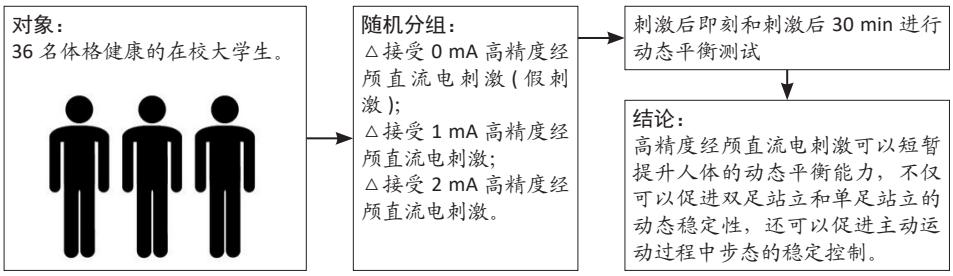
高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡能力的影响

https://doi.org/10.12307/2022.823
投稿日期：2021-07-30
采用日期：2021-09-15
修回日期：2021-10-21
在线日期：2021-11-23
中图分类号：
R459.9；R394.2；R542.2
文章编号：
2095-4344(2022)26-04192-07
文献标识码：B

乔淇淇[1]，吴翊馨[2]，王 新[3]，夏忠梁[4]

文章快速阅读：



文题释义：

经颅直流电刺激：是一种利用恒定、低强度直流电(1.0–2.0 mA)调节皮质神经元活动的非入侵式脑神经调控技术。阳极经颅直流电刺激可促进神经元去极化产生兴奋，阴极经颅直流电刺激可导致神经元超极化产生抑制；阳极经颅直流电刺激能够提升人体在平衡任务中的运动表现，改善人体的平衡能力。

动态平衡能力：人体在运动过程中及特定的运动情境下，受外力作用时自动调整并维持身体姿势的能力。

摘要

背景：高精度经颅直流电刺激在促进认知和运动行为提升方面有巨大潜力，其可提升人体的静态平衡能力。

目的：探究高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡能力的影响。

方法：招募沈阳体育学院36名健康学生为试验对象，男24名，女12名，随机数字表法分3组，分别接受电流强度为0(假刺激)，1，2 mA的阳极高精度经颅直流电刺激，刺激20 min。刺激前及刺激后即刻、30 min，测试受试者的动态平衡能力。研究已经通过沈阳体育学院研究伦理委员会审查，伦理字[2020]12号。

结果与结论：①受试者接受1 mA阳极高精度经颅直流电刺激后即刻、30 min的双足动态稳定指数、右足动态稳定指数均显著降低($P < 0.05$)，刺激后30 min的偏移距离显著缩短($P < 0.05$)；②受试者接受2 mA阳极高精度经颅直流电刺激后30 min的双足动态稳定指数、右足动态稳定指数均显著降低($P < 0.05$)，刺激后即刻、30 min的偏移距离显著缩短($P < 0.05$)；③不同刺激强度的阳极高精度经颅直流电刺激改善人体动态平衡的效果无差异($P > 0.05$)；④结果表明，高精度经颅直流电刺激可以短暂提升人体的动态平衡能力，不仅可以促进双足站立和单足站立的动态稳定性，还可以促进主动运动过程中步态的稳定控制。

关键词：高精度；经颅直流电刺激；动态平衡；作用机制；健康大学生；动态稳定；偏移距离；平衡能力

Effect of high-definition transcranial direct current stimulation on human dynamic balance

Qiao Qiqi[1], Wu Yixin[2], Wang Xin[3], Xia Zhongliang[4]

[1]Department of Postgraduate, [2]School of Sports Human Sciences, [3]Sports Social Science Research Center, [4]School of Physical Education, Shenyang Sport University, Shenyang 110102, Liaoning Province, China

Qiao Qiqi, Master, Department of Postgraduate, Shenyang Sport University, Shenyang 110102, Liaoning Province, China

Corresponding author: Xia Zhongliang, PhD, Professor, School of Physical Education, Shenyang Sport University, Shenyang 110102, Liaoning Province, China

Abstract

BACKGROUND: High-definition transcranial direct current stimulation has great potential in promoting the improvement of cognition and motor behavior, which can improve the body's static balance ability.

OBJECTIVE: To investigate the effect of high-definition transcranial direct current stimulation on the body's dynamic balance.

METHODS: A total of 36 healthy students from Shenyang Sport University were recruited as test subjects, including 24 males and 12 females. They were divided into three groups by a random number table method, followed by anodic high-definition transcranial direct current stimulation with different current intensities of 0 (sham stimulation), 1, and 2 mA for 20 minutes. The dynamic balance ability was tested before stimulation and immediately and 30 minutes after stimulation. The study protocol was approved by the Institutional Review Board of Shenyang Sport University (approval No. [2020]12).

沈阳体育学院，[1]研究生工作部，[2]运动人体科学学院，[3]体育社会科学研究中心，[4]体育教育学院，辽宁省沈阳市 110102

第一作者：乔淇淇，男，1993 年生，河南省焦作市人，汉族，2021 年沈阳体育学院毕业，硕士，主要从事动作技能学习与神经控制方面的研究。

通讯作者：夏忠梁，博士，教授，沈阳体育学院体育教育学院，辽宁省沈阳市 110102

https://orcid.org/0000-0002-1107-2689 (乔淇淇)

基金资助：国家重点研发计划项目 (2018YFF0300502)，课题名称：冬季项目平衡稳定控制和动作模式最优化模型的关键技术研究与应用，项目负责人：王新

引用本文：乔淇淇，吴翊馨，王新，夏忠梁 . 高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡能力的影响 [J]. 中国组织工程研究，2022，26(26):4192-4198.

RESULTS AND CONCLUSION: The subject's bipedal dynamic stability index and right-foot dynamic stability index were significantly reduced immediately and 30 minutes after 1 mA stimulation ($P < 0.05$). The offset distance was significantly shortened at 30 minutes after 1 mA stimulation ($P < 0.05$). The subject's bipedal dynamic stability index and right-foot dynamic stability index were significantly reduced 30 minutes after 2 mA stimulation ($P < 0.05$). The offset distance was significantly shortened immediately and 30 minutes after 2 mA stimulation ($P < 0.05$). Anodic high-definition transcranial direct current stimulation with different current intensities showed no different effects in improving the dynamic balance of the human body ($P > 0.05$). To conclude, high-definition transcranial direct current stimulation can temporarily improve the dynamic balance ability. It cannot only increase the dynamic stability when standing on single and both feet, but also promote gait stability during active exercises.
Key words: high-definition; transcranial direct current stimulation; dynamic balance; mechanism of action; healthy college students; dynamic stability; offset distance; balance ability

Funding: *the National Key Research and Development Program of China, No. 2018YFF0300502 (to WX)*
How to cite this article: *QIAO QQ, WU YX, WANG X, XIA ZL. Effect of high-definition transcranial direct current stimulation on human dynamic balance. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2022;26(26):4192-4198.*

0 引言 Introduction

平衡能力是确保人们保持稳定的站立、行走及完成复杂动作的基本能力[1]。HRYSOMALLI[2]、KIERS等[3]指出，平衡能力与运动表现的提升密切相关(如垂直跳跃、短跑、改变方向的任务)。在特定的运动条件下，卓越的平衡表现是成为一名高水平运动员的重要先决条件，更是平衡类主导技巧类运动员制胜的关键。WITTENBERG等[4]的研究表明，大脑皮质活动高度参与平衡运动的计划和执行；神经影像学数据也显示，动态平衡任务中的平衡学习与运动相关区域的脑功能结构改变之间存在密切关联[5]。HORNYAK[6]强调未来体育训练不仅要注重身体运动能力的训练，更要注重大脑的训练。

经颅直流电刺激是一种利用恒定、低强度直流电(1.0–2.0 mA)调节皮质神经元活动的非入侵式脑神经调控技术[7]，阳极经颅直流电刺激可促进神经元去极化产生兴奋，阴极经颅直流电刺激可导致神经元超极化产生抑制[8]。阳极经颅直流电刺激能够提升人体在平衡任务中的运动表现，改善人体平衡能力[9-13]，但也存在因经颅直流电刺激技术刺激参数设置差异及刺激聚集性差等原因未能改善受试者的平衡能力[14-15]。高精度经颅直流电刺激由较小的“高精度”电极阵列组成，可以弥补传统经颅直流电刺激电流分散而无法精确刺激靶向脑区聚焦性差的不足，提高调控大脑的精度[16-17]，优化经颅直流电刺激技术的应用[18]，促进大脑皮质与运动行为产生更加紧密的联系。

肖松林等[19]采用阳极高精度经颅直流电刺激健康成年人的初级运动皮质(M1)，刺激后即刻受试者单足闭眼站立时重心左右、前后平均摆动速度显著降低，改善了人体静态平衡能力，但研究未能对人体运动过程中所需的动态平衡能力展开研究。梳理现有研究成果发现，鲜有高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡能力的相关研究。此次研究通过高精度经颅直流电刺激技术对健康受试者的初级运动皮质进行刺激干预，探究高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡能力的影响效果，并浅析高精度经颅直流电刺激对改善人体动态平衡能力的作用机制。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 随机对照单盲设计试验，对参与试验的受试对象盲法，计量资料比较采用重复测量方差分析(Repeated Measures ANOVA)、单因素方差分析。

1.2 时间及地点 试验于2020年11–12月在沈阳体育学院科技楼平衡实验室完成。

1.3 对象 招募36名健康在校大学生作为研究对象，其中男24名，女12名，年龄(23.7±1.6)岁。将研究对象采用随机数字表法分成3组，分别为假刺激组、1 mA直流电刺激组与2 mA直流电刺激组，每组12名受试者。假刺激组刺激电流强度为0 mA。

受试者均为右利手，近半年内下肢无运动损伤，且无皮肤过敏、体内无金属植入物，无经颅直流电刺激禁忌证。受试者在每次试验前24 h无剧烈活动，试验前4 h内未服用含有咖啡因等兴奋神经的饮料。受试者在试验前了解高精度经颅直流电刺激的基本情况，清楚试验意图和试验流程，并签署知情同意书。研究已经通过沈阳体育学院研究伦理委员会审查，伦理字[2020]12号。

1.4 材料

1.4.1 试验仪器 采用美国Soterix medical公司生产的经颅直流电刺激仪(型号1300A)和高精度转换器(型号4x1-C3A)用于受试者刺激干预，直流模式电流强度调节范围0–2 mA，刺激电极由5个直径约为1 cm的环形电极组成，最大电压为18 V。

1.4.2 平衡测试仪 采用意大利生产的Tecnobody平衡测试系统(型号Pk252)测试受试者动态平衡，包括双脚站立及左、右单足站立测试3种动态平衡能力测试模式。

1.5 方法

1.5.1 刺激方案 受试者根据分组情况接受不同的刺激，刺激电流强度由电池驱动的电刺激器进行调整。刺激脑区为初级运动皮质(M1区)，采用电极帽辅助定位，刺激使用5个环形电极，连接于直流电刺激仪器，中心电极定义为提供阳极刺激的电极，放置于Cz位置，其余4个返回电极分别放置于CP1、CP2、FC1、FC2，刺激时长统一为20 min[20]，在刺激过程中要求受试者保持静坐，避免外界干扰和其他刺激，见**图1**。

① 1 mA直流电刺激组：操作人员30 s内将电流从0 mA增加1 mA，刺激结束时电流在30 s的时间内自动下降到0 mA；② 2 mA直流电刺激组：操作人员30 s内将电流从0 mA增加

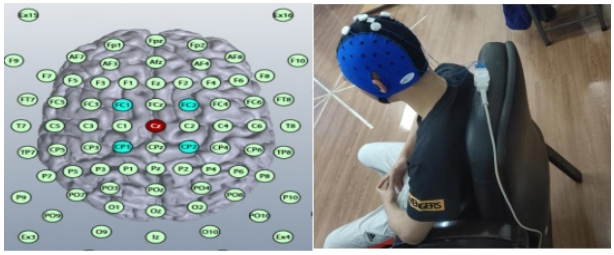
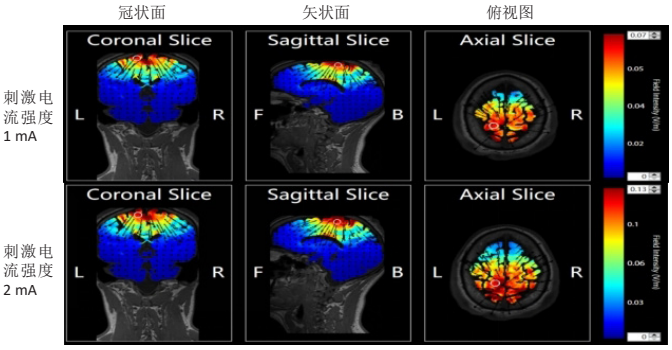


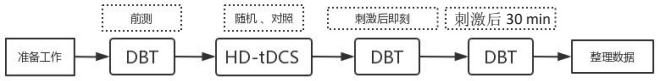
图 1 | 电极位置 (左) 及受试者干预示意图 (右)
Figure 1 | Electrode position (left) and subject intervention diagram (right)

到 2 mA，刺激结束时电流在 30 s 的时间内自动下降到 0 mA；③假刺激组：在开始阶段和结束过程模拟真实刺激，电流释放 30 s，刺激期间电流自动降回零。刺激方案除刺激电流强度不同外，其他条件均相同。根据研究中刺激参数及刺激脑区的选择，采用 HD-explore 软件模拟电流强度为 1 mA 和 2 mA 的高精度经颅直流电刺激初级运动皮质 (M1)，电流在大脑皮质区域的走向及电场情况，见**图 2**。



图注：白圈为刺激区域
图 2 | 刺激电场分布图
Figure 2 | Distribution of stimulating electric field

1.5.2 试验流程 受试者根据试验分组进行电刺激干预，在刺激前 1 周及刺激后即刻、刺激后 30 min 进行动态平衡测试任务，试验流程见**图 3**。



图注：DBT 为动态平衡测试；HD-tDCS 为高精度经颅直流电刺激
图 3 | 试验流程图
Figure 3 | Trial flow chart

试验前记录受试者的基本信息，讲解测试项目的注意事项，并集中向受试者演示动态平衡测试项目的测量方法，确保每名受试者明晰测量方法，告知所有受试者私下不得进行练习，避免熟悉程度影响平衡任务的测试结果。受试者需提前穿着宽松运动服或更换运动服装，并根据提示完成相应的动态平衡测试项目，所有受试者参与平衡任务的次数相同。

1.5.3 动态平衡测试

平衡测试仪测试：受试者在操作人员指导下双脚站立于 Tecnobody 平衡测试系统上，目视前方，完成 30 s 双足睁眼站立及左、右单足睁眼站立 3 种状态下的动态平衡能力测试，检测动态稳定指数。动态稳定指数越低动态平衡能力越好。双足睁眼站立时双足不得移动或离开踏板，双手置于体侧；单足睁眼站立时抬起腿与支撑腿呈 90°，双手叉腰。

闭目原地踏步测试：受试者闭眼并脚站立，在听到“开始”口令后以每分钟 120 步的频率踏步 30 s，要求踏步高度与支撑脚踝关节等高。开始前记录两脚跟中点的位置，停止踏步后再次记录两脚跟中点位置，测量 2 次记录脚跟中点位置之间距离 [21]，为偏移距离。偏移距离越短动态平衡能力越好。

1.6 主要观察指标 3 组受试者不同状态下的动态稳定指数与闭目原地踏步的偏移距离。

1.7 统计学分析 将测试得到的原始数据收集整理，使用 SPSS 23.0 软件进行统计分析，试验结果数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示，采用重复测量方差分析 (Repeated Measures ANOVA)、单因素方差分析 (one-way ANOVA) 等方法进行检验，组内采用配对样本 t 检验，显著性水平 α 设为 0.05。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 按意向性分析处理，36 名受试者全部进入结果分析。

2.2 试验分组流程 见**图 4**。

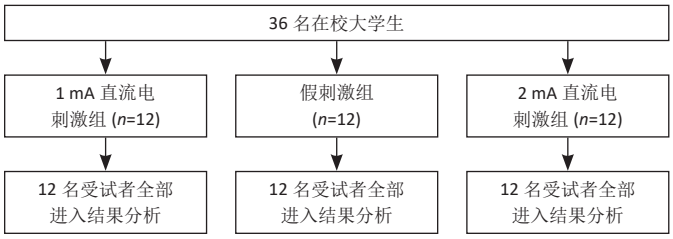


图 4 | 试验分组流程图
Figure 4 | Flow chart of subject assignment

2.3 各组受试者基线资料比较 见**表 1**。

表 1 | 受试组基本信息及刺激前动态平衡情况 (*n*=12)
Table 1 | Basic information and dynamic balance of subjects before stimulation

项目		1 mA 直流电刺激组	2 mA 直流电刺激组	假刺激组	*P* 值
男 / 女 (*n*)		8/4	8/4	8/4	1.00
年龄 ($\bar{x}\pm s$，岁)		24.08±1.24	23.67±1.97	23.33±1.60	0.54
身高 ($\bar{x}\pm s$，cm)		172.92±7.73	172.25±6.26	174.08±7.50	0.82
体质量 ($\bar{x}\pm s$，kg)		65.83±16.14	66.71±20.28	65.42±11.37	0.98
体质量指数 ($\bar{x}\pm s$，kg/m^2)		21.75±3.88	22.21±2.61	22.32±3.83	0.91
动态稳定指数 ($\bar{x}\pm s$)	双足	1.80±0.68	1.81±0.28	1.81±0.26	0.99
	左足	1.99±0.97	1.86±0.54	1.68±0.58	0.56
	右足	2.73±1.35	2.84±1.35	2.74±1.51	0.97
偏移距离 ($\bar{x}\pm s$，cm)		62.40±30.70	59.19±25.53	61.52±39.36	0.97

运用 LSD 方法事后检验表明，3 组受试者试验前各项评价指标参数处于同一水平，组间均无差异，分组具有同质性。

2.4 各组受试者动态平衡能力测试结果 见**图 5**。

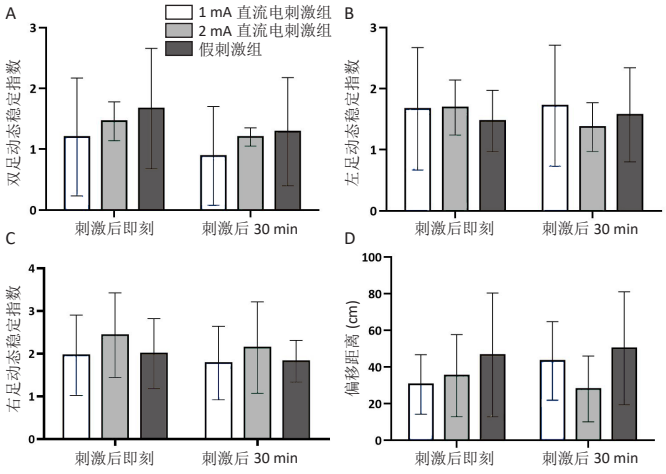


图 5 | 各组受试者刺激后即刻与刺激后 30 min 的动态平衡本能力
Figure 5 | **Dynamic balance ability of the subjects immediately and 30 minutes after stimulation**

2.4.1 动态稳定指数测试结果 见**表 2**。

表 2 | 高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡的影响 ($\bar{x}\pm s$，n=12)
Table 2 | **Effects of high-definition transcranial direct current stimulation on human dynamic balance**

项目	1 mA 直流电刺激组		
	刺激前	刺激后即刻	刺激后 30 min
双足动态稳定指数	1.80±0.68	1.20±0.97[a]	0.89±0.81[a]
左足动态稳定指数	1.99±0.97	1.67±1.00	1.72±0.99
右足动态稳定指数	2.73±1.35	1.96±0.94[a]	1.78±0.86[a]
偏移距离 (cm)	62.4±30.70	30.56±16.23[a]	43.38±21.43
项目	2 mA 直流电刺激组		
	刺激前	刺激后即刻	刺激后 30 min
双足动态稳定指数	1.81±0.28	1.46±0.32	1.20±0.15[a]
左足动态稳定指数	1.86±0.54	1.69±0.45	1.37±0.40[a]
右足动态稳定指数	2.84±1.35	2.43±0.99	2.14±1.07
偏移距离 (cm)	59.19±25.53	35.35±22.38[a]	28.06±17.94[ab]
项目	假刺激组		
	刺激前	刺激后即刻	刺激后 30 min
双足动态稳定指数	1.81±0.26	1.67±0.99	1.29±0.89
左足动态稳定指数	1.68±0.58	1.47±0.50	1.57±0.77
右足动态稳定指数	2.74±1.51	2.00±0.82	1.82±0.49
偏移距离 (cm)	61.52±39.36	46.62±33.73	50.25±30.82

表注：与刺激前比较，[a]P < 0.05；与假刺激组比较，[b]P < 0.05

假刺激组刺激前后的双足动态稳定指数比较差异无显著性意义 (P > 0.05)，刺激前后的单足动态稳定指数比较差异无显著性意义 (P > 0.05)。1 mA 直流电刺激组刺激后即刻和刺激后 30 min 的双足动态稳定指数显著低于刺激前 (P=0.009，P=0.012)；2 mA 直流电刺激组刺激后 30 min 的双足动态稳定指数显著低于刺激前 (P=0.03)。刺激条件与时间 (刺激前、刺激后即刻、刺激后 30 min) 无交互作用 (F=0.507，P=0.73)。2 mA 直流电刺激组刺激后 30 min 的左足动态稳定指数显著低于刺激前 (P=0.019)。刺激条件与时间 (刺激前、刺激后即刻、刺激后 30 min) 无交互作用 (F=1.486，P=0.217)。1 mA 直流电刺激组刺激后即刻和刺激后 30 min 的右足动态稳定指数显著低于刺激前 (P=0.031，P=0.016)。刺激条件与时间 (刺激前、刺激后即刻、刺激后 30 min) 无交互作用 (F=0.237，P=0.895)。刺激后即刻，3 组间双足动态稳定指数比较差异无显著性意义 (P >0.05)，3 组间单足动态稳定指数比较差异无显著性意义 (P >0.05)。刺激后 30 min，3 组间双足动态稳定指数比较差异无显著性意义 (P >0.05)，3 组间单足动态稳定指数比较差异无显著性意义 (P >0.05)。

2.4.2 偏移距离 见表 2。

1 mA 直流电刺激组刺激后即刻的偏移距离显著短于刺激前 (P=0.009)，2 mA 直流电刺激组刺激后即刻和刺激后 30 min 的偏移距离显著短于刺激前 (P=0.009，P=0.001)。3 组组内刺激后即刻与刺激后 30 min 的偏移距离比较差异均无显著性意义 (P > 0.05)。刺激后即刻，3 组间偏移距离比较差异无显著性意义 (P > 0.05)；刺激后 30 min，2 mA 直流电刺激组偏移距离显著短于假刺激组 (P < 0.05)，其余组间两两比较差异均无显著性意义 (P > 0.05)。刺激条件与时间 (刺激前、刺激后即刻、刺激后 30 min) 无交互作用 (F=1.419，P=0.238)。

2.5 不良反应 电刺激过程中受试者头部皮质产生的轻微痒感在电刺激结束后消失。整个试验过程未发生任何不良反应。

3 讨论 Discussion

3.1 高精度经颅直流电刺激对人体动态平衡能力的影响 此次研究选择 36 名健康大学生作为受试对象，接受电流强度为 1，2 mA 的阳极高精度直流电刺激与假刺激，分析受试者在刺激前与刺激后 (刺激后即刻和刺激后 30 min) 的动态平衡评价指标参数变化，旨在探究高精度经颅直流电对人体动态平衡能力的影响效果。研究发现，1 mA 阳极高精度经颅直流电刺激后 (即刻和刺激后 30 min) 的双足动态稳定指数显著低于刺激前；1 mA 阳极高精度经颅直流电刺激后 (即刻和刺激后 30 min) 的右足动态稳定指数显著低于刺激前；2 mA 阳极高精度经颅直流电刺激后 (即刻和刺激后 30 min) 偏移距离显著短于刺激前；不同刺激强度 (1，2 mA) 的高精度经颅直流电刺激在改善人体动态平衡能力效果上无显著差异。

3.1.1 动态稳定指数分析 动态稳定指数作为评价人体动态姿势稳定性指标，可以客观反映人体的动态平衡能力。中枢神经系统主要通过对视觉、前庭感觉和本体感觉的有效整合及其对效应器 (主要指肌肉) 的协调控制来维持人体的平衡 [22]，大脑和脊髓作为中枢神经系统的组成部分对调节和控制人体的姿势平衡具有关键作用。受试者双足或单足站立于压力板上，为维持不稳支撑面的平衡，一方面需要大脑精确的控制身体姿势，另一方面需要下肢肌肉系统、踝关节和足部功能的协调配合。此次研究发现，阳极高精度经颅直流电刺激初级运动皮质后双足和单足动态稳定指数显著降低，这表明阳极高精度经颅直流电刺激能够改善受试者双足和单足站立时的动态稳定性，提升受试者的动态平衡能力。以往

研究表明，阳极经颅直流电刺激能够诱导刺激皮质的兴奋，增强大脑皮质脊髓和脊髓网络活性[7, 23]，这些活性的增强能够对站立平衡的相关反射产生积极影响，增强受试者的动态稳定性。另外，受试者双足和单足站立动态稳定性的改善与阳极经颅直流电刺激后能够增强下肢腿部和踝关节肌力关系密切[19, 24-25]。值得注意的是，阳极高精度经颅直流电刺激后即刻右足站立动态稳定指数呈显著降低，而左足站立动态稳定指数刺激后却无显著变化，分析原因认为：此次研究所选择的受试对象为右利手，其优势腿多为左腿，可能与优势腿已经具有较好的神经控制而非优势腿的神经控制较差有关。

3.1.2 偏移距离分析 发展人体的动态平衡 (如步态的稳定控制) 对日常生活预防跌倒、体育运动中预防损伤和提升运动表现具有重要意义。闭目原地踏步偏移距离的长短反映了人体主动运动过程中的平衡能力。此次研究发现，阳极高精度经颅直流电刺激后偏移距离显著缩短，这表明高精度经颅直流电刺激后有助于受试者步态的稳定与控制。在缺失视觉输入的情况下，人体稳定的步态需要大脑皮质和皮质下相关脑功能更加复杂的激活。受试者偏移距离的改善，可能与阳极高精度经颅直流电刺激后激活和加强初级运动皮质 (M1) 执行躯体运动控制的相关功能有关。另外，受试者参与并完成闭眼原地踏步偏移测试的过程，也是学习和掌握稳定步态控制技能的过程，有研究显示阳极经颅直流电刺激后能够加速动作适应[26-27]，促进运动技能的习得[28-29]。POORTVLIET 等[30] 的研究表明，经颅直流电刺激可以提高健康个体的姿势适应能力。因此，作者认为阳极高精度经颅直流电刺激后加速了闭眼原地踏步任务的适应和掌握，表现为偏移距离的显著缩短。

另外，阳极高精度经颅直流电刺激组刺激后动态稳定指数、偏移距离均低于假刺激组，但组间却未达显著性，分析造成该结果的原因：①一方面与刺激脑区的精确定位有一定关系，经颅直流电刺激后所产生的刺激效应与靶向脑区的定位是否准确密切相关。KAMINSKI 等[11] 应用阳极高精度经颅直流电刺激健康成年人初级运动皮质 (M1) 腿区，研究结果表明，阳极刺激组在动态平衡任务中保持平衡状态的时间较假刺激组显著增加，提升了受试者的动态平衡能力。该学者的研究基于经颅磁刺激测量峰值坐标来确定刺激目标脑区，之后采用功能核磁共振与脑电图进行验证，脑区定位精准。此次研究采用电极帽辅助定位，尽管动态平衡评价指标 (动态稳定指数、偏移距离) 在刺激前后有显著变化，但与上述学者相比脑区定位方法有所不同。②另一方面，此次研究结果可能与高精度经颅直流电刺激技术干预次数有关，仅通过单次阳极高精度经颅直流电刺激提升人体的刺激效果可能有限。另外，由于受试者在颅骨厚度、脑脊液容量、皮质之间的距离等方面可能存在一定的个体差异，以及对经颅直流电刺激的敏感程度不同等也可能是组间结果未达显著性的又一个原因。

3.1.3 电流刺激强度分析 刺激电流强度作为影响脑区电场强度的重要刺激参数，对刺激产生的行为效益有重要作用。此次研究采用不同电流强度 (1，2 mA) 的高精度经颅直流电刺激，刺激后即刻和刺激后 30 min 的动态稳定指数与偏移距离均有降低，但两种刺激电流强度改善人体动态平衡的效果无显著差异。PAPAZOVA 等[31] 采用不同刺激强度 (1，2 mA) 的经颅直流电刺激健康受试者背外侧前额叶皮质，发现不同刺激强度的经颅直流电刺激后工作记忆性能之间无差异，与此次研究结果相似。

另外，此次研究结果显示，2 mA 直流电刺激组在刺激后改善人体动态稳定性和步态稳定的效果不如 1 mA 直流电刺激组，这表明采用更高的刺激电流强度并不能增强动态平衡的改善效果。ESMAEILPOUR 等[32] 也指出，没有充分的证据显示。增加刺激电流强度可以提升经颅直流电改善人体运动能力的刺激效果。这提示，高效提升人体运动能力所需最佳的刺激参数仍需进行深入的研究。

3.2 高精度经颅直流电刺激改善动态平衡能力的作用机制

3.2.1 改变参与运动的肌力及方向编码 高精度经颅直流电刺激能够促进动态平衡能力的改善，可能与改变参与运动的肌力及方向编码密切相关。初级运动皮质 (M1) 位于中央前回，其功能是发出运动控制指令及参与运动编码 —— 肌力编码和运动方向编码，少数初级运动皮质神经元的放电活动与肌力改变速度有关[33]。已有研究证明经颅直流电刺激初级运动皮质 (M1) 能够增强人体上肢或下肢的肌肉力量[34-37]，而增强下肢力量、核心力量及核心稳定性能够提升人体的静态、动态平衡能力[38-39]，分析认为：经颅直流电刺激初级运动皮质 (M1) 后肌力与速度编码功能的神经元活跃，肢体的肌力、速度得到增强和改变，从而提升了人体的平衡能力。KAMINSKI 等[11] 采用阳极经颅直流电刺激初级运动皮质 (M1)，延长了受试者在动态平衡任务中保持平衡的时间，该学者认为：经颅直流电刺激增强了初级运动皮质 (M1) 对下肢肢体速度的控制，促进受试者在动态平衡任务中平衡时间的保持；经颅直流电刺激增强了人体运动系统的自适应过程，改善了初级运动皮质调节肢体的运动控制，有助于根据个体任务需求调整躯体动作。

3.2.2 修正和调节大脑皮质参与运动规划与执行 高精度经颅直流电刺激能够促进动态平衡能力的改善，可能与修正和调节大脑皮质参与运动规划与执行有关。辅助运动皮质区域的神经元活动主要在复杂运动的编码、运动的准备、整合感觉信息与运动的联系三方面发挥重要作用，该皮质高度参与粗大运动技能任务的规划和执行[40]。侯莉娟等[41] 采用全脑功能磁共振技术证明了双侧辅助运动皮质参与上下肢随意运动的执行。HUPFELD 等[42] 的研究结果表明，应用阳极经颅直流电刺激辅助运动皮质缩短了受试者在动态平衡任务中达到平衡状态的时间，该学者认为经颅直流电刺激调节了辅助

运动皮质参与平衡任务的计划与准备，从而促进了平衡能力提升。

3.2.3 加强各皮质间的连接及信息整合 高精度经颅直流电刺激能够促进动态平衡能力的改善，可能与加强各皮质间的连接及信息整合有关。人体运动、认知和记忆的产生与对应解剖位置的脑区密切相关，而且各脑区之间又存在紧密的联系[43]。阳极经颅直流电刺激能够显著增强刺激脑半球间运动前区、运动区及感觉运动皮质相关区域的功能性连接[44]，调整局部皮质与大脑网络的连接[45]。

小脑是重要的皮质下躯体运动调节中枢，虽然不能直接发起随意运动，但其可以通过与其他神经中枢协调进而配合大脑皮质完善和控制躯体动作。小脑白质束是小脑与其他大脑区域的主要连接器，而小脑蚓部是平衡和姿势控制的关键区域之一[46-47]。EHSANI 等[48] 的研究表明，应用阳极经颅直流电刺激小脑脑区增加了浦肯野细胞 (Pukinje cell) 的活性，加强了小脑蚓部和白质束的功能与信息连接，显著改善了受试者的姿势稳定与平衡能力。

3.3 结论 高精度经颅直流电刺激可以短暂提升人体的动态平衡能力，不仅可以促进双足站立和单足站立的动态稳定性，还可以促进主动运动过程中步态的稳定控制。单一增加刺激电流强度并不能显著提升人体动态平衡能力。

3.4 研究展望 未来研究可以借助功能核磁共振成像、正电子发射断层扫描及脑电图技术，进一步探究高精度经颅直流电刺激技术提升人体平衡能力的神经机制。设计身体平衡训练与高精度经颅直流电刺激联合刺激方案，开展长期干预研究，进一步探究联合刺激方案对改善人体平衡能力的作用效果。未来尝试将高精度经颅直流电刺激技术应用于技能主导类难美项群运动项目中，科技助力竞技体育，提升运动员运动表现水平。

作者贡献：第一作者和通讯作者进行试验设计，试验实施为第一作者，试验评估为第二、三作者，第一作者撰写、修改论文，第二、三作者负责论文修订与基金支持，夏忠梁审校。

经费支持：该文章接受了“国家重点研发计划项目 (2018YFF0300502)”的资助。所有作者声明，经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突：文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

机构伦理问题：研究已经通过沈阳体育学院研究伦理委员会审查，伦理字[2020]12 号。

知情同意问题：受试者在试验前了解高精度经颅直流电刺激的基本情况，清楚试验意图和流程，并签署知情同意书。

写作指南：该研究遵守《随机对照临床试验研究报告指南》(CONSORT 指南)。

文章查重：文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。

文章外审：文章经小同行外审专家双盲外审，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

前瞻性临床研究数据开放获取声明：文章作者同意：①可以在一定范围内开放研究参与者去标识的个体数据；②可以在一定范围内开放共享文章报告结果部分的去标识个体基础数据，包括正文、表、图及附件；③可以在一些情况下开放研究方案和知情同意书等相关文档；④全文开放获取数据的时间是从文章出版后即刻，并无终止日期。

生物统计学声明：该文统计学方法已经沈阳体育学院生物统计学专家审核。

文章版权：文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明：这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名－非商业性使用－相同方式共享 4.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

[1] 刘阳 . 人体平衡能力测试方法及平衡能力训练的研究进展 [J]. 沈阳体育学院学报 ,2007,26(4):75-77.
[2] HRYSOMALLIS C. Balance ability and athletic performance. Sports Med. 2011; 41(3):221-232.
[3] KIERS H, VAN DIEEN J, DEKKERS H, et al. A systematic review of the relationship between physical activities in sports or daily life and postural sway in upright stance. Sports Med. 2013;43(11):1171-1189.
[4] WITTENBERG E, THOMPSON J, NAM CS, et al. Neuroimaging of Human Balance Control: A Systematic Review. Front Hum Neurosci. 2017;11:170.
[5] TAUBERT M, DRAGANSKI B, ANIWANDER A, et al.Dynamic Properties of Human Brain Structure: Learning-Related Changes in Cortical Areas and Associated Fiber Connections. J Neurosci. 2010; 30(35): 11670-11677.
[6] HORNYAK T. Smarter,not harder. Nature. 2017;549(7670):S1-S3.
[7] NITSCHE MA, PAULUS W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation. J Physiol. 2000;527(3): 633-639.
[8] BIABANI M, AMINITEHRANI M, ZOGHI M, et al. The effects of transcranial direct current stimulation on short interval intracortical inhibition and intracortical facilitation: a systematic review and meta-analysis. Rev Neurosci. 2017;29:99-114.
[9] SOHN MK, JEE SJ, KIM YW. Effect of transcranial direct current stimulation on postural stability and lower extremity strength in hemiplegic stroke patients. Ann Rehabil Med. 2013;37:759-765.
[10] LATTARI E, COSTA SS, CAMPOS C, et al. Can transcranial direct current stimulation on the dorsolateral prefrontal cortex improves balance and functional mobility in Parkinson’s disease? Neurosci Lett. 2017; 636:165-169.
[11] KAMINSKI E, STEELE CJ, HOFF M, et al. Transcranial direct current stimulation (tDCS) over primary motor cortex leg area promotes dynamic balance task performance. Clin Neurophysiol. 2016;127(6): 2455-2462.
[12] YOSEPHI MH, EHSANI F, ZOGHI M, et al. Multi-session anodal tDCS enhances the effects of postural training on balance and postural stability in older adults with high fall risk: primary motor cortex versus cerebellar stimulation. Brain Stimul. 2018;11(6):1239-1250.
[13] INUKAI Y, SAITO K, SASAKI R, et al.Influence of Transcranial Direct Current Stimulation to the Cerebellum on Standing Posture Control. Front Hum Neurosci. 2016;10:325.
[14] LEE Y S, YANG HS, JEONG CJ, et al. The Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Functional Movement Performance and Balance of the Lower Extremities. J Phys Ther Sci. 2012; 24(12):1215-1218.
[15] KAMINSKI E, HOFF M, RJOSKJ V, et al. Anodal Transcranial Direct Current Stimulation Does Not Facilitate Dynamic Balance Task Learning in Healthy Old Adults. Front Hum Neurosci. 2017;11:16.
[16] KUO HI, BIKSON M, DATTA A, et al. Comparing cortical plasticity induced by conventional and high-definition 4×1 ring tDCS: a neurophysiological study. Brain Stimul. 2013;6:644-648.
[17] ALAM M, TRUONG DQ, KHADKA N, et al. Spatial and polarity precision of concentric high-definition transcranial direct current stimulation (HD-tDCS). Phys Med Biol. 2016;61(12):4506-4521.
[18] BESSON P, MUTHALIB M, VASSIGNE CD, et al. Effects of Multiple Sessions of Cathodal Priming and Anodal HD-tDCS on Visuo Motor Task Plateau Learning and Retention. Brain Sci. 2020;10(11):875.
[19] 肖松林 , 周俊鸿 , 王宝峰 , 等 . 高精度经颅直流电刺激对足部肌肉力量、踝关节运动觉及静态平衡的影响 [J]. 体育科学 ,2020,40(5): 42-51.
[20] BIKSON M, GROSSMAN P, THOMAS C, et al. Safety of transcranial direct current stimulation： Evidence based update 2016. Brain Stimul. 2016;9(5):641-661.
[21] 游永豪 , 温爱玲 . 人体平衡能力测评方法 [J]. 中国康复医学杂志 , 2014, 29(11):1099-1104.
[22] 张阳 , 王强 , 宋旭 , 等 . 功能性踝关节不稳者的动态平衡能力研究 [J]. 体育科学 ,2016,36(9):54-58.
[23] RIBERTO M, ALFIERI FM, DE BENEDETTO PACHECO KM, et al. Efficacy of transcranial direct current stimulation coupled with a multidisciplinary rehabilitationprogram for the treatment of fibromyalgia. Open Rheumatol J. 2011;5(1):45-50.
[24] VARGAS VZ, BAPTISTA AF, PEREIRA GOC, et al. Modulation of isometric quadriceps strength in soccer players with transcranial direct current stimulation:A crossover study. J Strength Cond Res. 2017;32(5): 1336-1341.
[25] MOHAMMADI V, ALIZADEH M, GAIENI A. The effects of six weeks strength exercises on static and dynamic balance of young male athletes. Procedia Soc Behav Sci. 2012;31:247-250.
[26] MONAI H, OHKURA M, TANAKA M, et al.Calcium imaging reveals glial involvement in transcranial direct current stimulation-induced plasticity in mouse brain. Nat Commun. 2016;7:11100.

[27] YOUNG DR, PARIKH PJ, LAYNE CS.Non-invasive Brain Stimulation of the Posterior Parietal Cortex Alters Postural Adaptation. Front Hum Neurosci. 2020;14:248.
[28] KIDGELL DJ, GOODWILL AM, FRAZE A KR, et al. Induction of cortical plasticity and improved motor performance following unilateral and bilateral transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex. BMC Neurosci. 2013;14(1):64.
[29] VINES BW, CERRUTI C, SCHLAUG G. Dual-hemisphere tDCS facilitates greater improvements for healthy subjects'nondominant hand compared to uni-hemisphere stimulation. BMC Neurosci. 2008; 9(1):103.
[30] POORTVLIET P, HSIEH B, CRESSWELL A, et al. Cerebellar transcranial direct current stimulation improves adaptive postural control. Clin Neurophysiol. 2018;129(1):33-41.
[31] PAPAZOVA I, STRUBE W, WIENERT A, et al. Effects of 1 mA and 2 mA transcranial direct current stimulation on working memory performance in healthy participants. Conscious Cogn. 2020;83:102959.
[32] ESMAEILPOUR Z, MARANGOLO P, HAMPSTESD BM, et al. Incomplete evidence that increasing current intensity of tDCS boosts outcomes. Brain Stimul. 2018;11(2):310-321.
[33] 赵铁建 , 郭健 . 神经生理学 [M].2 版 . 人民卫生出版社 ,2018:163-164.
[34] COGIAMANIA F, MARCEGLIA S, ARDLINO G, et al. Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor corticalareas. Eur J Neurosci. 2007; 26(1): 242-249.
[35] TANAKA S, HANAKAWA T, HONDA M, et al. Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation. Exp Brain Res. 2009;196(3):459-465.
[36] TANAKA S, TAKEDA K, OTAKA Y, et al. Anodal transcranial direct-current stimulation (tDCS) enhances maximal knee-extension force in chronic stroke patients. Clin Neurophysiol. 2011;122(8):e10.
[37] HENDY AM, KIDGELL DJ. Anodal-tDCS applied during unilateral strength training increases strength and corticospinal excitability in the untrained homologous muscle. Exp Brain Res. 2014;232(10): 3243-3252.
[38] 皮红英 , 库洪安 , 赵婷 . 下肢肌力训练对老年人平衡及运动能力的影响 [J]. 解放军护理杂志 ,2017,34(12):51-54.
[39] 朱宪臣 , 景新 , 李赢 . 核心稳定性力量训练对青少年皮划艇运动员平衡能力的影响 —— 以北京市朝阳区体育运动学校皮划艇运动员为例 [J]. 中国学校体育 (高等教育),2017(3):65-71.
[40] NACHEV P, KENNARD C, HUSAN M. Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor area. Nat Rev Neurosci. 2008;9:856-869.
[41] 侯莉娟 , 周立明 , 宋争 , 等 . 随意运动控制的全脑功能磁共振成像研究 [J]. 体育科学 ,2010,30(8):62-68.
[42] HUPFELD KE, KETCHAM CJ, SCHNEIDE HD. Transcranial direct current stimulation (tDCS) to the supplementary motor area (SMA) influences performance on motor tasks. Exp Brain Res. 2016;235(3):1-9.
[43] SHAFI MM, WESTOVER MB, FOX MD, et al. Exploration and modulation of brain network interactions with noninvasive brain stimulation in combination with neuroimaging. Eur J Neurosci. 2012;35(6):805-825.
[44] MEINZER M, ANTONENKO D, LINDENBERG R, et al. Electrical brain stimulation improves cognitive performance by modulating functional connectivity and task-specific activation. J Neurosci. 2012;32(5): 1859-1866.
[45] 卞秀玲 , 王雅娜 , 王开元 , 等 . 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 ,2018,38(5):66-72.
[46] SHUMWAY-COOK A, WOOLLACOTT MH. Motor Control, Translating research into clinical practice health. Lippincott Williams&Wilkins, New York, 2012:73-76.
[47] LATASH ML. Neurophysiological basis of movement, second edtion. In 2 (ed). The pennsylvania state university, United states of america, 2008:152-157.
[48] EHSANI F, SAMAEI A, ZOGHI M, et al. The effects of cerebellar transcranial direct current stimulation on static and dynamic postural stability in older individuals: a randomized double-blind sham-controlled study. Eur J Neurosci. 2017;46(12):2875-2884.

(责任编辑：GW，ZN，ZJP)

(上接目次 2“社长的话”)

2.4 qPCR：基因信息 (靶基因和参考基因的数据库登陆号 (如：NCBI Gene 数据库：基因 id 和序列的 Accession Number)，目标核酸的结构，目的基因长度)。引物信息 (序列和浓度，结合位点。染料或探针：染料种类、探针序列)。实验设计 (内参基因的选择、复孔、阴性阳性对照)。反应体系及反应条件 [聚合酶的名称和浓度、模板量、缓冲液化学组成，反应体系总量，反应温度及循环数 (预变性 – 变性 – 退火 – 延伸)]。仪器耗材 (塑料耗材的透明度如货品，反应容器为单一管，排管还是板，制造商；当使用板时，还要提供板的密封方法)。
2.5 数据分析：标准曲线 (对第一对引物制作标准曲线来分析扩增效率)。实验组和对照组的 Ct(Cq) 值 。数据计算方法和归一化方法。数据重复性如何。统计方法和计算软件。

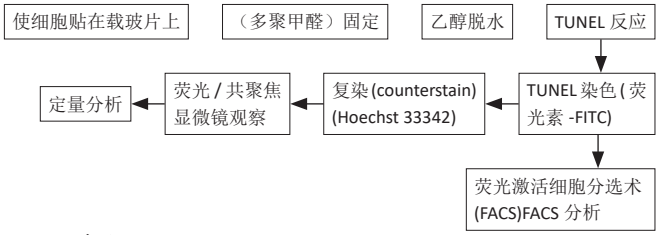
术语：
1. qPCR 指的是实时荧光定量 PCR，RT-qPCR 指反转录 qPCR。
2. 用于归一化的基因叫做参考基因 (reference gene)，而不是管家基因 (housekeeping gene)。
3. TAQMAN 探针应称为水解探针。
4. FRET 是荧光共振能量转移探针 (fluorescence resonance energy transfer probe) 的总称 。
5. LightCycler-type 探针应称为双杂交探针。
6. 定量单词不用“quantitation”，而用“quantification”。

(方法描述的要求主要来源：http://www.360doc.com/content/19/0322/18/52645714_823433224.shtml)

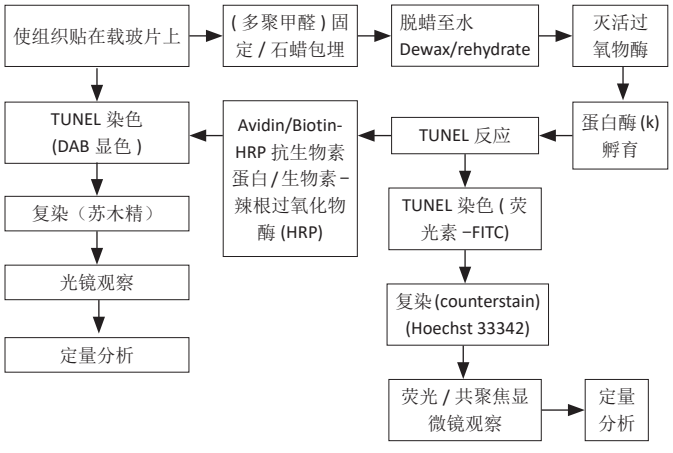
样例 1，2，3 见 https://www.cjter.com//CN/news/news29680.shtml

∴ TUNEL 染色

TUNEL 染色流程：
(1) 细胞：



(2) 组织：



(编辑：李春会)