分区	对应通道
体力任务	额叶眼动区	ch17, ch18
	前辅助运动区	ch4, ch7, ch12, ch13, ch14, ch15, ch16, ch19, ch22, ch26
	运动皮层	ch3, ch5, ch8, ch10, ch20, ch23, ch27
	体感皮层	ch1, ch6, ch21, ch25
	体感联合皮层	ch2, ch9, ch11, ch24
认知任务	额叶眼动区	ch12
	背外侧前额叶皮质	ch3, ch5, ch9, ch10, ch13, ch15, ch16, ch17, ch19, ch21, ch22
	额极区	ch2, ch7, ch8, ch11, ch14, ch20, ch23, ch24
	Broca三角部	ch4, ch6, ch18
	额下回眶部	ch1
混合任务	前额叶皮层	ch17, ch18, ch19, ch20, ch21, ch22, ch23
	前辅助运动区	ch8, ch9, ch10, ch12, ch13, ch16
	运动皮层	ch2, ch6, ch7, ch11
	体感皮层	ch4, ch5, ch14, ch15
	体感联合皮层	ch1, ch3

1.3.3 RPE 问卷

采用RPE的10级量表,RPE评分越高表示自觉运动强度越高,5分表示主观上开始感到费力(Borg, 1988)。

1.4 干预方案

本实验是一项随机双盲实验,tPCS由能够操作且未参与本研究的人员管理,被试不知晓刺激类型。刺激强度和调节过程参考Cespón等(2019)、Marceglia等(2016)研究方案。真刺激条件开始时,操作人员在30s内将电流从0mA逐渐增加至1.5mA,持续15min。在刺激结束时,电流在30s时间内自动下降到0mA。为避免安慰剂效应,对照组进行假刺激,假刺激条件使用与真刺激相同的刺激时间、电流强度和电流加速过程,但在电流初始加速过程之后,操作人员将电流重新调整为0mA。整个刺激过程中,当被试感觉到由刺激引起的任何不舒服感觉时,立即停止刺激。每次刺激结束后,被试若有任何不适感及时向实验人员反馈并记录。

1.5 实验流程

在体力任务实验中,所有被试进行体力训练,训练结束后对2组被试Oxy-Hb浓度数据进行第1次采集并要求被试填写RPE问卷,采集结束后进行tPCS干预。干预结束后,对被试Oxy-Hb浓度数据进行第2次采集并再次填写RPE问卷。认知任务与混合任务实验中,除训练任务与体力任务实验不同,其余步骤均与体力任务实验相同。3种训练任务间隔不少于48h。

为避免被试疲劳感随时间自然恢复的影响,在被试完成训练任务后,即刻对其RPE、fNIRS进行测量,测量结束后即刻进行tPCS干预,干预结束后即刻重复对被试RPE、fNIRS进行测量;同时,设置假刺激组,通过与真刺激组的对比减少自然恢复的影响。

1.6 数据采集

1.6.1 体力任务后fNIRS采集方案

体力任务后,采用1×27的模板,覆盖顶叶。根据国际10-20系统将Cz放置在Tx5和Rx4之间(图1)。

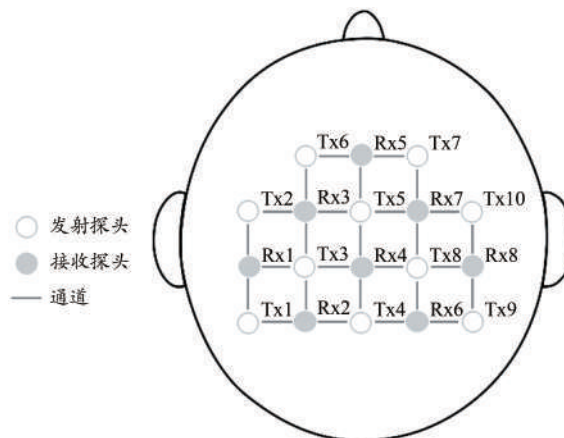


图1 体力任务探头、通道布置

Figure 1. Probes and Channel Layout in Physical Task

1.6.2 认知任务后fNIRS采集方案

在认知任务后,采用2×12的模板,覆盖前额叶。根据国际10-20系统将Tx4放置在Fp2,Tx6放置在Fp1(图2)。

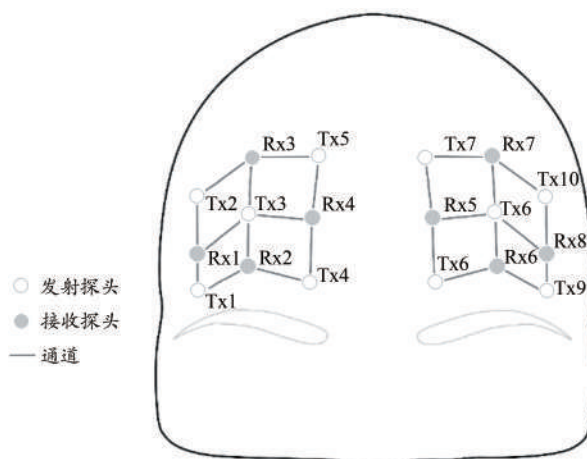


图2 认知任务探头、通道布置

Figure 2. Probes and Channel Layout in Cognitive Task

1.6.3 混合任务后fNIRS采集方案

结合已有研究和本研究体力任务与认知任务的实验结果,最后选择1×15+1×8的模板,覆盖右侧的部分前

额叶和左侧的部分运动区, 将 Cz 放置在 Tx4 和 Rx2 之间(图 3)。

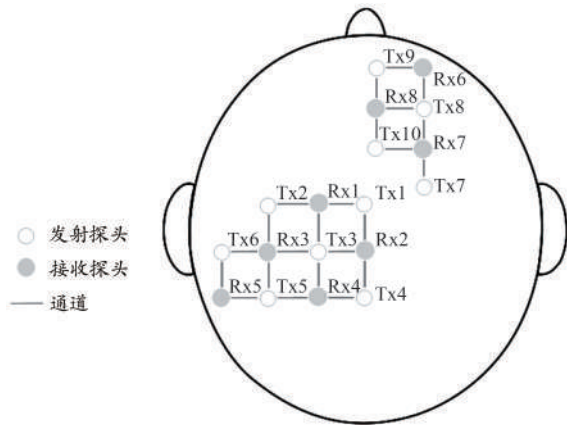


图3 混合任务探头、通道布置

Figure 3. Probes and Channel Layout in Mixed Task

1.7 数据分析

在 Matlab 2013b(Mathworks, 美国)软件中使用 Homer 2.8(MGH-Martinos Center for Biomedical Imaging, 美国)进行数据分析。首先对采集到的数据进行通道信号质量检测, 剔除变异系数(CV)高于所有通道最大值 25% 的通道(姜劲等, 2015); 采用主成分分析(principle component analysis, PCA)对每个通道去除生理噪音, 参数选择 0.97(Cooper et al., 2012)。通过 Spline 矫正运动伪迹; 采用带通滤波 0.01~0.15 Hz 去除高频噪音和低频伪迹的影响(Naseer et al., 2015); 计算每名被试在每个任务下的 Oxy-Hb 数值, 纳入计算的 Oxy-Hb 持续时间为 3 min。经过以上的预处理过程, 得出每名被试在每个任务中的单通道氧合血红蛋白浓度数据。为了使结果更加直观, 通过 Matlab 程序根据通道的位置, 基于氧合血红蛋白浓度描绘脑区热点图。

1.8 统计分析

所有数据均采用 SPSS 24.0 统计软件进行统计和分析。以刺激条件(真刺激组、假刺激组)为组间变量, 以时间(前、后测)为组内变量对被试 Oxy-Hb 浓度进行 2(刺激条件)×2(时间)的双因素重复测量方差分析。 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异非常显著。数据采用均值±标准误差表示。

2 结果

2.1 tPCS 被试使用评价

实验期间所有被试均未出现不良反应, 被试填写《实验操作主观感受问卷》结果显示, “刺激干预中我感觉很不舒服”“刺激干预中我感觉很疼痛”2 个条目均未出现得分大于 5 的情况, 表明本项目组研发的 tPCS 用于运动员疲劳感干预的使用者评价较好。

2.2 基线数据采集

被试训练结束后, 对 24 名被试进行基线数据采集, 并进行组间同质性检验。结果表明 2 组间 Oxy-Hb 指标均未出现显著性差异: 体力任务中, $t = -2.009$, $P = 0.066$; 认知任务中, $t = -1.153$, $P = 0.273$; 混合任务中, $t = 2.068$, $P = 0.053$ 。可视为 2 组同质。

2.3 RPE 问卷

体力训练任务中, 对时间与刺激条件在 RPE 问卷得分的差异进行重复测量方差分析。结果显示(表 2), 时间主效应显著 [$F_{(1, 22)} = 107.800$, $P = 0.000$], 刺激条件主效应显著 [$F_{(1, 22)} = 6.828$, $P < 0.05$], 时间与刺激条件交互作用显著 [$F_{(1, 22)} = 55.000$, $P = 0.000$]。事后两两比较发现, 真刺激组评分低于假刺激组 ($P < 0.05$), 实验后测评分显著低于前测 ($P < 0.05$)。

表 2 2 组被试 RPE 结果

Table 2 RPE Results in Two Groups

训练任务		df	F	P
体力任务	时间	22	107.800	0.000
	刺激条件		6.828	0.016
	时间×刺激条件		55.000	0.000
认知任务	时间	22	67.305	0.000
	刺激条件		44.775	0.000
	时间×刺激条件		31.508	0.000
混合任务	时间	22	39.553	0.000
	刺激条件		4.840	0.039
	时间×刺激条件		11.468	0.003

认知训练任务中, 对时间与刺激条件在 RPE 问卷得分的差异进行重复测量方差分析。结果显示(表 2), 时间主效应显著 [$F_{(1, 22)} = 67.305$, $P = 0.000$], 刺激条件主效应显著 [$F_{(1, 22)} = 44.775$, $P = 0.000$], 时间与刺激条件交互作用显著 [$F_{(1, 22)} = 31.508$, $P = 0.000$]。事后两两比较发现, 真刺激组评分低于假刺激组 ($P < 0.05$), 实验后测评分显著低于前测 ($P < 0.05$)。

混合训练任务中, 对时间与刺激条件在 RPE 问卷得分的差异进行重复测量方差分析。结果显示(表 2), 时间主效应显著 [$F_{(1, 22)} = 39.553$, $P = 0.000$], 刺激条件主效应显著 [$F_{(1, 22)} = 4.840$, $P < 0.05$], 时间与刺激条件交互作用显著 [$F_{(1, 22)} = 11.468$, $P < 0.01$]。事后两两比较发现, 真刺激组评分低于假刺激组 ($P < 0.05$), 实验后测评分显著低于前测 ($P < 0.05$)。

2.4 tPCS 干预前后 fNIRS 结果

2.4.1 体力任务: tPCS 干预后 Oxy-Hb 浓度变化

被试在完成体力任务, 接受 tPCS 干预后, 被显著激活的通道为 ch3、ch5、ch8, 对应激活的脑区为运动皮层(图 4)。

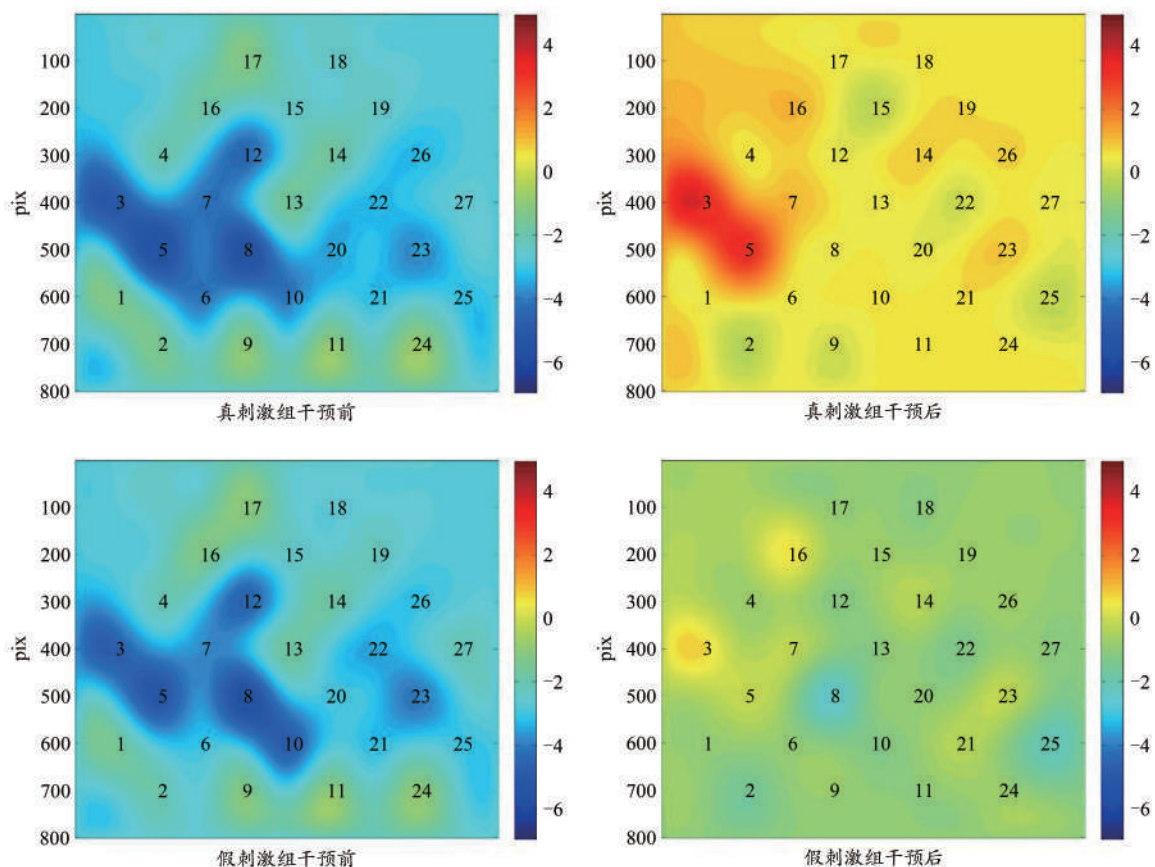


图4 体力任务后tPCS干预的脑部激活热点图

Figure 4. Heatmaps of tPCS-induced Brain Activation after Physical Task

对时间与刺激条件在 Oxy-Hb 指标的差异进行重复测量方差分析。结果显示(表3),时间主效应显著 [$F_{(1,22)} = 140\ 797.477, P = 0.000$],刺激条件主效应显著 [$F_{(1,22)} = 3\ 214.182, P = 0.000$]。时间与刺激条件交互效应显著 [$F_{(1,22)} = 10\ 745.407, P = 0.000$]。事后两两比较发现,真刺激组 Oxy-Hb 浓度较假刺激组高。真刺激组与假刺激组间 Oxy-Hb 浓度差异对比见图5。

2.4.2 认知任务: tPCS 干预后 Oxy-Hb 浓度变化

被试在完成认知任务,接受 tPCS 干预后,被显著激活的通道为 ch2、ch6、ch9、ch10、ch14、ch18、ch21,对应激活的脑区为额极区、Broca 三角部、背外侧前额叶皮层(图6)。

表3 2组被试 Oxy-Hb 结果

Table 3 Oxy-Hb Results in Two Groups

训练任务		df	F	P
体力任务	时间	22	140 797.477	0.000
	刺激条件		3 214.182	0.000
	时间×刺激条件		10 745.407	0.000
认知任务	时间	22	64 810.402	0.000
	刺激条件		1 068.784	0.000
	时间×刺激条件		976.678	0.000
混合任务	时间	22	26 208.163	0.000
	刺激条件		2 288.062	0.000
	时间×刺激条件		1 564.792	0.000

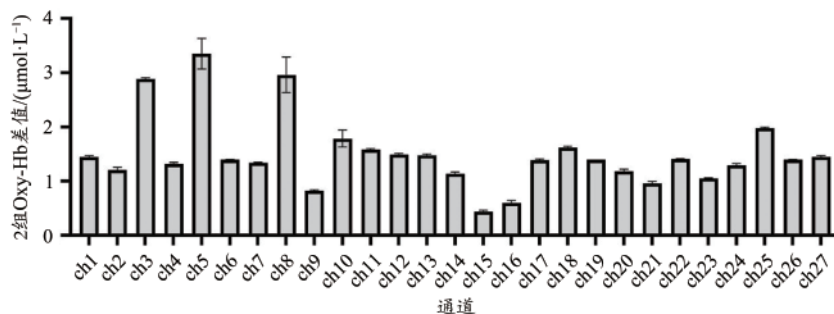


图5 体力任务后tPCS干预的组间各通道 Oxy-Hb 浓度差

Figure 5. Concentration Difference of Oxy-Hb in Each Channel Caused by tPCS Intervention after Physical Task

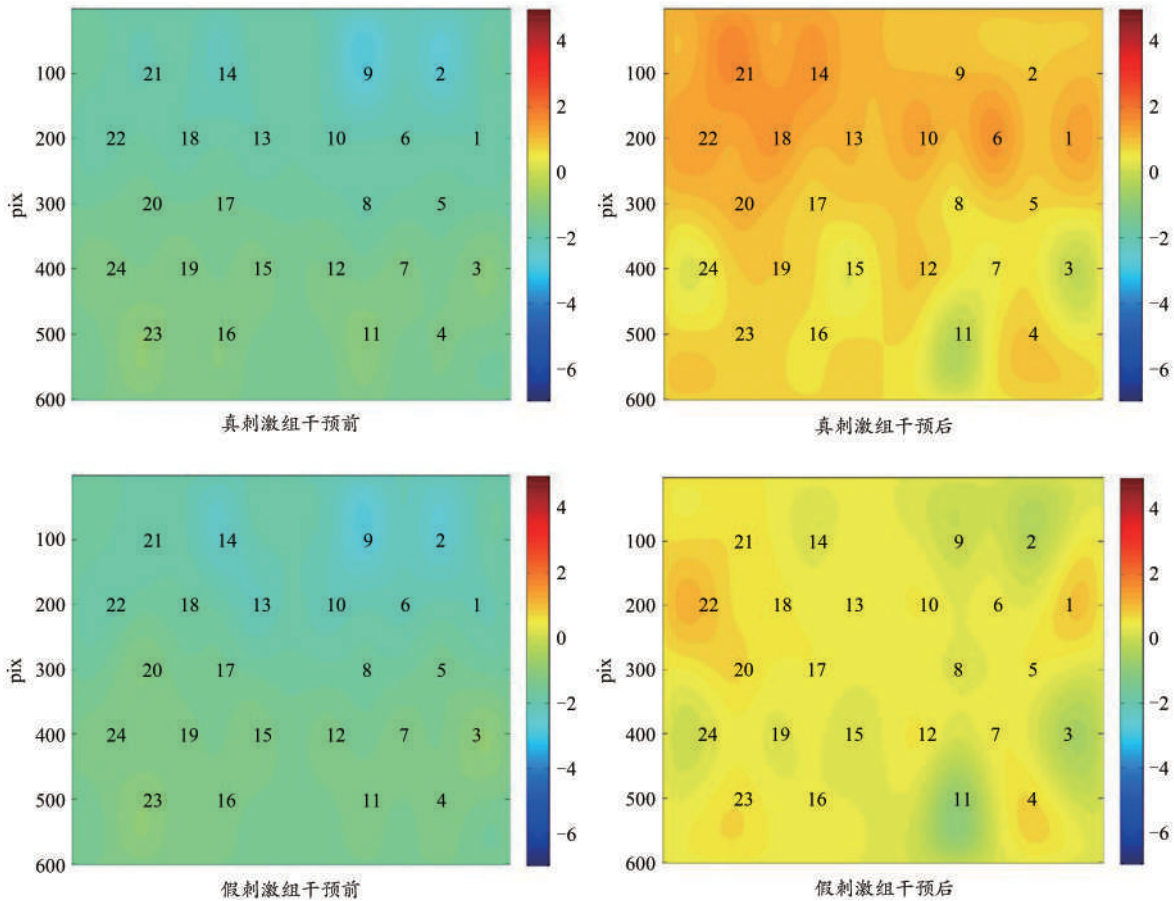


图6 认知任务后tPCS干预的脑部激活热点图

Figure 6. Heatmaps of Tpcs-induced Brain Activation after Cognitive Task

对时间与刺激条件在 Oxy-Hb 指标的差异进行重复测量方差分析。结果显示(表 3), 时间主效应显著 [$F_{(1,22)} = 64\ 810.402, P = 0.000$], 刺激条件主效应显著 [$F_{(1,22)} = 1\ 068.784, P = 0.000$]。时间与刺激条件交互效应显著

[$F_{(1,22)} = 976.678, P = 0.000$]。事后两两比较发现, 真刺激组 Oxy-Hb 浓度较假刺激组高。真刺激组与假刺激组间 Oxy-Hb 浓度差异对比见图 7。

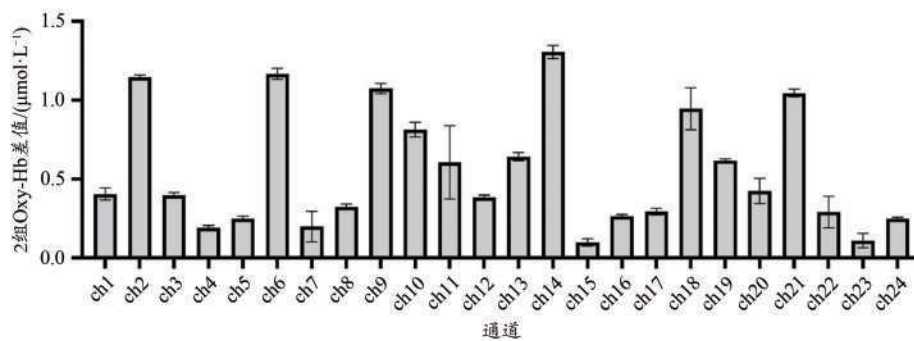


图7 认知任务后tPCS干预的组间各通道 Oxy-Hb 浓度差

Figure 7. Concentration Difference of Oxy-Hb in Each Channel Caused by tPCS Intervention after Cognitive Task

2.4.3 混合任务: tPCS 干预后 Oxy-Hb 浓度变化

被试在完成混合任务, 接受 tPCS 干预后, 被显著激活的通道为 ch1、ch2、ch6、ch12、ch13、ch17、ch22, 对应激活的脑区为体感联合皮层、运动皮层、前辅助运动区、前额叶皮层(图 8)。

对时间与刺激条件在 Oxy-Hb 指标的差异进行重复测量

方差分析。结果显示(表 3), 时间主效应显著 [$F_{(1,22)} = 26\ 208.163, P = 0.000$], 刺激条件主效应显著 [$F_{(1,22)} = 2\ 288.062, P = 0.000$]。时间与刺激条件交互效应显著 [$F_{(1,22)} = 1\ 564.792, P = 0.000$]。事后两两比较发现, 真刺激组 Oxy-Hb 浓度较假刺激组高。真刺激组与假刺激组间 Oxy-Hb 浓度差异对比见图 9。

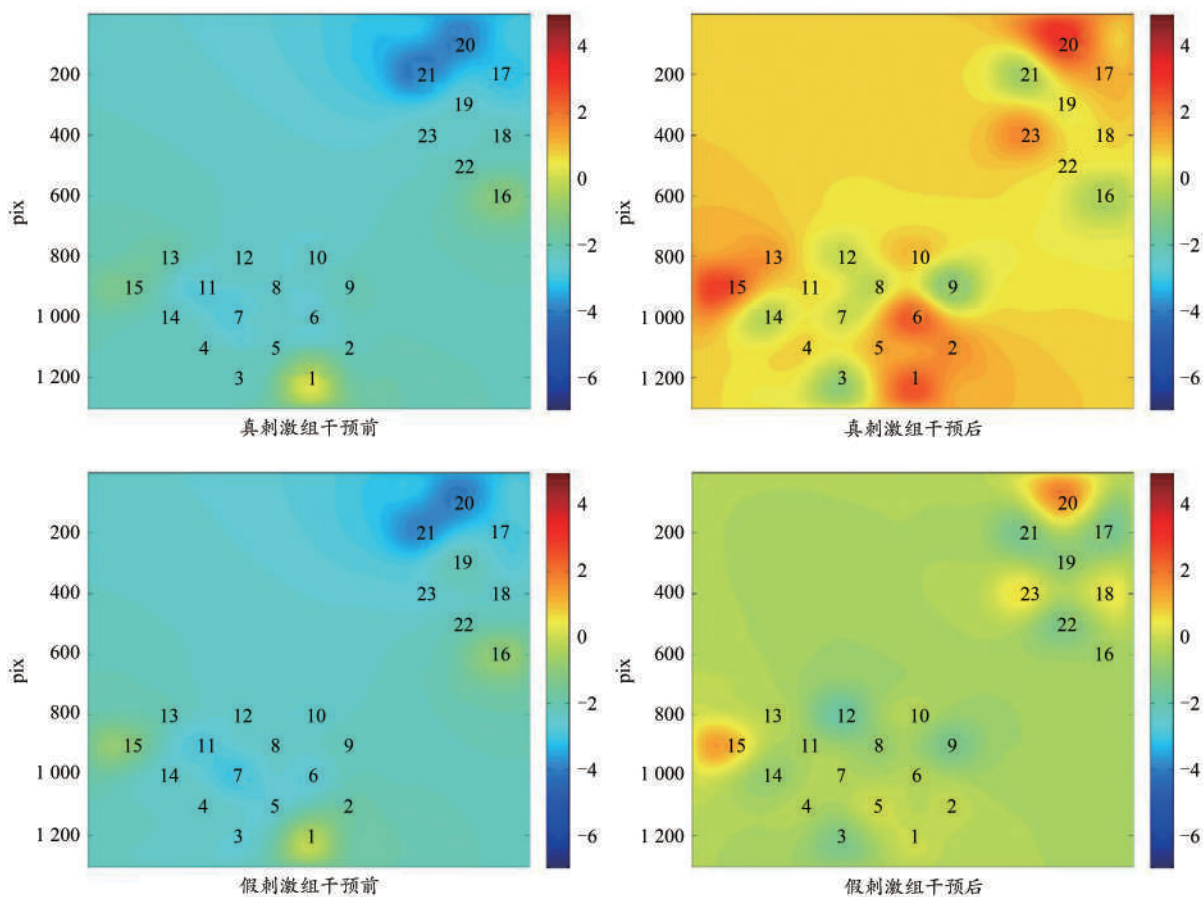


图8 混合任务后tPCS干预的脑部激活热点图

Figure 8. Heatmaps of Tpcs-induced Brain Activation after Mix Task

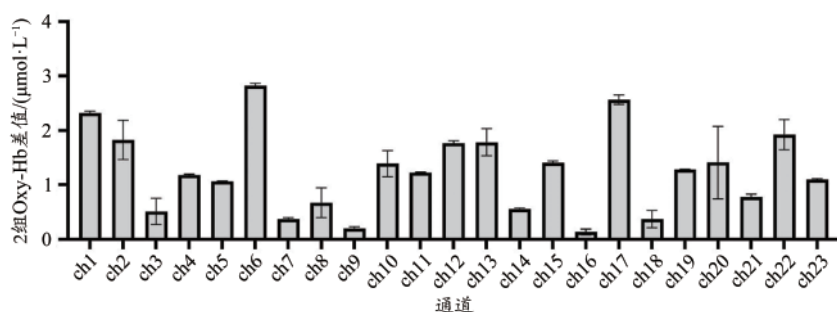


图9 混合任务后tPCS干预的组间各通道Oxy-Hb浓度差

Figure 9. Concentration Difference of Oxy-Hb in Each Channel Caused by tPCS Intervention after Mix Task

3 讨论

本研究采用RPE和fNIRS,对被试在体力任务、认知任务、混合任务3种训练后,相应脑区Oxy-Hb激活状态及主观感受进行分析,探讨tPCS干预对运动员疲劳感恢复的效应,并揭示脑部血流状况。研究发现,真刺激组被试在分别完成3种训练任务并接受tPCS干预后,RPE得分均显著降低,且大脑相关脑区的皮层被显著激活。

3种训练任务后,被试的RPE得分均高于5,表明被试出现疲劳的主观状态,真刺激组被试接受tPCS干预后,RPE得分降低,且效果优于假刺激组。这验证了本研究的假设,并与Lebedev等(2001)研究结果一致,该研究发现,tPCS能够有效缓解疲劳的生理、认知和情感成分。其

原因可能是tPCS诱发β-内啡肽的分泌。疲劳感产生的可能原因之一是β-内啡肽浓度下降,反之,当β-内啡肽浓度上升则可能会削弱疲劳的主观感受(Mousa et al., 2021)。也有可能是因为主观疲劳知觉的形成来自外周感受器的传入信息在大脑皮层中的加工,在被试疲劳状态下,大脑运动神经元发出更多的神经冲动,而神经冲动的增加也伴随着放电的增加,当放电的增加传递给躯体感觉皮质区,从而使被试产生了疲劳的感觉(Clark et al., 2016)。因此,真刺激组被试主观疲劳感降低可能是由于tPCS代偿了一部分皮质神经元兴奋性,从而弥补疲劳状态下被试主观感受的下降。

在3种训练任务后的fNIRS探索中,本研究通过检测

不同的 ROI, 结果支持了 tPCS 可能会选择性激发不同脑区的血氧水平, 其靶向脑区与任务类型有关。在体力任务中, 本研究 ROI 区域为额叶眼动区、前辅助运动区、运动皮层、体感皮层和体感联合皮层, 结果显示 ch3、ch5、ch8 被显著激活, 对应的脑区为左侧运动皮层。虽然没有以往的研究直接支持本研究结果, 但相关研究支持了体力任务的疲劳感发生与运动皮层有关, 特别是与对侧脑区关系更强, 而疲劳感发生后会出现运动皮层血氧含量降低。Liu 等(2002)研究部分支持了本研究结果, 该研究发现, 由体力任务诱发的肌肉疲劳发生时, 会出现运动皮层激活水平的下降。对运动皮层进行磁刺激的研究表明, 单侧肢体肌肉疲劳后, 对侧运动皮层兴奋性显著降低, 并在疲劳任务停止后, 兴奋性持续降低(Hashemirad et al., 2017; Säisänen et al., 2019)。

在认知任务中, 疲劳感的 ROI 为额叶眼动区、背外侧前额叶皮质、额极区、Broca 三角部、额下回眶部, 结果显示, tPCS 显著激活的通道为 ch2、ch6、ch9、ch10、ch14、ch18、ch21, 对应的脑区为大脑额极区、Broca 三角部、背外侧前额叶皮质。以往研究支持了本研究结果, 杨桂芬等(2007)发现, 学习、记忆、算术任务等高级认知活动与前额叶皮质密切相关。而 tPCS 干预可以有效加强神经连接从而诱导认知功能加强, Morales-Quezada 等(2015)认为, tPCS 可以有效促进被试数学任务的算术处理能力, 显著增强其认知效应。因此被试在认知训练任务后接受 tPCS 干预, 增加被试大脑额极区、Broca 三角部、背外侧前额叶皮质 Oxy-Hb 浓度, 从而加强被试认知功能。

在混合任务中, 疲劳感的 ROI 为前额叶皮质、前辅助运动区、运动皮层、体感皮层、体感联合皮层, 结果显示, tPCS 显著激活的通道为 ch1、ch2、ch6、ch12、ch13、ch17、ch22, 对应激活的脑区为体感联合皮层、运动皮层、前辅助运动区、前额叶皮质。这种混合任务与现实中的运动员疲劳感更为接近, 通常在运动过程中需要感觉系统、运动系统和自主系统的持续活动, 伴有认知任务的体力活动, 通常会发生认知加工竞争, 从而在运动皮层之外, 还出现前额叶皮质等其他区域的失活(Dietrich, 2003)。前额叶皮质已经被证明不仅与认知信息处理有关, 而且对运动期间认知功能的调节至关重要(Miller, 2007)。在复杂运动导致的疲劳感研究中, 前额叶皮质联合其他脑区皮质共同输出到运动皮层, 从而表现出复杂的大脑区域协调和激活(Fontes et al., 2015)。

虽然实验前后 2 组被试都出现了 fNIRS 的 Oxy-Hb 浓度增加, 但真刺激组在 tPCS 作用下大脑运动皮层 Oxy-Hb 浓度增加更为明显。有研究表明, Oxy-Hb 浓度下降可能意味着神经抑制, 当被试疲劳之后会削弱脑部相关功能区的生理心理加工(Dietrich et al., 2004; Lorist et al., 2002)。tPCS 对不同 ROI 中 Oxy-Hb 含量增加的机制可能

在于体力或认知任务诱导的神经激活会导致脑皮质代谢增加, 表现为运动过程中皮质激活对血液中氧的摄取量增加。随着运动强度的增加, 单靠皮质对血氧的摄取已不能够满足皮质的需氧量, 此时需要增加局部血液供应来满足神经激活后对氧的需求(丁南, 2012)。tPCS 对被试大脑进行干预, 可以有效增强皮质脊髓兴奋性, 更有效地增加 ROI 脑区皮层的脑血流, 加强肌肉之间的协调性, 进而表现为 Oxy-Hb 浓度的增加(Benwell et al., 2005; Disanayaka et al., 2020; Jaberzadeh et al., 2015; Paul et al., 2014)。Vasquez 等(2016)研究认为, tPCS 可以通过调节神经元之间的突触连接, 在一定时间内增强神经通信和神经网络间信号传输的能力。这也可能解释 tPCS 干预后, 促进了大脑对资源的有效分布, 协调大脑血液向运动皮层与前额叶皮质等的流动, 也增强了与被试所进行的任务有关的脑区之间的相互连接。

本研究局限主要有: 1) 被试为大学生运动员, 其运动能力、训练年限以及训练负荷等均与专业运动员存在差距, tPCS 对专业运动员的脑区激活情况是否与之相同仍需进一步研究验证; 2) 尚不清楚 tPCS 对被试的影响是否存在长期效应, 下一步可以采取长期训练下监测运动员大脑激活状态的变化, 以更加全面科学的理解 tPCS 的作用机制并应用到运动领域。

4 结论

被试对经颅脉冲电刺激仪使用感评价较好, 无不良反应; tPCS 可以有效降低被试主观疲劳感; tPCS 能够选择性增加不同脑区的 Oxy-Hb 含量。

被试完成体力训练任务后接受 tPCS 干预, 大脑运动皮层被显著激活; 完成认知训练任务后接受 tPCS 干预, 大脑额极区、Broca 三角部、背外侧前额叶皮质被显著激活; 完成体力训练任务后接受 tPCS 干预, 大脑体感联合皮层、运动皮层、前辅助运动区、前额叶皮质被显著激活。

参考文献:

- 卞秀玲, 王雅娜, 王开元, 等, 2018. 经颅直流电刺激技术及其在提升运动表现中的应用[J]. 体育科学, 38(5): 66-72.
- 丁南, 2012. 运用近红外光谱技术对递增负荷运动脑血流动力学变化特点的研究[D]. 北京: 首都体育学院.
- 何志金, 彭莉, 易东平, 等, 2021. 基于 RPE 值判定运动健身强度的实证研究[J]. 中国体育科技, 52(4): 63-67.
- 姜劲, 焦学军, 潘津津, 等, 2015. 功能性近红外技术的运动伪迹和生理干扰处理方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 52(10): 53-62.
- 林无忌, 林静远, 李晓梦, 等, 2021. 认知疲劳效应对内隐记忆与外显记忆的影响[J]. 心理科学, 42(6): 1282-1288.
- 刘佳宁, 王莹莹, 周宇, 等, 2020. 不同运动方式对甲基苯丙胺依赖性食物奖赏功能的改善作用: 一项近红外功能成像研究[J]. 中国体育科技, 56(11): 65-70.
- 陶坚, 徐杰, 2014. 大学生间歇跑运动中能量代谢特征[J]. 郑州大学学报, 49(3): 403-406.

- 王碧天, 2017. 基于虚拟现实和近红外脑氧信号的驾驶员脑功能评估技术研究[D]. 济南: 山东大学.
- 王建凯, 吴方芳, 狄雅政, 等, 2020. 经颅直流电刺激对注意力广度的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 60(12): 999-1006.
- 王开元, 刘宇, 2019. 科技助力奥运: 新技术与挑战[J]. 中国体育科技, 55(1): 5-12.
- 王莉, 桑林琼, 张晔, 等, 2019. 工作记忆任务的近红外脑功能成像研究[J]. 第三军医大学学报, 41(21): 2061-2068.
- 夏忠梁, 2014. 儿童动作技能学习中背景干扰效应的研究[J]. 体育科学, 34(10): 39-51, 66.
- 杨桂芬, 张云亭, 张权, 等, 2007. 前额叶皮层在数字工作记忆维持中的作用: 事件相关fMRI研究[J]. 实用放射学杂志, 23(12): 1588-1591.
- ALON G, YUNGER D A, SHULMAN L M, et al., 2012. Safety and immediate effect of noninvasive transcranial pulsed current stimulation on gait and balance in Parkinson disease[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 26(9): 1089-1095.
- BENWELL N M, BYRNES M L, MASTAGLIA F L, et al., 2005. Primary sensorimotor cortex activation with task-performance after fatiguing hand exercise[J]. *Exp Brain Res*, 167(2): 160-164.
- BORG G, 1988. Borg's Perceived Exertion and Pain Scales [M]. Champaign: Human Kinetics.
- CESPÓN J, RODELLA C, MINIUSI C, et al., 2019. Behavioural and electrophysiological modulations induced by transcranial direct current stimulation in healthy elderly and Alzheimer's disease patients: A pilot study[J]. *Clin Neurophysiol*, 130(11): 2038-2052.
- CHANG H, KIM K, JUNG Y J, et al., 2017. Effects of acute high-intensity resistance exercise on cognitive function and oxygenation in prefrontal cortex[J]. *J Exerc Nutrition Biochem*, 21(2): 1-8.
- CLARK E V, WARD N S, KUPPUSWAMY A, 2016. Prior physical exertion modulates allocentric distance perception: A demonstration of task-irrelevant cross-modal transfer[J]. *Exp Brain Res*, 234(8): 2363-2367.
- COOPER R J, JULIETTE S, LOUIS G, et al., 2012. A systematic comparison of motion artifact correction techniques for functional near-infrared spectroscopy[J]. *Front Neurosci*, doi: 10.3389/fnins.2012.00147.
- DIETRICH A, 2003. Functional neuroanatomy of altered states of consciousness: The transient hypofrontality hypothesis[J]. *Conscious Cogn*, 12(2): 231-256.
- DIETRICH A, SPARLING P B, 2004. Endurance exercise selectively impairs prefrontal-dependent cognition[J]. *Brain Cogn*, 55(3): 516-524.
- DISSANAYAKA T, ZOGHI M, FARRELL M, et al., 2020. The effects of a single-session cathodal transcranial pulsed current stimulation on corticospinal excitability: A randomized sham-controlled double-blinded study[J]. *Eur J Neurosci*, 52(12): 4908-4922.
- FONTES E B, OKANO A H, GUIO F D, et al., 2015. Brain activity and perceived exertion during cycling exercise: An fMRI study[J]. *Br J Sports Med*, 49(8): 556-560.
- FUDIN N A, KHADARTSEV A A, MOSKVIN S V, 2019. Transcranial electrostimulation and serotonin laser phoresis in the athletes experiencing a combined effect of fatigue and psycho-emotional stress[J]. *Voprosy Kurortol Fiz Kult*, 96(1): 37-42.
- GIBSON A, BADEN D A, LAMBERT M I, et al., 2003. The conscious perception of the sensation of fatigue[J]. *Sports Med*, 33(3): 167-176.
- GIULIO C, DANIELE F, TIPTON C M, 2006. Angelo Mosso and muscular fatigue: 116 years after the first congress of physiologists: IUPS commemoration[J]. *Adv Physiol Educ*, 30(2): 51-57.
- HASHEMIRAD F, ZOGHI M, FITZGERALD P B, et al., 2017. Reliability of motor evoked potentials induced by transcranial magnetic stimulation: The effects of initial motor evoked potentials removal[J]. *Basic Clin Neurosci*, 8(1): 43-50.
- ISHII A, MATSUO T, NAKAMURA C, et al., 2019. Decreased alpha-band oscillatory brain activity prior to movement initiated by perception of fatigue sensation[J]. *Sci Rep*, doi: 10.1038/s41598-019-40605-7.
- JABERZADEH S, BASTANI A, ZOGHI M, et al., 2015. Anodal transcranial pulsed current stimulation: The effects of pulse duration on corticospinal excitability[J]. *PLoS One*, 10(7): e0131779.
- KHAN R A, NASEER N, QURESHI N K, et al., 2018. fNIRS-based neurobotic interface for gait rehabilitation[J]. *J Neuroeng Rehabil*, doi: 10.1186/s12984-018-0346-2.
- KIRSCH D L, SMITH R B, 2000. The use of cranial electrotherapy stimulation in the management of chronic pain: A review [J]. *Neurorehabilitation*, 14(2): 85-94.
- KLAASSEN E B, DE GROOT R H M, EVERS E A T, et al., 2013. Cortisol and induced cognitive fatigue: Effects on memory activation in healthy males[J]. *Biol Psychol*, 94(1): 167-174.
- KLAASSEN E B, SARAH P, EVERS E, et al., 2016. Young and middle-aged schoolteachers differ in the neural correlates of memory encoding and cognitive fatigue: A functional MRI study[J]. *Front Hum Neurosci*, doi: 10.3389/fnhum.2016.00148.
- LEBEDEV V P, KOVALEVSKII A V, GAZEEVA I V, et al., 2001. Noninvasive transcranial electrostimulation of the brain endorphinergic structures: Effects on human fatigue and related psychophysiological indices[J]. *Hum Physiol*, 27(2): 143-154.
- LEBEDEV V P, MALYGIN A V, KOVALEVSKI A V, et al., 2002. Devices for noninvasive transcranial electrostimulation of the brain endorphinergic system: Application for improvement of human psycho-physiological status[J]. *Artif Organs*, 26(3): 248-251.
- LIU J Z, DAI T H, SAHGAL V, et al., 2002. Nonlinear cortical modulation of muscle fatigue: A functional MRI study[J]. *Brain Res*, 957(2): 320-329.
- LORIST M M, KERNELL D, MEIJMAN T F, et al., 2002. Motor fatigue and cognitive task performance in humans[J]. *J Physiol*, 545(1): 313-319.
- MARCEGLIA S, MRAKIC-SPOSTA S, ROSA M, et al., 2016. Transcranial direct current stimulation modulates cortical neuronal activity in Alzheimer's Disease[J]. *Front Neurosci*, doi: 10.3389/fnins.2016.00134.
- MILLER E K, 2007. *The Prefrontal Cortex: Categories, Concepts, and Cognitive Control* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer.
- MORALES-QUEZADA L, COSMO C, CARVALHO S, et al., 2015. Cognitive effects and autonomic responses to transcranial pulsed current stimulation[J]. *Exp Brain Res*, 233(3): 701-709.
- MOUSA R F, AL-HAKEIM H K, ALHAIDERI A, et al., 2021. Chronic fatigue syndrome and fibromyalgia-like symptoms are an integral component of the phenome of schizophrenia: Neuro-immune and

- opioid system correlates[J]. *Metab Brain Dis*, 36(Suppl 3): 169-183.
- NASEER N, HONG K S, 2015. fNIRS-based brain-computer interfaces: A review[J]. *Front Hum Neurosci*, doi: 10.3389/fnhum.2015.00003.
- NIELSEN J B, 2002. Motoneuronal drive during human walking [J]. *Brain Res Rev*, 40(1-3): 192-201.
- PAUL B, FITZGERALD, 2014. Transcranial pulsed current stimulation: A new way forward?[J]. *Clin Neurophysiol*, 125(2): 217-219.
- SÄISÄNEN L, MÄÄTTÄ S, JULKUNEN P, et al., 2019. Functional and structural asymmetry in primary motor cortex in asperger syndrome: A navigated TMS and imaging study [J]. *Brain Topogr*, 32(3):504-518.
- SHIBUSAWA M, TAKEDA T, NAKAJIMA K, et al., 2010. Functional near-infrared spectroscopy study on primary motor and somatosensory cortex response to biting and finger clenching[J]. *Adv Exp Med Biol*, 662: 485-490.
- SHIBUYA K, KUBOYAMA N, 2007. Human motor cortex oxygenation during exhaustive pinching task [J]. *Brain Res*, 1156(2007): 120-124.
- SHIBUYA K, TACHI M, 2006. Oxygenation in the motor cortex during exhaustive pinching exercise[J]. *Respir Physiol Neurobiol*, 153(3): 261-266.
- SWART J, LINDSAY T R, LAMBERT M I, et al., 2012. Perceptual cues in the regulation of exercise performance: Physical sensations of exercise and awareness of effort interact as separate cues[J]. *Brit J Sports Med*, 46(1): 42-48.
- THORNTON J M, GUZ A, MURPHY K, et al., 2001. Identification of higher brain centres that may encode the cardiorespiratory response to exercise in humans[J]. *J Physiol*, 533(3):823-836.
- VASQUEZ A, MALAVERA A, DORUK D, et al., 2016. Duration dependent effects of transcranial pulsed current stimulation (tPCS) indexed by electroencephalography [J]. *Neuromodulation*, 19(7): 679-688.

Effects of Transcranial Pulsed Current Stimulation on Fatigue and Local Blood Flow in Cerebral Cortex after Different Training Tasks

SHEN Yangyang, LIU Jian, WU Qingchang, LOU Hu*

Institute of Sport Science, Nantong University, Nantong 226019, China

Abstract: Objective: To investigate the effect of transcranial pulsed current stimulation (tPCS) on sensation of athletes' fatigue and ROI blood flow in cerebral cortex after completing physical tasks, cognitive tasks and mixed tasks. Methods: 24 college athletes were randomly divided into active stimulation group (current intensity: 1.5 mA, duration: 15 min) and sham stimulation group, the questionnaire were conducted before and after stimulation to collect mental fatigue and fNIRS data. Results: The RPE results of the active stimulation group were significantly better than those of the sham stimulation group ($P < 0.05$). In the active stimulation group, the channels were significantly activated after physical training were ch3, ch5 and ch8, and ch2, ch6, ch9, ch10, ch14, ch18, ch21 were activated after cognitive training, and ch1, ch2, ch6, ch12, ch13, ch17, ch22 were activated after mixed training. Conclusions: tPCS can effectively reduce the subjective evaluation of fatigue, and it can selectively increase the cerebral blood oxygen flow in task related areas. Specifically, tPCS can significantly activate the cerebral motor cortex after physical task; after cognitive task, tPCS can significantly activate the frontal polar area, Broca pars triangularis area and dorsolateral prefrontal cortex. In addition, it can significantly activate the cerebral somatosensory cortex, motor cortex, supplementary motor area and prefrontal cortex after mixed task.

Keywords: athletes; sensation of fatigue; tPCS; noninvasive brain stimulation; fNIRS

