

经颅直流电在阅读能力加工的应用综述

吴洁莹, 贺丹*

广州工商学院外语学院, 广东 广州

收稿日期: 2024年5月9日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

阅读能力作为人脑的高级功能之一, 也是个体语言加工的重要组成部分。阅读能力的神经加工机制一直是认知科学的一个重要课题。随着近年来认知科学技术的发展, 越来越多脑科学技术开始运用到这一课题的研究中来。经颅直流电技术就是其中一项较为新型的技术。本文对现有利用这一技术对阅读能力进行研究的文章进行了梳理和总结, 并对未来运用这一技术进行阅读能力研究做出了一定展望。

关键词

阅读能力, 经颅直流电, 神经加工

A Review of the Application of Transcranial Direct Current Stimulation on the Processing of Reading Abilities

Jieying Wu, Dan He*

School of Foreign Languages, Guangzhou College of Technology and Business, Guangzhou Guangdong

Received: May 9th, 2024; accepted: Jun. 20th, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

Reading abilities, as one of the advanced functions of the human brain, is also an important part of individual language processing. The neural mechanism of reading abilities has always been an important subject of cognitive science. With the development of cognitive science and technology in recent years, more and more brain science and technology have begun to be applied to the research of this subject. Transcranial direct current stimulation (tDCS) is one of the relatively new

*通讯作者。

technologies. This article combs and summarizes the existing articles that use this technology to study reading ability, and makes a certain prospect for the future use of this technology to study reading abilities.

Keywords

Reading Abilities, Transcranial Direct Current Stimulation, Neural Processing

Copyright © 2024 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

阅读能力是人脑的高级功能之一,也是个体语言加工的重要组成部分。良好的阅读能力是个体学习知识、与外界进行联系、掌握知识技能、融入社会的基础。但是,阅读障碍患者、阅读能力较正常读者低的健康人及脑部阅读皮层受损的患者在阅读能力上有所缺陷。这些人群的阅读能力缺陷神经机制是什么?是否可以靠外部技术进行提升?如果可以,提升效果如何?其行之有效的神经机制是什么?这一直是学界在进行阅读能力研究中的问题。本文将介绍经颅直流电技术的工作原理及其安全性,并从已有的文献入手,总结阅读能力的相关神经机制模型;进而就音位解码、形音联结、命名速度、文本理解等几个角度,对经颅直流电刺激技术在阅读能力研究方面进行梳理,并且讨论已有研究中的不足,进一步探索使用该技术进行阅读能力研究的方向。

在学界研究中,对阅读能力的定义多种多样。根据 NICHD (National Institute of Child Health and Human Development, 美国国立儿童健康与人类发育研究所)在 2000 年研究报告中的定义,阅读能力包括音位意识、语音能力、流利阅读、词汇理解和阅读理解这五个方面的能力。音位意识是指对构成单词的不同音位进行识别和使用的能力;语音能力是指起到识别、处理语言的书写形式和口语语音关系的作用;流利阅读是指在前两个能力的基础上进行快速、准确地阅读;词汇理解是句子阅读的基础;阅读理解即理解句子或篇章所表达的意思[1]。He 等以 416 名大学生作为被试,采用 7 个不同的阅读任务,分离出阅读能力的三个部分,即音位解码(Phonological decoding)、形音联结(Form-sound association)和命名速度(Naming speed)。音位解码即读者从书面呈现的词汇中将其语音信息抽象出来的过程;形音联结是指读者将声音与词形进行匹配联系的能力[2]。一个人要进行成功的阅读,就必须快速而精确地将大脑内部的阅读线路联结起来。这一线路包括支持各语言层次的神经系统,以及视觉处理过程、拼写处理过程、工作记忆、注意力、运动能力及更高层次的理解和认知能力[3]。由此可以看出,读者对文本语言的语音能力、阅读速度、文本理解能力、工作记忆等都在阅读能力中发挥重要作用。结合 NICHD 及 He 对阅读能力的定义,可将阅读能力分为以下几个板块:语音解码、形音联结、命名速度、文本理解。其中,语音解码、形音联结及命名速度与 He 对这三种能力的定义一致,文本理解则是结合了 NICHD 中对词汇理解和阅读理解能力的定义。

随着神经科学技术在近几十年间的不断发展,学术界开始借助脑科学技术对阅读能力加工进行研究。如 Lin 等人利用核磁共振成像技术(fMRI)对 24 位健康被试进行阅读相关神经机制的研究[4]; Buchweitz 等人同样式利用核磁共振成像技术对 12 名母语为葡萄牙语的健康受试进行实验,对比受试在理解葡萄牙语书面语与口头句子时脑部活动差异[5]。而在国内,学界对于阅读能力的研究一直以阅读教学为主,对

阅读能力的认知神经加工研究起步较晚。如耿立波和杨亦鸣利用事件相关电位技术(ERP, Event-related Brain Potentials)进行二语句子阅读能力的心理现实性研究[1]; 刘梦醒采用磁共振技术(fMRI)进行自然语言理解中语义整合的神经机制[6]。近年来, 非侵入性神经刺激技术, 如经颅直流电刺激(Transcranial Direct Current Stimulation, tDCS)、经颅交流电刺激(Transcranial Alternating Current Stimulation, tACS)、经颅随机噪声刺激(Transcranial Random Noise Stimulation, tRNS)等, 也开始应用于心理语言学的研究中。自从 2012 年 Turkeltaub *et al.*首次将经颅直流电技术运用于阅读效率研究后, 越来越多学者将这一技术运用于阅读能力的加工研究中。

经颅直流电刺激技术是一项无创性好、安全性高、高效便捷的神经功能调节技术。其原理是通过 2 个头皮电极(阴极和阳极)产生微弱的直流电(电流大小在 0.5~2 mA 之间), 诱导静息电位次阈值发生变化, 改变神经元的自发放电率, 促进(阳极)或抑制(阴极)神经元放电频率, 改变脑表面神经元膜电位去极化或超极化方向, 从而发挥增强或抑制局部脑区功能的作用[7]。在安全性上, Nitsche 等在公认的安全模式下分别对受试者行 0.50 和 1 小时的经颅直流电刺激, 再行 MRI 检查, 其中并未发现脑组织水肿、血-脑屏障破坏和脑结构改变[8]。该技术在实验过程中, 在受试者中出现较多的副作用是刺痛、刺痒、局部红肿、嗜睡、情绪变化等[9]-[12]。

2. 经颅直流电技术对阅读能力的加工研究

在经颅直流电实验中, 受试的刺激类型分为真实刺激、假刺激、无刺激三种。真实刺激即电极放置在受试的刺激部位后, 电流逐渐上升到实验所需大小, 经过一定时间刺激后缓慢回落的刺激类型。假刺激即电极放置在受试的刺激部位, 电流在 15~20 秒内自动关闭, 但受试需要继续佩戴电极, 到与接受真实刺激同样长的时间后, 才将电极取下。在假刺激过程中, 受试会感到一些轻微的不适感, 但是之后并无电流刺激。在部分实验中, 假刺激可当作对照组, 与真实刺激形成对比。在实验材料上, 词汇阅读的实验材料课分为真词和假词。真词即真实的、有意义的词语。假词即受试可以根据字母的排列, 成音节读出的字母串。这类字母串并不是真实的、有实际意义的词语。

2.1. 经颅直流电技术对形音联结的加工研究

形音联结(form-sound association), 是指读者将声音与词形进行匹配联系的能力[13]。在实验任务中, 可以通过音素组合这一实验范式对受试进行测试, 根据测试结果正确率变化情况分析受试的形音联结能力变化情况。在进行音素组合时, 受试需要正确读出所见的音素, 并且将这些音素融合在一起, 形成一个新的非单词字母串。

在实验中, Costanzo 等人对受试的左右两侧颞顶皮层进行刺激及假刺激[10]。在实验开始前及接受刺激后, 受试需接受音素组合测试(phoneme blending)。测试结果显示, 受试在接受真实刺激后效果优于接受刺激前的测试结果。

Younger 等人在探究经颅直流电刺激对低阅读水平者形音连接能力的影响, 对两组健康受试进行刺激。其中一组刺激部位位于左侧顶下叶, 一组接受假刺激。同时进行词汇训练, 并在训练后接受测试。测试内容包括训练过的词汇及与训练词汇音韵构成规律相同的字母串。测试结果显示, 低阅读水平受试在接受刺激后效果优于高水平阅读受试[14]。

由以上实验可以发现, 低于平均阅读水平的受试在接受刺激后效果优于高于平均阅读水平受试。而阅读障碍患者在接受刺激后, 其形音联结能力也得到改善。但是, 由于这一方面的实验数量较少, 所以并不能得出经颅直流电刺激在刺激颞顶皮层或顶下叶后对这一能力一定有所改善的结论。

2.2. 经颅直流电技术对语音解码的加工研究

语音解码是指读者从书面呈现的词汇中将其语音信息抽象出来的过程。这一过程使得读者可以将词汇的书面文字转化成语音形式, 激活其储存在长时记忆中与该词汇相对应的信息。因此, 语音解码是早期阅读发展中的重要一环, 同时也是阅读是否成功的关键所在[15]。在神经机制上, 实验认为, 无论是健康读者还是阅读障碍患者, 其左侧颞上回在语音解码的过程中都有所激活[16] [17]。Hoefl [18]和 Shaywitz 等人[19]也发现, 在语音处理及词汇阅读的过程中, 阅读障碍患者的左侧颞顶区活动减弱, 但右侧皮层活动增强。

对语音解码较为主流的检验方式是对真词的认读和假词拼读。两种测试手段均体现的是运用形音转换规则在形音之间或形音义之间建立起联系的过程。彭鹏等指出, 假词拼读对阅读能力发展有着长期的预测作用, 是用来诊断是否存在阅读困难的重要鉴别指标[20]。这两种能力在实验中可以以词汇阅读效率(TOWRE, Test of Word Reading Efficiency)的范式进行测试。在词汇阅读效率测试中, 被试需尽可能快地将若干真词或假词(可成音节的字母串)大声朗读出来。在这一范式中, 包括语音解码效率(phonetic decoding efficiency, PDE)和单个词汇效率(single word efficiency, SWE)。阅读效率完成的效果由读者正确朗读的单词数量进行衡量。除了词汇阅读效率这种实验范式外, 在实验中还运用到音韵判断任务(rhyme judgement)。在音韵判断任务中, 受试需要判断呈现在眼前的两个单词在发音上是否押韵。这种实验范式并不要求受试进行口头发音, 但是需要通过呈现出来的词汇, 激活受试头脑中储存的语音表征信息。受试在激活其字音匹配能力后, 才能准确完成这一项任务。所以, 这一研究范式也测试了受试语音工作记忆容量。

Trukeltaub 等人对 25 名受试进行 20 分钟、强度在 1.5 毫安的经颅直流电刺激及假刺激(即无电流刺激) [12]。其中假刺激作为对照组参考。受试的刺激位点阳极位于左侧颞叶后部(Left posterior temporal cortex, LpTC), 阴极位于右侧的同一部位。受试在接受刺激后, 接受词汇阅读效率测试。结果发现, 与对照组相比, 阅读水平低于平均水平的受试结果优于高于平均水平的受试。从测试词语的种类来看, 在词语阅读效率上, 受试在接受真实刺激后比接受假刺激后的效率更高; 在非词语(字母串)的阅读效率上, 受试在两种刺激条件下并没有显著差异。Younger 等人[21]对 32 位低水平阅读者进行刺激。根据刺激位点, 受试随机分为三组, 其中两组阳极分别位于左侧颞叶下部(left inferior parietal lobe, LIPL)及右侧颞叶上部(right superior parietal lobe, RSPL), 另一组为接受假刺激组的对照组。阴极刺激位点均位于阳极刺激位点对侧颞额皮层。结果发现, 在词汇阅读效率测试中, 左侧顶下回接受刺激的受试比接受右侧顶上回及假刺激的受试效果更好。

但是, 在 Thomson 等人的实验中, 实验结果显示右侧颞顶交界处接受阳极刺激后, 其阅读效率更好[11]。在实验中, 两组受试分别接受阳极位于左侧和右侧颞顶交界处(TPJ, temporo-parietal junction)、阴极位于阳极对侧颞顶交界处的经颅直流电刺激。刺激强度为 2 毫安, 时长 20 分钟。没有设置假刺激作为对照组。受试在刺激开始前十分钟及接受刺激 10 分钟后分别进行一次词汇阅读效率测试。测试结果发现, 与左侧接受阳极刺激相比, 受试在右侧接受阳极刺激时, 真词阅读效率结果优于前者。

在阅读障碍患者方面, Costanzo 等人发现, 受试在左侧颞顶区接受阳极刺激后, 篇章阅读错误减少; 相反, 右侧颞顶区在接受刺激后, 篇章阅读错误增加[10]。但是, 在所有刺激条件下, 受试的阅读时间及词汇阅读的错误数量都没有明显变化。在其另一个实验中, 在刺激条件一致的情况下, 实验结果显示, 受试在左侧颞顶区接受刺激一个月后, 低频词的阅读速度有所加快, 且阅读错误有所减少; 同时非词阅读速度加快[22]。这一效果甚至持续到接受刺激 6 个月后[10] [23]。Heth 等人基于巨细胞系统缺陷理论, 对部分阅读障碍读者颞顶联合区的视觉运动区(V5)进行刺激[24]。这一部分受试在接受刺激一周后, 与接

受假刺激组相比, 篇章朗读正确率没有发生明显变化。Rios 等人探究经颅直流电技术对阅读障碍患者的阅读能力影响, 对受试的左侧颞叶中部及颞叶后部的中间地方进行强度为 2 毫安, 时长 30 分钟。与接受刺激前相比, 受试在接受刺激后, 其假词及篇章的阅读正确数有所提升[25]。但是, 受试在接受所有阅读任务(包括音节阅读、篇章阅读及词语阅读)时, 反应时间并没有明显变化。

在 Younger 等人的实验中, 受试接受刺激后进行了音韵判断测试。结果显示, 接受假刺激及在右侧顶上叶接受刺激的受试, 在这一测试中表现比左侧顶下叶接受阳极刺激的受试好[21]。

综合以上实验, 可以发现, 通过对颞顶交界处进行一定强度和时长的刺激, 阅读者的语音解码能力发生了改变。但是, 这一部位及顶叶对语音解码能力的影响是否有偏侧化现象, 这需要进一步探索。在刺激效果上, 阅读水平较平均水平低的受试高于阅读水平高于平均水平的受试。而实验结果也显示, 经颅直流电刺激对词汇阅读效率效果较好, 但对篇章阅读效果并不明显。

2.3. 经颅直流电技术对命名速度的加工研究

在 Heth 等人的实验中, 受试在接受刺激前后进行快速命名任务(rapid automatized naming, RAN)。实验结果显示, 受试在接受有效刺激后, 其命名文字的速度有明显提高[24]。Bhattacharjee 等人在探究语言熟练度对经颅直流电技术效果的影响时, 对健康英汉双语使用者的阅读背侧通路和腹侧通路(都位于左侧颞顶皮层)进行刺激。发现受试在阅读背侧通路接受刺激后, 英语词汇和汉字的命名反应时间有所加快。而在腹侧通路接受刺激后, 受试对汉字命名的反应时间有所加快, 但是在英语词汇的反应时间上没有明显影响[9]。在 Costanzo 等人的实验中, 阅读障碍受试在接受刺激前后, 其命名反应时间并没有显著性差异[10]。

上述实验结果显示, 颞顶交界处在健康受试的命名速度上具有加工优势。但是, 这一优势在语言障碍患者中并不明显。同时, 语言水平也对经颅直流电在颞顶交界处的加工效果有所影响。在 Bhattacharjee 等人的实验中, 英语假词阅读能力评分较低的受试在接受刺激后, 其英语字符串命名的反应时间减短。实验中, 受试的汉语阅读水平低于英语阅读水平。在接受刺激后, 其对汉语语料的命名反应时间明显加快。

2.4. 经颅直流电技术对文本理解能力的加工研究

在现有的经颅直流电实验中, 与阅读理解能力相关的实验相对较少。在现有的实验中, 主要采取了词汇判断(lexical decision)、语义启动(semantic priming)、词组判断(word pair)等范式进行验证。在词汇判断任务中, 受试需要判断所见字母串是否为单词。语义启动要求受试判断启动词和目标词之间是否具有相关性或者联想关系。如果被试对语义相关目标词的辨认速度比对语义不相关的目标词的辨认速度更快, 则认为产生了语义启动[26]。词组判断要求被试判断所看见的词组是否具有语义关系。在这一系列范式中, 受试的反应时间及任务完成正确率变化反映了其文本理解能力的变化。

Weltman, Lavidor 为验证经颅直流电作用于颞顶交界处对词汇和语义处理的影响, 对受试的左右两侧韦尼克区(左右两侧颞顶区后侧)分别进行刺激。在实验过程中, 受试需接受两次真实刺激和一次假刺激, 并且在接受刺激后进行语义判断测试(lexical decision)及语义启动测试(semantic priming) [27]。测试结果发现, 与接受假刺激后相比, 受试在接受真实刺激后对词汇判断及语义启动任务的准确度有所提升。但是在 Costanzo 的实验中, 阅读障碍受试的词汇判断测试结果显示, 对左侧颞顶交界处进行刺激后, 测试结果并没有发生显著性影响[10]。

Price 等人验证角回对语义信息整合的作用, 利用高精度经颅直流电技术对受试左右两侧角回分别进行刺激。词组判断任务的结果显示, 受试左侧角回接受刺激后, 与假词反应时间相比, 对有意义的词组

反应时间有明显加快。而受试在接受假刺激及右侧角回刺激后, 与对无意义词组的反应时间相比, 对有意义词组的反应时间并没有减少[28]。

以上实验的结果显示, 颞顶交界处和角回在文本理解的过程中有其加工优势。但是, 在阅读障碍受试中, 这一优势并不明显。

3. 小结与启发

在刺激部位的选择上, 现有对阅读能力进行研究的实验普遍选取的是左侧颞顶交界处, 包括顶下叶、韦尼克区、左侧颞叶后部等。在本文所选取的 12 个实验中, 有 8 个都将其阳极刺激位置定于这一区域。但是, 对于阅读水平不同的健康受试及阅读障碍患者受试, 接受刺激后的结果有所不同。阅读障碍患者受试在接受一定时长和强度的经颅直流电刺激后, 其阅读能力有所改善。对于低于平均阅读水平的健康受试, 其接受刺激后有明显效果。

在实验设计上, 实验者需要注意受试的样本数量、年龄分布、健康状态和阅读水平。在实验步骤上, 也需要注意刺激电流、电极面积大小、刺激时长、任务类型、实验组别设置等方面。忽视任何一环, 实验都不能获得准确的数据, 也就不能准确解释潜在的神经加工机制。同时, 任务类型不同也可能导致实验效果不一致。而且在实验结果方面, 可以将 tDCS 刺激、影像学资料及刺激后的行为结果相结合, 更加准确分析 tDCS 刺激对阅读神经加工的影响。在实验效果上, tDCS 刺激在健康人及失读症患者中, 对阅读能力的作用有所不同。在阅读水平低于平均水平的健康人及失读症患者中, 接受刺激后他们在阅读效率和正确率上有所提高。但是在高于平均水平的受试中, tDCS 刺激却降低了他们的阅读正确率和效率。

在已有实验中, 除 Weltman 及 Lavidor [27]、Heth 及 Lavidor [24]和 Bhattacharjee 等[9]的实验主体分别为希伯来语使用者和英汉双语使用者外, 其余实验受试者都是印欧语系语言使用者(见表 1)。且在 Bhattacharjee 等人的实验中, 英汉双语受试者的汉语阅读水平低于其英语阅读水平。那么经颅直流电技术在我国汉语使用者中是否也可以达到已有实验的效果? 这有待国内学者进行探讨。

Table 1. Use of languages by papers
表 1. 各论文语种使用情况

作者	时间	语种
Peter E Turkeltaub <i>et al.</i>	2012	英语
Weltman, Lavidor	2013	希伯来语
Heth, Lavidor	2015	希伯来语
Thomson <i>et al.</i>	2015	英语
Costanzo <i>et al.</i>	2016	意大利语
Costanzo <i>et al.</i>	2016	意大利语
Price <i>et al.</i>	2016	英语
Younger <i>et al.</i>	2016	英语
Rios <i>et al.</i>	2018	葡萄牙语
Younger, Booth	2018	英语
Costanzo <i>et al.</i>	2019	意大利语
Bhattacharjee <i>et al.</i>	2020	英语、汉语

由于专业背景的原因, 现有的实验在分析过程中主要集中在探讨现象的生理机制成因上, 对于语言特征的分析相对较薄弱。在未来的研究过程中, 语言学界的学者可以凭借自身的语言学背景优势, 在生

理机制分析之外, 从语言特征的角度出发, 探讨材料的形态、句法结构、语义、语用等等对受试实验结果的影响, 从而对实验进行更为完善的分析。

基金项目

项目一: 2023 年度广州工商学院科研重点培育项目: 口译员政治话语介导中的情绪加工机制研究(KYPY2023024); 项目二: 2023 年度广州工商学院校级科研项目: 政治隐喻认知翻译理论视角下的粤港澳大湾区形象自塑路径研究(KYYB202312)。

参考文献

- [1] 耿立波, 杨亦鸣. 基于 ERP 实验的二语句子阅读能力的心理现实性研究[J]. 外语教学理论与实践, 2014(3): 23-29.
- [2] He, Q., Xue, G., Chen, C., Chen, C., Lu, Z.-L. and Dong, Q. (2013) Decoding the Neuroanatomical Basis of Reading Ability: A Multivoxel Morphometric Study. *Journal of Neuroscience*, **33**, 12835-12843. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0449-13.2013>
- [3] Norton, E.S. and Wolf, M. (2012) Rapid Automatized Naming (RAN) and Reading Fluency: Implications for Understanding and Treatment of Reading Disabilities. *Annual Review of Psychology*, **63**, 427-452. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100431>
- [4] Lin, F., Liu, Y., Lee, H., Chang, C.H.C., Jaaskelainen, I.P., Yeh, J., et al. (2019) Differential Brain Mechanisms during Reading Human vs. Machine Translated Fiction and News Texts. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 13251. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49632-w>
- [5] Buchweitz, A., Mason, R.A., Tomitch, L.M.B. and Just, M.A. (2009) Brain Activation for Reading and Listening Comprehension: An fMRI Study of Modality Effects and Individual Differences in Language Comprehension. *Psychology & Neuroscience*, **2**, 111-123. <https://doi.org/10.3922/j.psns.2009.2.003>
- [6] 刘梦醒. 自然语言理解中语义整合的神经机制[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
- [7] 徐舒, 李泓钰, 杜晓霞, 等. 经颅直流电刺激治疗卒中后失语研究进展[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2018, 18(6): 461-466.
- [8] Nitsche, M.A., Niehaus, L., Hoffmann, K.T., Hengst, S., Liebetanz, D., Paulus, W., et al. (2004) MRI Study of Human Brain Exposed to Weak Direct Current Stimulation of the Frontal Cortex. *Clinical Neurophysiology*, **115**, 2419-2423. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.05.001>
- [9] Bhattacharjee, S., Kashyap, R., O'Brien, B.A., McCloskey, M., Oishi, K., Desmond, J.E., et al. (2020) Reading Proficiency Influences the Effects of Transcranial Direct Current Stimulation: Evidence from Selective Modulation of Dorsal and Ventral Pathways of Reading in Bilinguals. *Brain and Language*, **210**, Article 104850. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2020.104850>
- [10] Costanzo, F., Varuzza, C., Rossi, S., Sdoia, S., Varvara, P., Oliveri, M., et al. (2016) Evidence for Reading Improvement Following tDCS Treatment in Children and Adolescents with Dyslexia. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **34**, 215-226. <https://doi.org/10.3233/rmn-150561>
- [11] Thomson, J.M., Doruk, D., Mascio, B., Fregni, F. and Cerruti, C. (2015) Transcranial Direct Current Stimulation Modulates Efficiency of Reading Processes. *Frontiers in Human Neuroscience*, **9**, Article 114. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00114>
- [12] Turkeltaub, P.E., Benson, J., Hamilton, R.H., Datta, A., Bikson, M. and Coslett, H.B. (2012) Left Lateralizing Transcranial Direct Current Stimulation Improves Reading Efficiency. *Brain Stimulation*, **5**, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.04.002>
- [13] Manis, F.R., Savage, P.L., Morrison, F.J., Horn, C.C., Howell, M.J., Szeszulski, P.A., et al. (1987) Paired Associate Learning in Reading-Disabled Children: Evidence for a Rule-Learning Deficiency. *Journal of Experimental Child Psychology*, **43**, 25-43. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(87\)90049-x](https://doi.org/10.1016/0022-0965(87)90049-x)
- [14] Younger, J.W. and Booth, J.R. (2018) Parietotemporal Stimulation Affects Acquisition of Novel Grapheme-Phoneme Mappings in Adult Readers. *Frontiers in Human Neuroscience*, **12**, Article 109. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00109>
- [15] Hamada, M. and Koda, K. (2008) Influence of First Language Orthographic Experience on Second Language Decoding and Word Learning. *Language Learning*, **58**, 1-31. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9922.2007.00433.x>
- [16] Kronbichler, M., Klackl, J., Richlan, F., Schurz, M., Staffen, W., Ladurner, G., et al. (2009) On the Functional Neu-

- roanatomy of Visual Word Processing: Effects of Case and Letter Deviance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, **21**, 222-229. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21002>
- [17] Tan, L.H., Laird, A.R., Li, K. and Fox, P.T. (2005) Neuroanatomical Correlates of Phonological Processing of Chinese Characters and Alphabetic Words: A Meta-Analysis. *Human Brain Mapping*, **25**, 83-91. <https://doi.org/10.1002/hbm.20134>
- [18] Hoeft, F., Meyler, A., Hernandez, A., Juel, C., Taylor-Hill, H., Martindale, J.L., *et al.* (2007) Functional and Morphometric Brain Dissociation between Dyslexia and Reading Ability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 4234-4239. <https://doi.org/10.1073/pnas.0609399104>
- [19] Shaywitz, B.A., Shaywitz, S.E., Pugh, K.R., Mencl, W.E., Fulbright, R.K., Skudlarski, P., *et al.* (2002) Disruption of Posterior Brain Systems for Reading in Children with Developmental Dyslexia. *Biological Psychiatry*, **52**, 101-110. [https://doi.org/10.1016/s0006-3223\(2\)01365-3](https://doi.org/10.1016/s0006-3223(2)01365-3)
- [20] 彭鹏, 陶沙. 单词解码、英语语言理解和一般认知能力在汉语儿童英语阅读学习中的作用[J]. 外语教学与研究, 2009, 47(1): 30-37.
- [21] Younger, J.W., Wagner, M.R. and Booth, J.R. (2016) Weighing the Cost and Benefit of Transcranial Direct Current Stimulation on Different Reading Subskills. *Frontiers in Neuroscience*, **10**, Article 262. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00262>
- [22] Costanzo, F., Varuzza, C., Rossi, S., Sdoia, S., Varvara, P., Oliveri, M., *et al.* (2016) Reading Changes in Children and Adolescents with Dyslexia after Transcranial Direct Current Stimulation. *NeuroReport*, **27**, 295-300. <https://doi.org/10.1097/wnr.0000000000000536>
- [23] Costanzo, F., Rossi, S., Varuzza, C., Varvara, P., Vicari, S. and Menghini, D. (2019) Long-Lasting Improvement Following tDCS Treatment Combined with a Training for Reading in Children and Adolescents with Dyslexia. *Neuropsychologia*, **130**, 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.016>
- [24] Heth, I. and Lavidor, M. (2015) Improved Reading Measures in Adults with Dyslexia Following Transcranial Direct Current Stimulation Treatment. *Neuropsychologia*, **70**, 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.02.022>
- [25] Rios, D.M., Correia Rios, M., Bandeira, I.D., Queiros Campbell, F., de Carvalho Vaz, D. and Lucena, R. (2018) Impact of Transcranial Direct Current Stimulation on Reading Skills of Children and Adolescents with Dyslexia. *Child Neurology Open*, **5**, 1-8. <https://doi.org/10.1177/2329048x18798255>
- [26] 杨慧, 郭熙煌. 句法-语义启动的认知机制研究[J]. 湖北大学学报(哲学社会科学版), 2018, 45(4): 144-150.
- [27] Weltman, K. and Lavidor, M. (2013) Modulating Lexical and Semantic Processing by Transcranial Direct Current Stimulation. *Experimental Brain Research*, **226**, 121-135. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3416-5>
- [28] Price, A.R., Peelle, J.E., Bonner, M.F., Grossman, M. and Hamilton, R.H. (2016) Causal Evidence for a Mechanism of Semantic Integration in the Angular Gyrus as Revealed by High-Definition Transcranial Direct Current Stimulation. *The Journal of Neuroscience*, **36**, 3829-3838. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3120-15.2016>