

经颅直流电刺激对网络成瘾大学生工作记忆能力的影响

周芮西

西南大学心理学部，重庆

收稿日期：2025年2月14日；录用日期：2025年3月25日；发布日期：2025年4月7日

摘要

相关研究发现，网络成瘾综合征会对人们造成行为与认知层面不同程度的负面影响，其中包括人的工作记忆能力。此外，当我们沉迷于某些事物时，工作记忆会变得异常脆弱，导致我们的思维和学习能力受到影响。经颅直流电刺激(tDCS)是一种非侵入性的神经调节技术，它通过不同极性的刺激来影响特定脑区的可塑性，从而提高人类的认知和记忆能力。本研究采用N-back任务作为工作记忆的测量工具，以左侧背外侧前额叶(left dorsolateral prefrontal cortex, IDLPC)为刺激靶点，将大学生分为真刺激组和伪刺激组，比较tDCS干预前后两组在不同记忆负荷(0-back, 1-back, 2-back)下的正确率和反应时，探讨经颅直流电刺激对网络成瘾者工作记忆能力的影响。结果表明，tDCS真刺激能够显著提高网络成瘾大学生的工作记忆能力(体现在正确率提高和反应时降低)，而伪刺激组则没有显著变化。研究认为左侧背外侧前额叶皮层(IDLPC)是工作记忆能力的关键脑区，可以作为tDCS干预的靶点。

关键词

经颅直流电刺激，网络成瘾，工作记忆

Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Working Memory Ability of College Students with Internet Addiction

Ruixi Zhou

Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing

Received: Feb. 14th, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 7th, 2025

Abstract

Relevant studies have found that Internet addiction syndrome can cause different degrees of negative effects on people's behavior and cognition, including people's working memory ability. In addition, when we are addicted to something, the working memory can become extremely fragile, causing our thinking and learning ability to be affected. Transcranial direct current stimulation (tDCS) is a non-invasive neuromodulation technique that enhances human cognition and memory by affecting plasticity in specific brain regions through stimulation of different polarity. In this study, using the N-back paradigm and the left dorsolateral prefrontal cortex (IDLPFC) as the stimulus target, and the college students were divided into true stimulus group and pseudo-stimulus group. To explore the effect of transcranial direct current stimulation on the working memory ability of Internet addicts by comparing the accuracy and response of the two groups under different memory loads (0-back, 1-back, 2-back) before and after tDCS intervention. The results show that tDCS true stimulation can significantly improve the working memory ability of Internet addicted college students (reflected in the improvement of correct rate and the reduction of response), while the pseudo-stimulation group has no significant change. It is suggested that the left dorsolateral prefrontal cortex (IDLPFC) is a key brain region in working memory ability and can be used as a target for tDCS intervention.

Keywords

Transcranial Direct Current Stimulation, Internet Addiction Disorder, Working Memory

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技的进步，网络日益成为我们生活、职业以及教育的一部分。最近的研究表明，对网络的过度依赖也会对个体产生许多消极的后果，一些研究者称这种现象为网络成瘾(Internet addiction disorder, IAD)。网络成瘾指的是由于长期沉迷于网络而导致的慢性心理问题，表现出对新技术的依赖性增强、戒断反应加剧以及其他成瘾性反应(刘玎, 卢宁, 2017)。尽管这种成瘾可能和赌博成瘾(目前唯一可以归类于精神障碍的行为成瘾)存在某种程度的共性，但由于尚无充分的科学依据，目前仍然只能将其纳入《精神疾患识别与统计学使用手册》第5版(DSM-5)中(American Psychiatric Association DSM-Task Force Arlington VA US, 2013)。为了更好地识别和评估IA，以及更好地采取措施来预防和治疗，我们需要更加全面地了解它的认知影响机理。相关研究表明，网络成瘾者通常表现为出现严重的认知障碍(贺金波等, 2008; 郁洪强等, 2009)，并且会更加专心地处理网络上的信息(戴坤懿等, 2011)。与此同时，网瘾者也会出现口语表达能力的下降(金璞等, 2008)，以及记忆力的衰退等(Xiong & Yao, 2010; 许汉云等, 2010)。

本研究应用非侵入性神经调控技术——经颅直流电刺激(tDCS)干预网络成瘾者，测量干预前后网瘾者在N-back任务中正确率与反应时的变化，进一步探究神经调控技术对于网络成瘾者工作记忆能力的影响。

1.1. 网络成瘾对大学生的影响

网络成瘾(IAD)已成为一种严重的精神疾病(刘苏姣, 2019)。其表现形式与传统的赌博活动相近，而且伴随时间的推移，这种疾病的发展也越来越快，它会对人们的健康造成严重的负面影响，包括：失去

正常的作息时间、精神状态的恶化、社会关系的疏离、自信的丧失、学业的困难和焦虑的加剧(侯娟等, 2018)。造成以上问题的主要原因是网络成瘾所致的认知功能变化, 主要表现为阻碍人们的学习和工作效率, 进而威胁他们的身心健康。这种危害可能会使人们的注意力、思考、交流和记忆能力受到限制, 甚至会产生负面和冲动的想法。而与网络成瘾有关的认知变化, 都与网络成瘾导致的执行功能损害有密切关系。

近年来, 科学家通过多种手段深入挖掘了网络成瘾的原理和机制, 他们的大脑受到了各种原因的直接影响, 从而导致了各种功能上的紊乱。尽管目前关于工作记忆的研究, 大多数都是针对药物成瘾者。但是, 关于网络成瘾者工作记忆的研究也表明, 与药物成瘾者相似, 网络成瘾者也会出现工作记忆能力的缺陷(Zhou et al., 2016)。比如, 与非网络成瘾者比较, 其暂时性记忆功能受影响(许汉云等, 2010), 并且, 其记忆损伤的原因, 可能是海马功能损害导致其认知功能尤其是工作记忆能力的降低(贺金波等, 2008)。

有研究者发现网络成瘾者的感知觉功能异常(贺金波等, 2012; Zhou et al., 2011), 执行控制能力受损(Dong et al., 2012; Lee et al., 2012), 除此之外, 网络成瘾者记忆中基本的认知功能也明显下降(Xiong & Yao, 2010)。研究发现, 额-顶区网络的激活对于完成工作记忆任务至关重要(Ricciardi et al., 2006), 前额叶皮层负责保持各种类型的信息, 而海马旁回则起着至关重要的编码和提取作用。然而, 网络成瘾者的海马结构和功能却出现了明显的减弱, 这说明他们的认知处理能力, 特别是工作记忆能力明显低于正常人(贺金波等, 2012; Nie et al., 2016)。

1.2. 经颅直流电刺激的定义及原理机制

经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)是一种神经调控方法, 其原理在于将1~2 mA的低压直流电从头部传递到大脑的皮质, 从而影响神经细胞的功能, 从而达到改善神经系统功能的目的。20世纪初, tDCS这一无创伤的神经调节技术受到越来越多的重视, Nitsche和Paulus的研究表明, 即使是非常微弱的直流电, 也能够通过颅骨的连接而影响到人体的神经系统, 从而引起神经元的双重反应。

阳极刺激使神经元去极化并促进动作电位的发生, 而阴极刺激使神经元超极化并抑制动作电位的产生(Takahashi, 2007)。tDCS可以通过三种不同的方式来激活细胞: 阳极刺激、阴极刺激和伪刺激。这些刺激可以通过皮层接收到的微弱电信号来影响细胞的功能, 从而导致细胞的兴奋性和活动发生变化(Brunoni et al., 2012)。tDCS的作用并不仅限于靶点所处的脑区, 而是将其推广至其它有关脑区, 加强了脑区间的连通性, 从而改善了大脑的神经功能(Kunze et al., 2016)。tDCS是一项新兴的神经刺激技术, 其安全问题亟待解决。tDCS的安全性主要是由电流强度和刺激时间决定的。根据对已有的研究展开整理后, 我们可以得知, tDCS的参数设置中, 大多数使用1~2 mA的直流电, 持续的刺激时间为15~25分钟。绝大多数研究中都没有存在副作用, 只有极少数被试在刺激下, 头皮会感受到轻微的酥麻感和瘙痒感, 而且这种不适感停留的时间很短(刘盼, 刘世文, 2011)。tDCS在精神疾病、认知康复、药物成瘾、注意缺陷多动症等领域具有广泛的应用前景, 并对健康人群的认知能力有显著的提高作用。

1.3. 经颅直流电刺激与成瘾的相关研究

早期, tDCS在成瘾领域中的应用只与吸烟成瘾有关, Fregni等人利用tDCS阳极刺激吸烟成瘾者的双侧背外侧前额叶皮层, 结果表明, 单次tDCS阳极刺激可以提升成瘾者的执行功能, 从而降低他们对于烟草线索的渴求程度(左秀芹等, 2019)。通过tDCS技术, 许多研究都试图改变被试的大脑前部的活动, 来影响他们的思维和情绪。例如, 通过tDCS技术, 成瘾者会更容易接受和理解他们的想法, 这有助于改善

他们的思维和情绪(Conti et al., 2014),能够显著降低吸烟者对有关烟草的关注程度和每天的吸烟量(Boggio et al., 2008),也能够抑制酒精依赖患者对成瘾线索的渴望(Meng et al., 2014),还能够显著降低海洛因成瘾者的渴望程度(Wang et al., 2016)。基于两种成瘾的脑机制相似之处, tDCS 也可能是通过提高患者的执行功能,从而实现快速减少患者对网瘾的渴望。最为值得关注的是,背外侧前额叶皮层(DLPFC)在成瘾认知控制的许多方面起着重要作用。调节 DLPFC 成瘾的认知神经模型表明,刺激作用不仅可以传播到其他前额叶脑区,如眶额叶皮层和腹内侧前额叶皮层,还可以传播到边缘和旁边缘结构,包括纹状体、岛叶、杏仁核和海马体(Bonelli & Cummings, 2007; Fecteau et al., 2010)。这些神经结构可能对认知系统产生影响,包括减少寻求奖励、冲动、渴望和成瘾相关的记忆和注意力偏差,以及增强抑制控制(Boggio et al., 2008)。除此之外,多项研究提供了证据,证明 DLPFC 经过 tDCS 刺激可以有效治疗各种物质和行为成瘾(Fregni et al., 2008; Sauvaget et al., 2015)。

综上所述,tDCS 对于物质成瘾和行为成瘾具有良好的干预效果,包括网络成瘾,因此,本研究采用 tDCS 干预网络成瘾者的 DLPFC 脑区。

1.4. 经颅直流电刺激与工作记忆的相关研究

过去的研究表明,通过将 N-back 任务和经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)技术有机联系起来,可以显著提升记忆的更新速率,这种提升的速率可以长期保留,而且可以被应用于更多的认知任务。tDCS 是一种非侵入性的脑刺激方法,它利用一个特殊的电极,将一股微弱而稳定的直流电传递至另一个电极,使得两个电极之间的信号交互(Farah et al., 2014),进而改善大脑的功能。

当前结果表明,阳性 tDCS 刺激可改善工作记忆测试的准确度,而对反应时无明显影响。早期 Fregni 等(2005)分别对左侧的 DLPFC 使用阳性刺激和阴性刺激,并对 M1 使用阳性刺激(Fregni et al., 2005)。对 15 位正常受试者进行 tDCS 干预,并对其进行 3-back 工作记忆测验。结果显示,作用于左侧 DLPFC 的阳性刺激,可以提高 3-back 测试的准确度,但是反应时不会发生变化,阴性刺激和伪刺激(对照组)不会对反应时和准确率产生影响,这说明电极极性和作用部位都有重要的影响,随后也有其他研究得到相同的结果(Mylius et al., 2012; Oliveira et al., 2013)。但另一些研究显示,在阳极 tDCS 刺激下,其反应时间显著缩短,其效果随电流强度的增加而增加,但其准确性并无明显改变(Teo et al., 2011)。另外,也有研究表明,阳极 tDCS 刺激对正确性和反应时都有明显的正向作用(Keeser et al., 2011)。

综上所述,目前 tDCS 影响网络成瘾者工作记忆能力的研究还处在探索时期,本研究将继续采用 tDCS 技术来对网络成瘾大学生进行干预,同时使用 N-back 实验任务范式来检测工作记忆能力的变化过程,从而确定 tDCS 对于网瘾者工作记忆能力的改善作用,同时,为 tDCS 作为干预网络成瘾的有效手段提供实证证据。

2. 研究方法

2.1. 被试

对天津某高校在校大学生发放 Young 的网络成瘾(Internet Addiction Test, IAT)量表,该量表为自评量表,包含 20 个项目,采用 5 点计分法(1 = 几乎没有, 2 = 偶尔, 3 = 有时, 4 = 经常, 5 = 总是),测试的分数范围是 20~100 分。评分标准为: 20~49 分的被试属于正常的网络使用者, 50~79 分之间的被试属于过度网络成瘾者, 80~100 分的被试属于重度网络成瘾者,量表在国内外都得到了广泛应用,有良好的信度效度,内部一致性系数为 0.90 (Rodgers et al., 2013),问卷效标效度为 0.90 (Widyanto et al., 2011)。在 G * Power 3.1 中设定 $f = 0.25$ 、 $\alpha = 0.05$ 、 $1 - \beta = 0.95$,计算出每组所需样本量为 27 人(Cohen, 1988; Faul et al., 2007)。考虑到被试流失和实验程序要求,我们选择了得分在 50 以上,也就是中、重度网络成瘾的

志愿者，其中，男 24 人，女 36 人，被试的平均年龄在 18~25 岁之间，其中，真刺激组和伪刺激组各有 30 人，入选对象的条件：(1) 没有急性、慢性病；(2) 没有精神疾病或脑部外伤的病史；(3) 没有癫痫病或癫痫病的家族史；(4) 均为右利手；(5) 具有良好的视觉或矫正视觉；(6) 参加该试验的人员必须完全自愿，实验过程中必须尊重其本人的意愿，并在实验完毕后给予被试一定的报酬。

2.2. 研究设计

实验采用 2(刺激类型：真刺激组、伪刺激组)×2(刺激时间：前测、后测)×3(记忆负荷：0-back、1-back、2-back)的混合实验设计，两组均进行前后测。前测和后测中两组均需要进行 N-back 任务，前后测中间为 tDCS 刺激干预时间，刺激靶点为左侧 DLPFC 脑区，干预时间为 20 分钟。其中，tDCS 刺激类型为被试间变量，tDCS 刺激时间、记忆负荷为被试内变量，因变量为 N-back 任务的正确率及反应时。

2.3. N-back 任务

N-back 范式是 tDCS 研究中常用的一种模型(赵鑫等, 2016)，因此，本实验采用“倒数 N 项测验(N-back)”范式(Nie et al., 2016)。它要求被试将当前呈现的刺激字母与它前面 n 个刺激字母进行比较，其中包含了 0-back ($n = 0$)、1-back ($n = 1$) 和 2-back ($n = 2$) 三个记忆水平，当 $n = 0$ 时，被试首先要记住的是首个字母的刺激，并将当前字母刺激与第一个刺激进行比较，相同按 F 键，不同按 J 键；当 $n = 1$ 时，被试需要将当前呈现的字母刺激与它前面的一个字母进行比较，相同按 F 键，不同按 J 键；当 $n = 2$ 时，被试需要将当前呈现的字母刺激与前面隔一个字母刺激的字母进行比较，相同按 F 键，不同按 J 键。

采用 E-Prime 2.0 专用软件对 N-back 范式进行设计。在实验开始前，一段提示文字会出现在屏幕的中心，当被试读懂之后可以点击空格键。实验分练习与正式两部分。在进行正式的实验之前，被试必须按照 $n = 0, 1, 2$ 的顺序进行练习，以确保被试对实验有较好的了解，并能做出正确的按键反应。正式实验由 9 个组块组成，组块包含 $n = 0, 1, 2$ 三个负荷水平的实验，每种记忆负荷都有 60 个 trial 呈现，刺激字母从 15 个字母中随机呈现，具体包括 A, D, H, I, X, K, L, M, O, P, Q, R, S, U 和 Y。在每一种记忆负荷开始之前，都会有一个 2000 ms 的提示($n = 0, n = 1, n = 2$)，被试根据对应的提示语进行按键反应。在每 3 个组块完成后，被试可以休息 2 分钟，接着继续依次完成 9 个组块，每个刺激字母会呈现 500 ms，并伴随着一个 2000 ms 的空屏，实验流程如图 1 所示。整个实验大概需要二十分钟，过程中被试被要求快速、正确地进行按键反应。

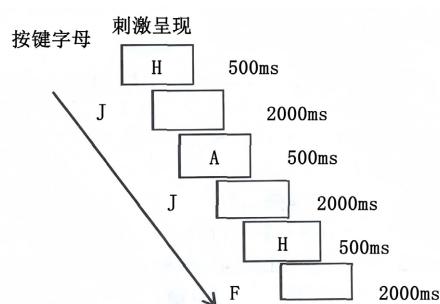


Figure 1. Experimental flow chart of n-back
图 1. N-back 实验流程图

2.4. 实验仪器及 tDCS 方案

以往的 1×1 tES 单通道经颅直流电刺激仪，主要是由两块海绵状电极组成的电流通路，从而实现电

流的传输，而电极的大小对刺激效应有很大的影响，目前广泛使用的单道电极的大小为 $25\text{ cm}^2\sim35\text{ cm}^2$ ，它可以同时覆盖多个脑部刺激目标，从而使电流在刺激目标附近扩散，而我们的目标只是一个固定目标；而且，从阴极到阳极的电流流过的大脑区域很大，所以，电流的损耗是很大的，到达目标区域的电流不一定能够达到预定的电流。针对上述问题，本实验拟使用美国 Soterix medical 公司的 4×1 HD-tES 装置，包含一条阳极通道，四条阴极通道，该装置含有交流电或直流电，我们选用较弱的、对人体更具安全性的直流电流进行干预。HD-tES 是一种新型的经颅电刺激仪，采用五个直径不超过 12 毫米的银盐作为电极，将原本的海绵体电极换成了五个小圆盘，可以更准确地定位到目标部位，而且银盐的导电性要比海绵体好得多，可以减少电流在阴极和阳极之间传输时的损失。

本研究将电流强度设定在 2 mA 左右，该电流已经被证实是一个安全的参数。关于 tDCS 的刺激时长，有一项 Meta 分析表明，10~13 分钟属于中等效应的刺激时长，刺激时长愈长，效应愈明显，在安全范围之内，20 分钟为最佳刺激时长(左秀芹等，2019)，因此将刺激时长设置为 20 min。本实验根据以往研究，主要对网络成瘾者的左侧背外侧前额叶皮层(DLPFC)进行阳极刺激。认为该区域是调节工作记忆能力的重要脑区，将中心电极(即阳极)放置于头皮 F3 处，阴极环绕阳极四周置放，即 FC3、F1、AF3、F5 脑区靶点(如图 2)，刺激强度由中心向四周递减(如图 3)。

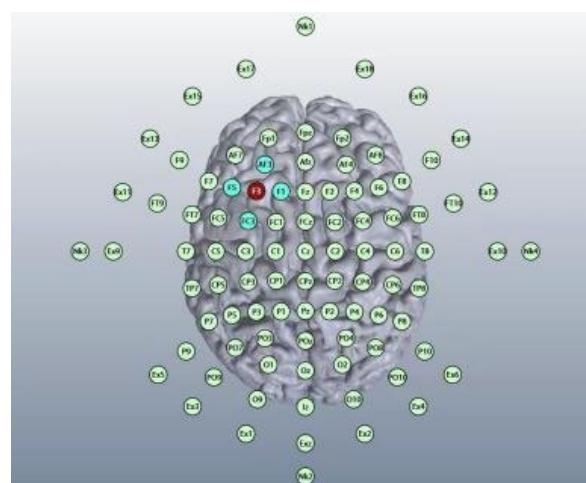


Figure 2. Transcranial direct current stimulation of brain regions
图 2. 经颅直流电刺激脑区

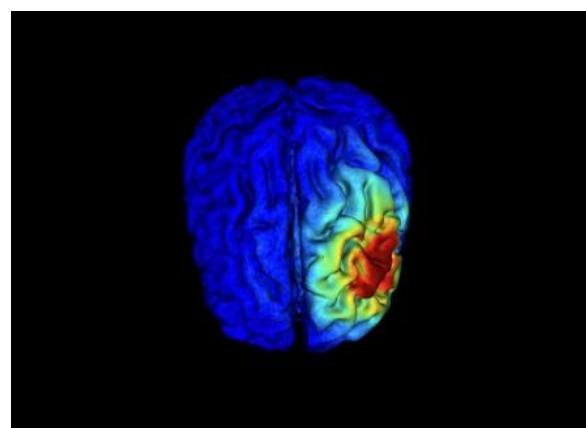


Figure 3. Transcranial direct current stimulation of the brain heat map
图 3. 经颅直流电刺激脑区热量图

背外侧前额叶皮层是大脑的高级功能系统，阳极刺激能够通过增加 DLPFC 皮层的兴奋性，调节神经元可塑性，改善人们的认知功能与记忆能力。对于伪刺激组，我们将电极置于同样的位置，但在 30 秒后，刺激器内的电流便会消失，仅在最后 30 秒才重新出现，其他时间内无任何电流。所以，被试仅在开始及结束时有轻微的瘙痒感(雷雳，杨洋，2007)。

2.5. 实验流程

实验分为两个阶段：前测和后测。真刺激组被试与伪刺激组被试均需完成两个阶段的实验。

阶段 1：被试来到实验室调整好状态开始进行 N-back 任务。

阶段 2：防止被试产生练习反应，阶段 2 在阶段 1 结束一周之后再进行。

在实验之前需要对 tDCS 仪器进行检测。当被试到达实验地点后，把仪器打开，并将其设置为无电流模式，以保护第一次受到刺激的被试者不会受到启动时瞬间电流的影响，然后给被试佩戴脑电帽，在确定各个电极的连接没有任何问题之后，便可以开始进行经颅直流电刺激的干预。刺激的过程中，注意观察被试的状态，并向其说明感受到的刺痛、瘙痒等均属于正常现象。刺激结束后，让被试再次完成 N-back 任务。实验结束给被试发放实验报酬。

3. 研究结果

所有数据均采用 SPSS26.0 进行差异检验与方差分析。其中，刺激类型为被试间变量，刺激时间与记忆负荷为被试内变量，N-back 任务的正确率和反应时为因变量。使用 excle 表格计算前后测两组被试的 N-back 任务正确率和反应时，探讨干预前后各组别的反应变化以及在不同记忆负荷水平下的反应差异。

3.1. 正确率结果

N-back 任务正确率的描述性统计结果见表 1。

Table 1. Accuracy rate (%) of two groups of each level describes the statistical results
表 1. 各水平两组别前后测正确率(%)描述统计结果

记忆负荷	真刺激组		伪刺激组	
	前测	后测	前测	后测
0-back	94.80 ± 6.23	98.10 ± 2.23	94.83 ± 5.63	94.10 ± 9.77
1-back	93.67 ± 3.65	95.93 ± 2.08	93.33 ± 5.36	93.23 ± 5.22
2-back	89.43 ± 6.06	94.77 ± 4.06	89.60 ± 5.42	90.23 ± 5.64

对真刺激前与伪刺激前的正确率结果使用 SPSS 26.0 软件进行双因素方差分析。结果显示，在 tDCS 干预前，真刺激组与伪刺激组间无显著差异， $F(1, 58)=0.003, p=0.956$ ，说明被试在接受真刺激前与伪刺激前的工作记忆测验的准确性无差异。

对真刺激前后和伪刺激前后的正确率分别进行双因素方差分析。结果显示(见表 2)，真刺激组后测的 N-back 任务正确率显著大于前测，前后测正确率结果差异显著， $F(1, 58)=31.108, p<0.001$ ；伪刺激组后测的 N-back 任务正确率与前测的正确率无显著差异， $F(1, 58)=0.005, p=0.944$ 。说明被试在接受 tDCS 真刺激后，其工作记忆能力得到了提升，而接受伪刺激的被试，工作记忆能力没有得到显著变化。

在真刺激和伪刺激条件下，记忆负荷主效应均为显著， $p<0.001$ ，事后检验表明，0-back 任务中的正确率显著大于 1-back 任务中的正确率，1-back 任务中的正确率显著大于 2-back 任务中的正确率。

此外，真刺激条件下，干预前后与记忆负荷的交互作用不显著， $F(2, 58) = 1.912, p = 0.151$ ；伪刺激条件下，干预前后与记忆负荷的交互作用不显著， $F(2, 58) = 0.172, p = 0.842$ 。

Table 2. Results of variance analysis of accuracy before and after stimulation
表 2. 刺激前后正确率方差分析结果

组别	df	F	p
真刺激前后	1	31.108	0.000
伪刺激前后	1	0.005	0.944
(真)记忆负荷	2	15.152	0.000
(伪)记忆负荷	2	8.214	0.000
(真)干预前后 * 记忆负荷	2	1.912	0.151
(伪)干预前后 * 记忆负荷	2	0.172	0.842

对真刺激前后与伪刺激前后正确率的差值进行双因素方差分析。结果显示真刺激前后正确率差值与伪刺激前后正确率差值差异显著， $F(1, 58) = 12.033, p < 0.01$ ；记忆负荷主效应不显著， $F(2, 58) = 1.277, p = 0.281$ ；组别与记忆负荷的交互作用不显著， $F(2, 58) = 0.423, p = 0.656$ 。

3.2. 反应时结果

N-back 任务反应时的描述性统计结果见表 3。

Table 3. The statistical results were described in response time (ms) of two groups at each level
表 3. 各水平两组别前后测反应时(ms)描述统计结果

记忆负荷	真刺激组		伪刺激组	
	前测	后测	前测	后测
0-back	541.93 ± 82.35	468.26 ± 69.89	585.11 ± 80.06	590.50 ± 90.53
1-back	650.08 ± 84.81	549.54 ± 88.11	670.35 ± 91.16	641.71 ± 84.20
2-back	778.62 ± 87.12	625.60 ± 96.62	790.07 ± 98.92	774.51 ± 83.42

对真刺激前与伪刺激前的反应时使用 SPSS 26.0 软件进行双因素方差分析。结果显示，在 tDCS 干预前，真刺激组与伪刺激组组间无显著差异， $F(1, 58) = 3.653, p = 0.058$ ，说明被试在接受真刺激前与伪刺激前的工作记忆测验的反应时结果无差异。

对真刺激前后和伪刺激前后的反应时分别进行双因素方差分析。结果显示(见表 4)，真刺激组后测 N-back 任务的反应时显著小于前测，前后测反应时结果差异显著， $F(1, 58) = 73.770, p < 0.001$ ；伪刺激组后测 N-back 任务的反应时与前测的反应时无显著差异， $F(1, 58) = 0.966, p = 0.327$ 。说明被试在接受 tDCS 真刺激后，其工作记忆能力得到了提升，而接受伪刺激的被试，工作记忆能力没有得到显著变化。

在真刺激和伪刺激条件下，记忆负荷主效应均为显著， $p < 0.001$ ，事后检验表明，0-back 任务中的反应时显著小于 1-back 任务中的反应时，1-back 任务中的反应时显著小于 2-back 任务中的反应时。

此外，真刺激条件下，干预前后与记忆负荷的交互作用不显著， $F(2, 58) = 3.366, p = 0.087$ ；伪刺激条件下，干预前后与记忆负荷的交互作用不显著， $F(2, 58) = 0.568, p = 0.568$ 。

Table 4. Anova results of response time before and after stimulation
表 4. 刺激前后反应时方差分析结果

组别	df	F	p
真刺激前后	1	73.770	0.000
伪刺激前后	1	0.966	0.327
(真)记忆负荷	2	80.264	0.000
(伪)记忆负荷	2	74.983	0.000
(真)干预前后 * 记忆负荷	2	3.366	0.087
(伪)干预前后 * 记忆负荷	2	0.568	0.568

对真刺激前后与伪刺激前后反应时的差值进行双因素方差分析。结果显示真刺激前后反应时差值与伪刺激前后反应时差值差异显著, $F(1, 58) = 30.537$, $p < 0.01$; 记忆负荷主效应不显著, $F(2, 58) = 2.812$, $p = 0.063$; 组别与记忆负荷的交互作用不显著, $F(2, 58) = 1.425$, $p = 0.243$ 。

4. 讨论

4.1. 结果讨论与分析

本研究对真刺激组和伪刺激组的网瘾被试均进行了强度为 2 mA 的 tDCS 干预, 且刺激持续了 20 min。同时采用倒数 N 项测验(N-back)范式, 探究网络成瘾大学生的工作记忆能力是否会受到影响。

通过对结果深入分析, 发现 tDCS 在刺激网络成瘾者的左侧 DLPFC 皮层后, 真刺激组前后测的正确率差异显著, 这与 Fregni 等人的研究结果一致(Fregni et al., 2005); 但真刺激组前后测的反应时差异也显著, 这与前人的研究结果具有相似性(Teo et al., 2011; Keeser et al., 2011), 说明 tDCS 真刺激能够提高工作记忆测验的反应时, 正确率与反应时的结果均表明 tDCS 真刺激能够提高被试的工作记忆能力, 该结果验证了我们的假设。然而, 在前测两组的正确率与反应时无显著差异的情况下, 伪刺激组前后测的正确率与反应时均无显著差异, 说明伪刺激组在 N-back 任务后测中的表现没有发生显著变化, 这意味着 tDCS 伪刺激没有影响网络成瘾者的工作记忆能力。

研究表明, 当记忆负荷的难度增加时, 两组被试的正确率均显著下降, 反应时显著增加, 这可能是因为网瘾者在分配注意力方面变得更加困难, 而李南平、齐凤荣、陶然、姚淑敏和马海春(2006)采用基本认知测验软件对网络成瘾者的工作记忆进行测量的结果也证实了这一点(李南平等, 2006), 认为网络成瘾者的工作记忆水平显著低于正常水平, 其认知能力也不及正常人。

综上所述, 网络成瘾者在不同记忆负荷水平下表现出的工作记忆能力不同, 经颅直流电刺激对网瘾者工作记忆能力的干预有良好效果。

4.2. 研究不足与展望

本研究也有一些不足之处。

首先, 网瘾者本身在执行功能等方面就存在一定的缺陷, 这其中也包括工作记忆能力, 而本实验中没有设计非网瘾组作为对照组, 在未来的研究中, 可以考虑增加非网瘾组作为参考, 排除一些无关变量。

其次, 根据 Young 提出的网络成瘾的五种亚类型, 他认为网络成瘾具有不同的特点, 可以分为网络游戏成瘾、网络色情成瘾、网络关系成瘾、网络信息成瘾和网络强迫行为(Young, 1998), 因此, 未来研究可以选取不同类型的网络成瘾者, 探究其工作记忆的特点和脑机制的差异, 以此来拓展研究领域。

最后, 由于实验样本量较小, 参与者人数也相对较少, 而且所有参与者都是在校大学生, 因此, 本

研究结果推论到其他群体中缺乏可信度。并且，所有的被试者仅接受了一次经颅直流电刺激干预，缺少长期的干预和治疗。在以后的研究中，可以通过增加被试者的数量和增加被试者的种类，丰富群体的多样性，来进一步证实 tDCS 的即时性，并通过周期性的干预，探索经颅直流电刺激的长期效应。

5. 结论

本研究探讨了经颅直流电刺激对网络成瘾者工作记忆能力的影响，主要得出以下结论：

- (1) 经颅直流电刺激能够提高网络成瘾者的工作记忆能力；
- (2) 左侧 DLPFC 皮层是工作记忆相关的重要脑区，可以作为改善网络成瘾者工作记忆能力的 tDCS 刺激靶点；
- (3) 网瘾者在 N-back 任务中的正确率随记忆负荷难度的提高而降低，反应时随记忆负荷难度的上升而增大。

参考文献

- 戴砷懿, 马庆国, 王小毅(2011). 网络游戏成瘾者对成瘾相关线索的注意偏向: 一项 erp 研究. *心理科学*, 34(6), 1302-1307.
- 贺金波, 郭永玉, 柯善玉, 赵仑(2008). 网络游戏成瘾者认知功能损害的 erp 研究. *心理科学*, 31(2), 380-384, 388.
- 贺金波, 洪伟琦, 鲍远纯, 雷玉菊(2012). 网络成瘾者的大脑异于常人吗? *心理科学进展*, 20(12), 2033-2041.
- 侯娟, 陈双艺, 侯莹莹, 樊宁, 亚静怡, 方晓义(2018). 网络游戏成瘾的诊断, 研究及治疗进展. *中国特殊教育*, (10), 90-96.
- 金璞, 傅先明, 钱若兵, 牛朝诗, 韩晓鹏(2008). 青少年网络成瘾的事件相关电位 n400 研究. *立体定向和功能性神经外科杂志*, 21(6), 333-335, 347.
- 雷雳, 杨洋(2007). 青少年病理性互联网使用量表的编制与验证. *心理学报*, 39(4), 688-696.
- 李南平, 齐凤荣, 陶然, 姚淑敏, 马海春(2006). 网络成瘾对青少年基本认知能力的影响. *中国行为医学科学*, 15(10), 938.
- 刘玎, 卢宁(2017). 成就动机与大学生网络成瘾的关系: 不成熟防御方式和职业决策困难的中介作用. *中国临床心理学杂志*, 25(6), 1093-1097.
- 刘盼, 刘世文(2011). 经颅直流电刺激的研究及应用. *中国组织工程研究与临床康复*, 15(39), 7379-7383.
- 刘苏姣(2019). 物质使用障碍与行为成瘾的冲动性比较研究. 博士学位论文, 长春: 吉林大学.
- 许汉云, 傅先明, 钱若兵, 韩晓鹏, 牛朝诗, 汪业汉(2010). 网络游戏成瘾青少年事件相关电位关联性负变的实验研究. *中国微侵袭神经外科杂志*, 15(5), 218-220.
- 郁洪强, 赵欣, 刘海婴, 王明时, 周鹏(2009). 过度使用互联网对脑电时频特性的影响研究. *自然科学进展*, 19(4), 456-461.
- 赵鑫, 徐伊文婕, 霍小宁(2016). 刷新功能的训练: 内容、效果与机制. *中国临床心理学杂志*, 24(5), 808-813, 889.
- 左秀芹, 谢惠敏, 贾子善, 张立宁, 王璐, 黄超(2019). 基于国内经颅直流电刺激研究的文献计量学分析. *中国康复医学杂志*, 34(6), 718-721.
- American Psychiatric Association DSM-Task Force Arlington VA US (2013). Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: DSM-5™ (5th ed.). *Codas*, 25, 191.
- Boggio, P. S., Sultani, N., Fecteau, S., Merabet, L., Mecca, T., Pascual-Leone, A. et al. (2008). Prefrontal Cortex Modulation Using Transcranial DC Stimulation Reduces Alcohol Craving: A Double-Blind, Sham-Controlled Study. *Drug and Alcohol Dependence*, 92, 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.drugalcdep.2007.06.011>
- Bonelli, R. M., & Cummings, J. L. (2007). Frontal-subcortical Circuitry and Behavior. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 9, 141-151. <https://doi.org/10.31887/dcns.2007.9.2/rbonelli>
- Brunoni, A. R., Nitsche, M. A., Bolognini, N., Bikson, M., Wagner, T., Merabet, L. et al. (2012). Clinical Research with Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS): Challenges and Future Directions. *Brain Stimulation*, 5, 175-195. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.03.002>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

- Conti, C. L., Moscon, J. A., Fregni, F., Nitsche, M. A., & Nakamura-Palacios, E. M. (2014). Cognitive Related Electrophysiological Changes Induced by Non-Invasive Cortical Electrical Stimulation in Crack-Cocaine Addiction. *The International Journal of Neuropsychopharmacology*, 17, 1465-1475. <https://doi.org/10.1017/s1461145714000522>
- Dong, G., DeVito, E. E., Du, X., & Cui, Z. (2012). Impaired Inhibitory Control in 'Internet Addiction Disorder': A Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 203, 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2012.02.001>
- Farah, M. J., Smith, M. E., Ilieva, I., & Hamilton, R. H. (2014). Cognitive Enhancement. *WIREs Cognitive Science*, 5, 95-103. <https://doi.org/10.1002/wcs.1250>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A Flexible Statistical Power Analysis Program for the Social, Behavioral, and Biomedical Sciences. *Behavior Research Methods*, 39, 175-191. <https://doi.org/10.3758/bf03193146>
- Fecteau, S., Fregni, F., Boggio, P. S., Camprodón, J. A., & Pascual-Leone, A. (2010). Neuromodulation of Decision-Making in the Addictive Brain. *Substance Use & Misuse*, 45, 1766-1786. <https://doi.org/10.3109/10826084.2010.482434>
- Fregni, F., Boggio, P. S., Nitsche, M., Bermpohl, F., Antal, A., Feredoes, E. et al. (2005). Anodal Transcranial Direct Current Stimulation of Prefrontal Cortex Enhances Working Memory. *Experimental Brain Research*, 166, 23-30. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2334-6>
- Fregni, F., Ligouri, P., Fecteau, S., Nitsche, M. A., Pascual-Leone, A., & Boggio, P. S. (2008). Cortical Stimulation of the Prefrontal Cortex with Transcranial Direct Current Stimulation Reduces Cue-Provoked Smoking Craving. *The Journal of Clinical Psychiatry*, 69, 32-40. <https://doi.org/10.4088/jcp.v69n0105>
- Keeser, D., Padberg, F., Reisinger, E., Pogarell, O., Kirsch, V., Palm, U. et al. (2011). Prefrontal Direct Current Stimulation Modulates Resting EEG and Event-Related Potentials in Healthy Subjects: A Standardized Low Resolution Tomography (sLORETA) Study. *NeuroImage*, 55, 644-657. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.12.004>
- Kunze, T., Hunold, A., Haueisen, J., Jirsa, V., & Spiegler, A. (2016). Transcranial Direct Current Stimulation Changes Resting State Functional Connectivity: A Large-Scale Brain Network Modeling Study. *NeuroImage*, 140, 174-187. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.015>
- Lee, H. W., Choi, J., Shin, Y., Lee, J., Jung, H. Y., & Kwon, J. S. (2012). Impulsivity in Internet Addiction: A Comparison with Pathological Gambling. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 15, 373-377. <https://doi.org/10.1089/cyber.2012.0063>
- Meng, Z., Liu, C., Yu, C., & Ma, Y. (2014). Transcranial Direct Current Stimulation of the Frontal-Parietal-Temporal Area Attenuates Smoking Behavior. *Journal of Psychiatric Research*, 54, 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2014.03.007>
- Mylius, V., Jung, M., Menzler, K., Haag, A., Khader, P. H., Oertel, W. H. et al. (2012). Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Pain Perception and Working Memory. *European Journal of Pain*, 16, 974-982. <https://doi.org/10.1002/j.1532-2149.2011.00105.x>
- Nie, J., Zhang, W., Chen, J., & Li, W. (2016). Impaired Inhibition and Working Memory in Response to Internet-Related Words among Adolescents with Internet Addiction: A Comparison with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder. *Psychiatry Research*, 236, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2016.01.004>
- Oliveira, J. F., Zanão, T. A., Valiengo, L., Lotufo, P. A., Benseñor, I. M., Fregni, F. et al. (2013). Acute Working Memory Improvement after tDCS in Antidepressant-Free Patients with Major Depressive Disorder. *Neuroscience Letters*, 537, 60-64. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2013.01.023>
- Ricciardi, E., Bonino, D., Gentili, C., Sani, L., Pietrini, P., & Vecchi, T. (2006). Neural Correlates of Spatial Working Memory in Humans: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study Comparing Visual and Tactile Processes. *Neuroscience*, 139, 339-349. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.08.045>
- Rodgers, R. F., Melioli, T., Laconi, S., Bui, E., & Chabrol, H. (2013). Internet Addiction Symptoms, Disordered Eating, and Body Image Avoidance. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 16, 56-60. <https://doi.org/10.1089/cyber.2012.1570>
- Sauvaget, A., Trojak, B., Bulteau, S., Jiménez-Murcia, S., Fernández-Aranda, F., Wolz, I. et al. (2015). Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) in Behavioral and Food Addiction: A Systematic Review of Efficacy, Technical, and Methodological Issues. *Frontiers in Neuroscience*, 9, Article 349. <https://doi.org/10.3389/fnins.2015.00349>
- Takahashi, T. (2007). Economic Decision-Making in the Ultimatum Game by Smokers. *Neuro Endocrinology Letters*, 28, 659-661.
- Teo, F., Hoy, K. E., Daskalakis, Z. J., & Fitzgerald, P. B. (2011). Investigating the Role of Current Strength in tDCS Modulation of Working Memory Performance in Healthy Controls. *Frontiers in Psychiatry*, 2, Article 45. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00045>
- Wang, Y., Shen, Y., Cao, X., Shan, C., Pan, J., He, H. et al. (2016). Transcranial Direct Current Stimulation of the Frontal-Parietal-Temporal Area Attenuates Cue-Induced Craving for Heroin. *Journal of Psychiatric Research*, 79, 1-3.

<https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2016.04.001>

Widyanto, L., Griffiths, M. D., & Brunsden, V. (2011). A Psychometric Comparison of the Internet Addiction Test, the Internet-Related Problem Scale, and Self-Diagnosis. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 14, 141-149. <https://doi.org/10.1089/cyber.2010.0151>

Xiong, J., & Yao, L. (2010). The Research of Event-Related Potentials in Working Memory of the Juvenile Internet Addiction. In *2010 International Conference on E-Health Networking Digital Ecosystems and Technologies (EDT)* (pp. 93-95). IEEE.

Young, K. S. (1998). Caught in the Net: How to Recognize the Signs of Internet Addiction and a Winning Strategy for Recovery. *Assessment*, 21, 713-722.

Zhou, Y., Lin, F., Du, Y., Qin, L., Zhao, Z., Xu, J. et al. (2011). Gray Matter Abnormalities in Internet Addiction: A Voxel-Based Morphometry Study. *European Journal of Radiology*, 79, 92-95. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2009.10.025>

Zhou, Z., Zhou, H., & Zhu, H. (2016). Working Memory, Executive Function and Impulsivity in Internet-Addictive Disorders: A Comparison with Pathological Gambling. *Acta Neuropsychiatrica*, 28, 92-100. <https://doi.org/10.1017/neu.2015.54>