

DOI:10.16781/j.0258-879x.2021.02.0197

· 论 著 ·

## 重复经颅直流电刺激与舒尔特方格训练对健康大学生注意力的提升效果

卢宏亮, 刘权辉, 朱霞\*

空军军医大学军事医学心理学系军事心理学教研室, 西安 710032

**[摘要]** **目的** 探讨重复经颅直流电刺激与舒尔特方格训练对健康大学生注意力的提升效果。**方法** 采用两因素混合实验设计(时间×组别), 选择60名健康大学生随机分为刺激组(被试接受重复经颅直流电刺激,  $n=21$ )、训练组(接受舒尔特方格注意力训练,  $n=21$ )、对照组(予假刺激干预,  $n=18$ )。3组被试均完成了为期4周共计12次干预, 采用简单数字舒尔特方格任务、注意转换任务、色词 Stroop 任务动态评估被试的注意力提升效果。**结果** 刺激组与训练组被试在简单数字舒尔特方格任务和注意转换任务中的成绩均较基线水平提升( $P < 0.05$ ), 其中刺激组成绩于第1周发生显著变化, 而训练组则在第2周以后才出现有效注意力提升; 3组色词 Stroop 任务成绩均未发生变化。**结论** 长期舒尔特方格注意力训练与经颅直流电刺激均能促进健康大学生的注意力提升, 而经颅直流电刺激下注意力的提升发生更早。

**[关键词]** 经颅直流电刺激; 舒尔特方格; 注意力; 训练

**[中图分类号]** R 395.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2021)02-0197-06

### Enhancing effect of repetitive transcranial direct current stimulation and Schulte grid training on attention of healthy undergraduates

LU Hong-liang, LIU Quan-hui, ZHU Xia\*

Department of Military Psychology, Faculty of Medical Psychology, Air Force Medical University, Xi'an 710032, Shaanxi, China

**[Abstract]** **Objective** To explore the enhancing effect of repetitive transcranial direct current stimulation (tDCS) and Schulte grid training on attention of healthy undergraduates. **Methods** A two-factor mixed experimental design (time×group) was adopted in this study. Sixty healthy undergraduates were randomly assigned to anodal group (receiving repetitive tDCS intervention,  $n=21$ ), training group (receiving Schulte grid training,  $n=21$ ) and control group (receiving sham stimulation,  $n=18$ ). The participants in the three groups received a total of 12 interventions over a 4-week period. Simple digital Schulte grid task, shifting attention task and color-word Stroop task were used to assess the attention enhancing effect. **Results** In the anodal group and training group, the scores of the participants in simple digital Schulte grid task and shifting attention task were significantly higher than the baseline (all  $P < 0.05$ ); significant changes in the stimulation group were observed in the first week, while the training group showed effective enhancements after the second weeks. There was no significant change in the score of Stroop task in the three groups. **Conclusion** Both long-term Schulte grid attention training and tDCS can enhance the attention of healthy undergraduates, and the enhancement on attention induced by tDCS is earlier.

**[Key words]** transcranial direct current stimulation; Schulte grid; attention; training

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2021, 42(2): 197-202]

随着科学技术的飞速发展, 一些特殊岗位对于个体的警觉、注意分配、注意集中等注意力水平提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>。通常, 注意力的提升是通过在一段时间内规律、反复的注意力训练来实现的。舒尔特方格是一种经典的注意力训练工具, 操作简单, 适应于不同年龄段的人群, 通过多次的舒尔特方格训练能够有效提升注意力<sup>[2-4]</sup>。然而, 舒

尔特方格注意力训练过程需要受训者消耗较多的认知资源, 保持较高的认知动机。寻找一种简单、经济、高效的干预方法替代注意力训练, 是提升注意力水平、保证工作效率的另一种有效途径。

经颅直流电刺激是一种国际上公认的无创脑刺激技术, 该技术通过对特定大脑皮质持续输送低强度( $\leq 2$  mA)直流电以达到改变静息电位、促

[收稿日期] 2020-07-28 [接受日期] 2020-11-18

[基金项目] 军队“十三五”重大项目(AWS17J012)。Supported by “13<sup>th</sup> Five-Year” Major Project of PLA (AWS17J012).

[作者简介] 卢宏亮, 硕士生. E-mail: 2639395572@qq.com

\*通信作者( Corresponding author ). Tel: 029-84712517, E-mail: zhuxia@fmmu.edu.cn

进认知能力提升的目的<sup>[5]</sup>。经颅直流电刺激作为一种新型有效、简单便捷的无创脑刺激手段,已经在改善患者临床症状、提升健康人认知等领域有了突飞猛进的发展<sup>[6-7]</sup>,具有在特殊任务中发挥重要作用的潜能<sup>[8]</sup>。既往研究发现,短期单次的经颅直流电刺激能够改变大脑多巴胺的释放,提升健康被试的注意力水平<sup>[9]</sup>。相比短期经颅直流电刺激,长期重复的经颅直流电刺激干预则可以产生累积效果<sup>[10]</sup>,然而目前关于重复经颅直流电刺激能否有效提升注意力的研究证据十分欠缺。本研究分别采用重复经颅直流电刺激与舒尔特方格注意力训练对某大学本科生进行干预,探讨不同干预阶段下不同干预方案对被试注意力的影响,为下一步制订注意力提升方案提供依据。

### 1 对象和方法

1.1 对象 招募64名某大学本科生作为健康志愿者,筛查后有60名符合入组标准并愿意参加本试验。入组被试均须满足以下条件:(1)18~24岁的在校本科生;(2)右利手,听力正常,视力或矫正视力正常;(3)无精神病和头部外伤史;(4)无其他可能影响试验的躯体及心理疾病;(5)近3个月未服用过抗精神病药物;(6)近1个月未参加过类似试验。通过简单随机化分为3组:刺激组21人,男11人,女10人,年龄为18~26岁,平均年龄为(21.57±2.04)岁;训练组21人,男12人,女9人,年龄为18~24岁,平均年龄为(21.14±2.03)岁;对照组18人,男9人,女9人,

年龄为19~23岁,平均年龄为(20.67±1.28)岁。本研究通过空军军医大学唐都医院伦理委员会审批(NCT02420470)。试验前所有被试均被详细告知了试验过程中可能存在的潜在风险,填写了知情同意书,并于试验结束后得到一定酬劳。

1.2 经颅直流电刺激与参数设置 采用美国Soterix Medical公司的高精度经颅直流电刺激设备(型号1300A&4×1-C3A)对被试实施经颅直流电刺激干预。高精度直流电刺激比普通电刺激更为精准,能准确地向某个目标脑区输送电流。既往研究表明,刺激左侧背外侧前额叶(left dorsolateral prefrontal cortex, LDLPFC)能够提升注意力<sup>[11]</sup>。根据国际10~20系统进行电极定位,本研究选取F3作为阳极电极位点,阴极位点分别为AF3、F1、F5与FC3。同时,我们在电刺激设备自带的高精度探索(high definition explore, HD-Explore)软件中输入刺激强度、刺激位点等信息,通过计算机模拟产生的电流分布评估刺激的精确性,可适当调整刺激参数以确保干预效果最佳(图1)。国际上一般认为安全有效的刺激电流不高于2 mA,根据被试的耐受情况,本研究的电流强度设置为1.5 mA,对被试进行多次高精度直流电刺激干预(每次20 min)是科学和安全的<sup>[12]</sup>。对于刺激组,每次干预前于刺激位点注入导电膏以降低电阻,减轻被试疼痛;对照组使用设备自带的假刺激模式,该模式会在刺激前30 s内增加电流至1.5 mA,随即降为0 mA,给被试带来皮肤上的电流感,但是并无持续电流刺激。除了电流输送模式不同,两组的干预时间与干预步骤均一致。

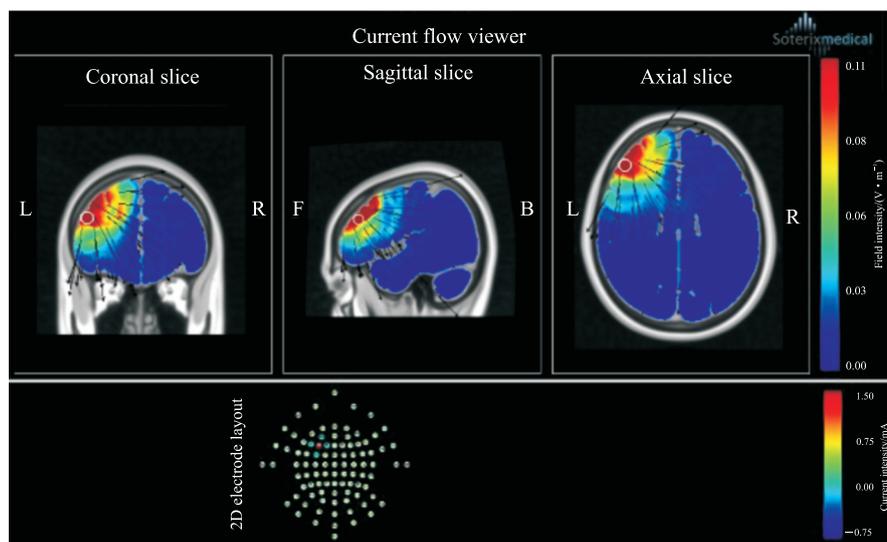


图1 高精度探索软件中生成的电极排布及电流强度理论模拟图

Fig 1 Electrode layout and theoretical current intensity generated in high definition explore software

L: Left; R: Right; F: Front; B: Back.

1.3 舒尔特方格注意力训练 本研究采用平板电脑版本的复杂数字舒尔特方格作为训练组的注意力训练任务。任务开始时会在屏幕中央呈现1个5×5的网格, 1~25整数数字随机分布在25个小方格内, 被试需要在最短时间内按照从小到大的顺序从“1”开始点击数字, 直至“25”停止测试。为了提高难度, 每点击1次后所有方格中的数字会随机重新分布。训练组被试每次训练时完成复杂数字舒尔特方格20 min, 不计次数。

#### 1.4 注意力评估

1.4.1 舒尔特方格测试 采用平板电脑版本的简单数字舒尔特方格测试注意广度与注意集中性。与复杂数字舒尔特方格任务不同, 简单数字舒尔特方格任务每次点击数字后方格中的数字不会随机重新分布。为了提升测试信度, 每次测试时要求被试完成2次简单数字舒尔特方格任务并记录完成时间, 取平均值。

1.4.2 注意转换任务 刺激物有红色圆圈、红色方块, 蓝色圆圈、蓝色方块4种类型。每个试次会随机出现3个刺激物, 要求被试比较屏幕下方的2个目标刺激和屏幕上方的刺激物, 并根据随机呈现的规则(形状或颜色)对目标刺激进行快速选择: 出现“形状”时选择形状匹配的目标刺激物, 出现“颜色”时选择色彩匹配的目标刺激物。测试持续时间为3 min。记录反应时和错误率。

1.4.3 色词 Stroop 任务 作为选择性注意力的评估方法, 该任务有3种刺激类型(中性、一致、不一致), 目标刺激物为屏幕中央随机呈现的汉字或字母(中性刺激呈现英文字母“X”)。目标刺激物被赋予不同颜色(红色、绿色和黄色)并以随机顺序出现。被试需要对目标刺激物的颜色进行快速判断。数据处理时以 Stroop 作用, 即以不一致条件下的反应时(错误率)减去一致条件下的反应时(错误率)为指标进行分析。

1.5 试验流程 所有被试在试验正式开始前完成

1次注意力评估, 作为基线水平。随后, 刺激组、训练组、对照组被试分别采用经颅直流电刺激、复杂数字舒尔特方格训练、假刺激进行为期4周共12次的干预。考虑到休息对维持脑皮质长时程增强十分重要<sup>[13]</sup>, 同时为了兼顾被试的日常课程安排, 要求被试每周进行3次干预, 每次20 min, 2次干预之间至少间隔1 d, 以确保干预效果最显著。为观察干预效果随时间的动态变化, 要求被试在每个干预周的最后1 d进行注意力评估, 干预与评估之间至少间隔1 d。所有被试均完成了12次干预和5次注意力评估, 刺激组被试在试验中耐受良好。

1.6 统计学处理 所有被试均完成试验, 无中途退出者。采用 SPSS 25.0 软件进行数据分析。呈正态分布的计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示, 组间比较采用混合设计方差分析(若不满足“球对称”假设时采用 Greenhouse-Geisser 方法对自由度进行校正), 两两比较采用 Bonferroni 法; 呈偏态分布的计量资料以中位数(范围)表示, 组间比较采用 Friedman 秩和检验。检验水准( $\alpha$ )为0.05。

## 2 结果

2.1 简单数字舒尔特方格任务成绩 以分组(刺激组、训练组和对照组)为组间因素、时间(5次注意力评估)为组内因素, 对3组被试的简单数字舒尔特方格成绩进行3×5混合设计方差分析。分析结果显示, 时间主效应有统计学意义[经 Greenhouse-Geisser 校正后,  $F(2.20, 125.37) = 41.20, P < 0.01$ ], 两因素交互效应有统计学意义[经 Greenhouse-Geisser 校正后,  $F(4.40, 125.37) = 3.59, P < 0.01$ ], 组间效应无统计学意义( $P > 0.05$ )。进一步的简单效应分析(经 Bonferroni 校正)结果显示, 电刺激组(第1周~第4周)和训练组(第2周~第4周)干预后任务用时与基线水平相比均缩短( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ), 而对照组的的成绩与基线水平相比差异无统计学意义。见表1。

表1 3组被试简单数字舒尔特方格任务用时

Tab 1 Duration of simple digital schulte grid task in subjects of three groups

Group	Baseline	Week 1	Week 2	Week 3	$s, \bar{x} \pm s$
					Week 4
Anodal $n=21$	33.16±12.69	28.58±6.46*	24.78±4.66**	24.63±5.10**	21.71±3.32**
Training $n=21$	33.71±8.85	30.02±6.98	25.02±4.70**	23.89±4.68**	22.12±4.11**
Control $n=18$	31.83±7.00	29.40±6.82	29.37±6.34	27.44±5.16	28.04±5.51

\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  vs baseline of the same group.

2.2 注意转换任务成绩 以分组(刺激组、训练组和对照组)为组间因素、时间(5次注意力评估)为组内因素,对3组被试的注意转换任务成绩进行了3×5混合设计方差分析。对于反应时,分析结果显示时间主效应有统计学意义[经Greenhouse-Geisser校正后, $F(2.43, 138.63) = 43.74, P < 0.01$ ],两因素交互效应有统计学意义[经Greenhouse-Geisser校正后, $F(4.86, 138.63) = 6.34, P < 0.01$ ],组间效应无统计学意义[ $F(2, 57) = 1.42, P = 0.25$ ]。进一步的简单效应分析(经Bonferroni校正)结果显示,电刺激组(第1周~

第4周)和训练组(第3周~第4周)干预后反应时与基线水平相比均缩短( $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ ),而对照组的反应时变化差异无统计学意义。对于错误率,混合设计方差分析结果显示仅时间主效应有统计学意义(经Greenhouse-Geisser校正后, $F(3.18, 181.04) = 3.46, P < 0.05$ ),组间主效应及交互效应均无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ )。进一步的时间主效应分析(经Bonferroni校正)结果显示,第3周错误率(不考虑组间因素)比第1周上升( $P < 0.05$ )。见表2。

表2 3组被试注意转换任务成绩

Tab 2 Results of shifting attention task in subjects of three groups

Group	$\bar{x} \pm s$				
	Baseline	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Anodal $n=21$					
Reaction time/ms	876.98 ± 117.51	817.86 ± 100.97**	772.10 ± 87.36**	738.77 ± 73.14**	686.51 ± 79.86**
Error rate/%	5.49 ± 3.40	5.70 ± 3.50	7.98 ± 4.57	6.95 ± 3.65	8.23 ± 4.70
Training $n=21$					
Reaction time/ms	825.11 ± 101.72	817.34 ± 97.81	793.14 ± 88.16	758.57 ± 65.46*	739.10 ± 64.35**
Error rate/%	6.73 ± 3.90	6.05 ± 3.63	6.93 ± 4.36	8.16 ± 3.15	7.13 ± 3.70
Control $n=18$					
Reaction time/ms	852.40 ± 43.49	815.37 ± 74.98	808.45 ± 56.18	802.51 ± 81.37	796.09 ± 75.47
Error rate/%	6.19 ± 3.10	5.37 ± 3.66	6.34 ± 3.95	6.12 ± 3.09	6.15 ± 3.03

\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$  vs baseline of the same group.

2.3 色词 Stroop 任务成绩 使用Friedman秩和检验分别对3组被试的色词Stroop任务成绩进行分析。对于反应时Stroop作用,分析结果显示刺激组、训练组、对照组被试5次注意力评估的成绩变化差异均

无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ );对于错误率Stroop作用,分析结果显示刺激组、训练组、对照组被试5次注意力评估的成绩变化差异亦均无统计学意义( $P$ 均 $> 0.05$ )。见表3。

表3 3组被试色词 Stroop 任务成绩

Tab 3 Results of color-word Stroop task in subjects of three groups

Group	Median (range)				
	Baseline	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Anodal $n=21$					
Reaction time/ms	68.56 (-9.42-145.76)	45.19 (-42.24-196.63)	66.85 (-11.85-118.67)	32.87 (-5.82-100.70)	32.29 (-6.24-89.61)
Error rate/%	2.00 (-2.00-7.67)	1.67 (-7.67-11.00)	2.00 (-7.33-9.67)	-0.33 (-5.67-7.67)	0.00 (-9.33-7.33)
Training $n=21$					
Reaction time/ms	76.70 (-2.11-170.24)	43.68 (1.56-197.07)	54.46 (7.65-156.39)	32.59 (-22.11-194.05)	56.48 (-2.21-121.89)
Error rate/%	0.00 (-5.67-16.33)	3.67 (-3.67-13.33)	0.00 (-3.67-20.33)	0.00 (-5.67-7.67)	0.00 (-5.67-3.67)
Control $n=18$					
Reaction time/ms	74.49 (2.59-207.92)	64.71 (-6.67-170.87)	63.32 (25.15-114.09)	50.79 (11.04-127.91)	67.85 (0.68-143.50)
Error rate/%	2.00 (-2.00-15.00)	1.67 (-4.00-7.67)	0.17 (-3.67-7.67)	1.83 (-4.00-13.00)	1.67 (-5.67-7.67)

### 3 讨论

本研究结果显示,相比对照组,舒尔特方格注意力训练有效提高了健康大学生的注意转换、注意广度与注意集中。重复经颅直流电刺激对健康大学生注意力的各个维度也有积极影响,这与既往研究结论<sup>[14-17]</sup>相似。值得注意的是,舒尔特方格注意力训练与经颅直流电刺激对选择性注意力均无显著影响,这可能与测试任务较为简单而导致的天花板效应有关。本研究还发现注意转换任务的错误率在整体上有不同程度的上升,但仅第3周与第1周之间差异有统计学意义,我们推测这种变化可能与学习效应造成被试后期答题时的厌倦与疲劳有关。

作为新兴的无创脑干预技术,经颅直流电刺激对于注意力的有效提升发生在干预的前期,早于舒尔特方格注意力训练。我们推测这种变化与经颅直流电刺激向大脑皮质输送低强度电流、改变相应大脑皮质兴奋状态、更加有效地影响行为等密切相关<sup>[18]</sup>。因此,对于一些需要通过短期干预提升注意力的特殊岗位,如执行紧急任务前,重复经颅直流电刺激比舒尔特方格注意力训练更具优势。以往研究认为脑疲劳对注意力有负面影响<sup>[19]</sup>。由于经颅直流电刺激在干预过程中极少占用被试额外的认知资源,极大减少了被试脑疲劳的发生,更容易达到提升注意力的效果。总体来看,长期的舒尔特方格注意力训练与经颅直流电刺激均能有效提升健康大学生的注意力,但是短期的干预条件下经颅直流电刺激对注意力的提升效果更为明显。

研究认为,较高的学习动机与突出的学业成就关系密切<sup>[20]</sup>。传统的舒尔特方格注意力训练若要取得理想效果,需要受试者全程保持较高的训练动机和认知能力才能实现。而经颅直流电刺激在干预过程中被试不用做大量的训练,对训练动机和认知能力的要求不高。在实际应用过程中,需使用2种干预手段来提高注意力、达到效能提升效果,舒尔特方格注意力训练更适合于动机较高、愿意付出较多认知能力的群体;经颅直流电刺激则适合对无创脑刺激技术有较低抵触心理的群体。但以上观点仅是我们结合本试验结果进行的推测,还需要在未来的研究中进行验证,如在试验中增加对被试动机的评估、选择不同的注意力训练方法等。

非侵入性无创脑刺激技术在最近几年飞速发展。本研究中采用的经颅直流电刺激相比经颅磁刺激不良反应少,设备价格低廉,容易操作。经颅磁刺激还有增加被试癫痫发作的风险<sup>[21-22]</sup>,但是该技术出现较早,已形成一套成熟的刺激方案与干预体系,对于目标脑区具有更高的特异性<sup>[23]</sup>。研究发现经颅磁刺激能够提升健康人群的认知控制能力<sup>[24]</sup>,所以使用经颅磁刺激或经颅磁刺激与经颅直流电刺激相结合的方法对注意力提升进行研究将会非常有趣。本研究中被试均为在读大学生,认知能力较高,所以组间比较很容易出现假阴性,以后的研究应该选择不同学历和年龄段的人群进行评估;既往研究发现经颅直流电刺激与注意力训练结合使用对工作记忆的提升更为有效<sup>[25]</sup>,未来的研究可以通过将注意力训练与经颅直流电刺激结合以最大化干预效果,同时借助功能MRI、脑电图及功能近红外光谱技术对脑机制进行探讨,以更好地理解不同的注意力提升方案如何影响个体的行为学改变。

综上所述,本研究证明了重复经颅直流电刺激与舒尔特方格注意力训练对健康大学生注意力的提升均有积极影响,为注意力提升方案的制订提供了依据与思路。与舒尔特方格注意力训练的长期效果相比,经颅直流电刺激在短期、长期干预中均能有效提升注意力,表明经颅直流电刺激能够替代传统的舒尔特方格注意力训练,并且在某些需要短期、少次干预来提升注意力的需求中似乎有更大的潜力。

### [参考文献]

- [1] 黄俊翔,戴红,朱志杰,武圣君.军用无人机操控员认知能力及训练方法探析[J].人民军医,2019,62:215-217.
- [2] 小雅.孩子注意力训练法:舒尔特方格法[J].中华家教,2011(9):36.
- [3] LI M, FANG Q, LI J, ZHENG X, TAO J, YAN X, et al. The effect of Chinese traditional exercise-Baduanjin on physical and psychological well-being of college students: a randomized controlled trial[J/OL]. PLoS One, 2015, 10: e0130544. DOI: 10.1371/journal.pone.0130544.
- [4] 张政,张瑞,聂民坤,班岚.基于脑电波的注意力训练研究[J].数字通信世界,2019(4):272.
- [5] SHIN Y I, FOERSTER Á, NITSCHKE M A. Transcranial direct current stimulation (tDCS)—application in neuropsychology[J]. Neuropsychologia, 2015, 69: 154-175.

- [6] CHASE H W, BOUDEWYN M A, CARTER C S, PHILLIPS M L. Transcranial direct current stimulation: a roadmap for research, from mechanism of action to clinical implementation[J]. *Mol Psychiatry*, 2020, 25: 397-407.
- [7] FILMER H L, DUX P E, MATTINGLEY J B. Applications of transcranial direct current stimulation for understanding brain function[J]. *Trends Neurosci*, 2014, 37: 742-753.
- [8] DAVIS S E, SMITH G A. Transcranial direct current stimulation use in warfighting: benefits, risks, and future prospects[J/OL]. *Front Human Neurosci*, 2019, 13: 114. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00114.
- [9] FUKAI M, BUNAI T, HIROSAWA T, KIKUCHI M, ITO S, MINABE Y, et al. Endogenous dopamine release under transcranial direct-current stimulation governs enhanced attention: a study with positron emission tomography[J/OL]. *Transl Psychiatry*, 2019, 9: 115. DOI: 10.1038/s41398-019-0443-4.
- [10] BESSON P, PERREY S, TEO W P, MUTHALIB M. Commentary: cumulative effects of anodal and priming cathodal tDCS on pegboard test performance and motor cortical excitability[J/OL]. *Front Hum Neurosci*, 2016, 10: 70. DOI: 10.3389/fnhum.2016.00070.
- [11] MILER J A, MERON D, BALDWIN D S, GARNER M. The effect of prefrontal transcranial direct current stimulation on attention network function in healthy volunteers[J]. *Neuromodulation*, 2018, 21: 355-361.
- [12] TURSKI C A, KESSLER-JONES A, CHOW C, HERMANN B, HSU D, JONES J, et al. Extended multiple-field high-definition transcranial direct current stimulation (HD-tDCS) is well tolerated and safe in healthy adults[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2017, 35: 631-642.
- [13] ROMCY-PEREIRA R, PAVLIDES C. Distinct modulatory effects of sleep on the maintenance of hippocampal and medial prefrontal cortex LTP[J]. *Eur J Neurosci*, 2004, 20: 3453-3462.
- [14] 王建凯, 吴方芳, 狄雅政, 张洁, 李翀, 季林红. 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)*, 2020, 60: 999-1006.
- [15] BORWICK C, LAL R, LIM L W, STAGG C J, AQUILI L. Dopamine depletion effects on cognitive flexibility as modulated by tDCS of the dlPFC[J]. *Brain Stimul*, 2020, 13: 105-108.
- [16] LOFTUS A M, YALCIN O, BAUGHMAN F D, VANMAN E J, HAGGER M S. The impact of transcranial direct current stimulation on inhibitory control in young adults[J/OL]. *Brain Behav*, 2015, 5: e00332. DOI: 10.1002/brb3.332.
- [17] METUKI N, SELA T, LAVIDOR M. Enhancing cognitive control components of insight problems solving by anodal tDCS of the left dorsolateral prefrontal cortex[J]. *Brain Stimul*, 2012, 5: 110-115.
- [18] JAMIL A, BATSIKADZE G, KUO H I, LABRUNA L, HASAN A, PAULUS W, et al. Systematic evaluation of the impact of stimulation intensity on neuroplastic after-effects induced by transcranial direct current stimulation[J]. *J Physiol*, 2017, 595: 1273-1288.
- [19] 范洁怡, 王亮, 宁致博, 李曦, 冯旭, 罗正学. 脑力疲劳对飞行员认知功能的影响及相关认知指标探讨[J]. *解放军医学院学报*, 2018, 39: 291-293, 302.
- [20] 张宏如, 沈烈敏. 学习动机、元认知对学业成就的影响[J]. *心理科学*, 2005, 28: 114-116.
- [21] ZAGHI S, HEINE N, FREGNI F. Brain stimulation for the treatment of pain: a review of costs, clinical effects, and mechanisms of treatment for three different central neuromodulatory approaches[J]. *J Pain Manag*, 2009, 2: 339-352.
- [22] WASSERMANN E M. Risk and safety of repetitive transcranial magnetic stimulation: report and suggested guidelines from the International Workshop on the Safety of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, June 5-7, 1996 [J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1998, 108: 1-16.
- [23] PARKIN B L, EKHTIARI H, WALSH V F. Non-invasive human brain stimulation in cognitive neuroscience: a primer[J]. *Neuron*, 2015, 87: 932-945.
- [24] LI Y, WANG L, JIA M, GUO J, WANG H, WANG M. The effects of high-frequency rTMS over the left DLPFC on cognitive control in young healthy participants[J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12: e0179430. DOI: 10.1371/journal.pone.0179430.
- [25] KE Y, WANG N, DU J, KONG L, LIU S, XU M, et al. The effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on working memory training in healthy young adults[J/OL]. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 19. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00019.

[本文编辑] 尹 茶