经颅直流电刺激联合运动训练对跌倒高风险老年人平衡功能、下肢肌力和运动皮质兴奋性的影响

蔡 倩,徐 亮,杨 玺,马 明*

东南大学附属中大医院,江苏 南京 210009

* 通信作者:马明,E-mail:nj9868@163.com

收稿日期:2025-03-01;接受日期:2025-08-29

基金项目:南京市体育局体育科研局管课题资助项目(NJTY2023-102,NJTY2024-101)

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10004

摘要 **目的** 观察经颅直流电刺激(tDCS)联合运动训练对跌倒高风险老年人平衡功能、下肢肌力和运动皮质兴奋性的影响。**方法** 选择2024年1—10月在南京市岱山社区卫生服务中心、浦口中医院和迈皋桥卫生服务中心筛选出的跌倒高风险老年人90例。采用随机数字表法分为运动组、tDCS组和联合组,每组30例。干预过程因突发疾病退出者3例,其中运动组2例、tDCS组1例;因不能耐受运动训练或tDCS治疗而退出者3例,其中tDCS组1例、联合组2例。最终完成试验者共84例,每组28例。通过视频、讲座等形式对3组进行防跌倒知识的健康宣教;运动组仅接受运动训练,每天1次,每周5 d,持续训练4周;tDCS组仅接受双下肢初级运动皮层(M1)区阳极tDCS(atDCS),每天1次,每周5 d,持续治疗4周;联合组先给予双下肢M1区atDCS治疗,结束后立即进行运动训练,治疗参数、频率、周期与运动组和tDCS组一致。采用Berg平衡量表(BBS)对受试者平衡功能进行评估;采用起立-行走测试(TUG)对受试者步行能力进行评估;采用美国Biodex Medical Systems 4型等速肌力评估和训练系统对受试者双侧股四头肌峰力矩(PT)进行测定,以评估股四头肌肌力;采用YD-MT500经颅磁刺激治疗仪确定静息运动阈值(RMT),评估运动皮质兴奋性。**结果** 与治疗前比较,3组治疗后BBS评分均增加($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组治疗后BBS评分均更高($P<0.05$)。与治疗前比较,3组治疗后TUG时间均缩短($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组治疗后TUG时间均更短($P<0.05$)。与治疗前比较,3组治疗后双侧股四头肌PT值(角速度为60°/s和180°/s)均升高($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组双侧股四头肌PT值(角速度为60°/s和180°/s)均更高($P<0.05$)。与治疗前比较,3组治疗后双侧胫前肌皮层RMT均降低($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组RMT均更低($P<0.05$)。重复测量方差分析结果显示,除左侧股四头肌PT值(60°/s)外,其余指标评分交互效应均具有统计学意义($P<0.05$)。**结论** tDCS联合运动训练可增强跌倒高风险老年人平衡功能、下肢肌力,且疗效优于单一治疗组,其作用机制可能与运动皮质兴奋性增强有关。

关键词 跌倒高风险老年人;经颅直流电刺激;运动训练;平衡功能;下肢肌力;运动皮质兴奋性

跌倒是导致老年人伤残和死亡的重要原因,中国社区老年人的跌倒率为11%~34%,跌倒导致的直接医疗费用在50亿元人民币以上[1-2]。跌倒不仅造成躯体创伤,而且还易导致抑郁、焦虑、跌倒恐惧等心理问题,造成老年人生活质量严重下降,给家庭和社会带来沉重的负担,严重阻碍健康老龄化的进程[3]。因此,亟须寻找行之有效的防跌倒策略。

因年龄增长导致的平衡功能和股四头肌肌力

引用格式:蔡倩,徐亮,杨玺,等. 经颅直流电刺激联合运动训练对跌倒高风险老年人平衡功能、下肢肌力和运动皮质兴奋性的影响[J]. 康复学报,2026,36(10):706-714.

CAI Q,XU L,YANG X,et al. Effects of transcranial direct current stimulation combined with exercise training on balance function,lower limb muscle strength,and motor cortex excitability in older adults at high risk of falls [J]. Rehabil Med,2026,36(10):706-714.

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10004

©《康复学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议 © *Rehabilitation Medicine*, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

减退是老年人跌倒相关高危因素中最主要的原因[4]。平衡和下肢肌力训练已被证明可明显降低老年人跌倒风险[5-6]。但运动训练存在训练周期长、训练量大、需要专业人员指导等缺点,导致老年人不能长期坚持。《全民健身计划(2021—2025年)》[7]中明确提出应积极推动体卫融合,强调运动与医疗卫生相互协作,融合发展,是实现全民健康覆盖目标的重要手段[8]。经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation,tDCS)是一种非侵入性的脑刺激技术,可通过阈下刺激改变神经元的静息膜电位来直接调节大脑皮质兴奋性。以往tDCS主要用于治疗神经及精神系统疾病,近来有研究发现其亦可提高健康人及运动员的姿势稳定性、肌力和耐力等[9-10]。tDCS和运动训练联合干预可实现"中枢-外周"双重刺激,可能产生协同效应。本研究基于预防为主、主动健康的理念,尝试将阳极经颅直流电刺激(anodal transcranial direct current stimulation,atDCS)和运动训练联合,旨在探讨这2种干预方式联合使用对跌倒高风险老年人平衡功能、下肢肌力及运动皮质兴奋性的影响。

1　临床资料

1.1　病例选择标准

1.1.1　纳入标准　① 年龄60～75岁,男女均可;② 美国CDC社区老人跌倒风险自评表[11]≥4分,显示跌倒高风险;③ 简易精神状态检查量表>24分[12];④ 可独立或手拐辅助下步行,双下肢可引出运动诱发电位;⑤ 无脑卒中、帕金森病等神经系统病史;⑥ 所有受试者均对实验内容知晓,并签署知情同意书。

1.1.2　排除标准　① 严重认知障碍和精神障碍,不能配合者;② 严重心肺系统、恶性肿瘤等疾病不能耐受运动训练者;③ 存在截肢、严重关节疼痛和活动受限、骨折未愈合等;④ 癫痫病史、颅骨缺损、颅内有金属植入物、人工耳蜗植入、心脏起搏器植入等;⑤ 视听觉障碍不能被矫正者;⑥ 治疗部位皮肤有炎症或伤口。

1.2　一般资料

选择2024年1—10月在南京市岱山社区卫生服务中心、浦口中医院和迈皋桥卫生服务中心筛选出的跌倒高风险老年人90例。所有受试者的干预和评估均在东南大学附属中大医院运动康复中心完成。采用随机数字表法分为运动组、tDCS组和联合组,每组30例。干预过程中共有6例受试者脱落,包括因突发疾病退出者3例,其中运动组2例、tDCS组1例;因不能耐受运动训练或tDCS治疗而退出者3例,其中tDCS组1例、联合组2例。最终完成试验者共84例,每组28例,3组均无严重不良反应发生。3组一般资料比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),具有可比性。见表1。本研究经东南大学附属中大医院医学伦理审查委员会批准(审批号:2023ZDSYLL442-P01),且已在医学研究登记备案系统备案(MR-32-24-035623),并在中国临床试验注册中心注册(注册号:ChiCTR 2400079544)。

表1　3组一般资料比较

Table1　Comparison of general data in three groups

组别	例数	性别		年龄/($\bar{x}\pm s$,岁)	身高/($\bar{x}\pm s$,cm)	体质量/($\bar{x}\pm s$,kg)	美国CDC社区老人跌倒风险自评表评分/($\bar{x}\pm s$,分)
		男	女				
运动组	28	16	12	68.39±4.41	167.43±9.12	60.69±7.37	7.57±1.60
tDCS组	28	17	11	67.04±4.31	164.32±8.09	62.91±8.20	7.21±1.83
联合组	28	15	13	66.68±4.14	166.15±7.68	63.34±5.45	7.00±1.68

2　方　法

2.1　治疗方法

通过视频、讲座等形式对3组进行防跌倒知识的健康宣教,使其正确认识跌倒及其相关危害,增强防跌倒意识。所有参与试验的治疗师均通过统一培训,tDCS操作由受过相关专业培训的治疗师负责。

2.1.1　运动组　仅接受运动训练,主要包括训练前热身活动、平衡训练、双下肢股四头肌肌力训练和训练后整理运动。整个训练过程均在治疗师的监护和陪同下完成,根据自觉用力程度分级调整运动强度,维持在11～14级[13]。全程监测受试者心率,若出现明显心慌、气喘等不适立即暂停训练,予以休息、吸氧等相应的处理措施。具体训练内容如下:① 训练前先进行10 min的踏车运动和伸展运动,充分活动各关节,避免发生损伤。② 平衡训练,主要包括双足交叉迈步、拍球及抛接球、单腿站立

向前触物、平衡板前后及左右摆动练习等，每组动作训练3～5 min，组间休息2 min，共30 min，每天1次，每周5 d，持续训练4周。③ 渐进式抗阻肌力训练，首先测出股四头肌连续10次等张收缩所能承受的最大负荷，即10次最大重复量（10 repetition maximum，10RM）。受试者在股四头肌训练椅上取端坐位，膝关节屈曲90°，阻力施加于踝关节足背处，抗阻伸膝至完全伸直位，并在此位置保持10 s，休息10 s，重复10次为1组，每次共训练3组，组间休息5 min。阻力负荷施加顺序按第1组1/2个10RM、第2组3/4个10RM、第3组1个10RM进行，每天1次，每周5 d，持续训练4周[14]。每周应复测10RM值，并随肌力增加相应调整负荷量。④ 每次训练结束后，进行10 min以下肢肌肉牵伸和按摩放松为主的整理运动。

2.1.2 tDCS组 仅接受atDCS治疗，治疗前检查受试者治疗部位头皮有无伤口或皮肤炎症，为降低皮肤阻抗，需使用医用乙醇进行脱脂，由于头发不利于导电，治疗时应尽量拨开头发以多暴露头皮。利用脑电图国际10-20系统确定Cz点，采用IS200型经颅直流电刺激仪（四川省智能电子实业有限公司），选择阳极电极尺寸为5 cm×7 cm，阴极电极尺寸为6 cm×10.3 cm。将棉布套置于饱和盐水中，完全湿润后取出，挤出多余水分（以湿而不滴为宜），将电极片放入布套内，确保电极的导电面（黑色面）接触头皮。选择直流电刺激模式，将阳极置于双下肢初级运动皮层（primary motor cortex，M1）区，约在Cz点后1～2 cm至侧方0～2 cm处，阴极置于前额中央[15]。为保证电极和皮肤的良好接触，应使用弹力带绑定电极并压紧四周，以防止发生移位和脱落。刺激强度为1.4 mA，治疗时间20 min，为使患者能更好地适应输出电流的强度变化，避免产生不适感，电流的上升和下降时间均设为30 s。每天1次，每周5 d，持续治疗4周[16]。

2.1.3 联合组 联合组先给予双下肢M1区atDCS治疗，结束后立即进行运动训练，治疗参数、频率、周期与运动组和tDCS组一致。

2.2 观察指标

分别于治疗前和治疗4周后，采用以下指标对患者进行功能评定，且所有评估均由1名不清楚分组情况的高年资康复治疗师（工作超过10年的主管康复治疗师）完成，以确保评估结果的准确性和可靠性。

2.2.1 平衡功能评估 采用Berg平衡量表（Berg Balance Scale，BBS）对受试者平衡功能进行评估。评估内容包括由坐到站、闭眼站立、双足交替踏台阶等14项与平衡有关的活动，每项分为5级，最高分为56分，得分越高表明受试者平衡能力越好，跌倒风险越小[17]。

2.2.2 下肢步行能力评估 采用起立-行走测试（timed up and go test，TUG）对受试者步行能力进行评估。评估者在距离椅子正前方3 m处的地面上贴一条红色的胶带作为标记，记录受试者从椅子上站起，向前独立步行绕过红线处，转身走回，再坐到靠椅上所需的时间，重复测试3次，取平均值，用时越短表明受试者步行能力越好[18]。

2.2.3 肌力评估 采用美国Biode Medical Systems 4型等速肌力评估和训练系统对受试者双侧股四头肌峰力矩（peak torque，PT）进行测定，以评估受试者股四头肌肌力。按照膝关节测试体位固定胸腰部、大腿及踝部，选择相应的膝关节配件，分别在60°/s和180°/s的角速度下测试双侧股四头肌在等速向心收缩时的最大峰力矩，先测试优势侧（肌力更大的一侧）下肢，休息5 min再测非优势侧下肢。PT代表肌肉收缩产生的最大肌力，是等速肌力测试的黄金指标，PT值越高，代表肌肉的最大肌力越好[19]。

2.2.4 运动皮质兴奋性评估 采用YD-MT500经颅磁刺激治疗仪（河南优德医疗设备有限公司），在Cz点附近缓慢移动线圈中心点位置，寻找可以诱发出对侧胫前肌最大运动诱发电位波幅的位置，然后逐渐减小刺激强度，找出连续10次刺激中引起至少5次运动诱发电位波幅＞50 μV的最低刺激强度，即为静息运动阈值（resting motor threshold，RMT）[20]。RMT可反映大脑皮质中神经元的兴奋性，RMT升高表明皮质兴奋性下降，RMT降低表明皮质兴奋性增加[21]。

2.3 统计学方法

采用SPSS 25.0软件进行数据分析。计数资料以频数表示，组间比较采用χ^2检验；计量资料符合正态分布数据以（$\bar{x}\pm s$）表示，组内比较采用配对t检验，组间比较采用单因素方差分析，2组间比较采用LSD-t检验，进一步通过Bonferroni法调整显著性水准，以$P<0.016\ 7$（0.05/3）表示差异具有统计学意义，其余比较均以$P<0.05$为差异具有统计学意义。组别与时间的交互效应采用重复测量方差分析。

3　结　果

3.1　3组治疗前后BBS评分比较

与治疗前比较,3组治疗后BBS评分均增加($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组治疗后BBS评分均更高($P<0.05$)。见表2。

表2　3组治疗前后BBS评分比较($\bar{x}\pm s$)　　分

Table 2　Comparison of BBS scores in three groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)　Scores

组别	例数	治疗前	治疗后
运动组	28	40.25±2.93	43.79±2.38[1)]
tDCS组	28	40.21±2.79	44.29±2.39[1)]
联合组	28	40.07±2.87	50.61±2.60[1)2)3)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与运动组比较,2) $P<0.016\ 7$;与tDCS组比较,3) $P<0.016\ 7$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the exercise group, 2) $P<0.016\ 7$; compared with the tDCS group, 3) $P<0.016\ 7$.

3.2　3组治疗前后TUG时间比较

与治疗前比较,3组治疗后TUG时间均缩短($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组治疗后TUG时间均更短($P<0.05$)。见表3。

表3　3组治疗前后TUG时间比较($\bar{x}\pm s$)　　s

Table 3　Comparison of TUG time in three groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)　s

组别	例数	治疗前	治疗后
运动组	28	19.04±4.09	15.68±3.53[1)]
tDCS组	28	18.39±3.82	15.51±3.78[1)]
联合组	28	19.67±3.78	12.90±3.05[1)2)3)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与运动组比较,2) $P<0.016\ 7$;与tDCS组比较,3) $P<0.016\ 7$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the exercise group, 2) $P<0.016\ 7$; compared with the tDCS group, 3) $P<0.016\ 7$.

3.3　3组治疗前后双侧股四头肌PT值比较

与治疗前比较,3组治疗后双侧股四头肌PT值(角速度为60°/s和180°/s)均升高($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组双侧股四头肌PT值(角速度为60°/s和180°/s)均更高($P<0.05$)。见表4。

3.4　3组治疗前后双侧胫前肌皮层RMT比较

与治疗前比较,3组治疗后双侧胫前肌皮层RMT均降低($P<0.05$);与运动组和tDCS组比较,联合组RMT均更低($P<0.05$)。见表5。

表4　3组治疗前后双侧股四头肌PT值比较($\bar{x}\pm s$)　　N·m

Table 4　Comparison of bilateral quadriceps PT in three groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)　N·m

组别	例数	左侧股四头肌PT值(60°/s)		右侧股四头肌PT值(60°/s)	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
运动组	28	53.17±8.15	63.90±8.45[1)]	59.41±9.03	80.97±9.76[1)]
tDCS组	28	53.80±9.59	64.01±9.52[1)]	60.99±9.31	81.86±8.15[1)]
联合组	28	53.15±9.57	70.76±11.53[1)2)3)]	60.29±10.10	93.70±10.00[1)2)3)]

组别	例数	左侧股四头肌PT值(180°/s)		右侧股四头肌PT值(180°/s)	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
运动组	28	32.61±6.93	42.57±8.24[1)]	36.13±7.03	46.02±6.92[1)]
tDCS组	28	33.44±6.36	42.21±5.25[1)]	35.92±6.80	45.48±7.50[1)]
联合组	28	33.38±8.26	49.80±5.27[1)2)3)]	35.27±7.16	51.36±5.18[1)2)3)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与运动组比较,2) $P<0.016\ 7$;与tDCS组比较,3) $P<0.016\ 7$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the exercise group, 2) $P<0.016\ 7$; compared with the tDCS group, 3) $P<0.016\ 7$.

表5　3组治疗前后双侧胫前肌皮层RMT比较($\bar{x}\pm s$)　　%

Table 5　Comparison of RMT of bilateral anterior tibial cortex in three groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)　%

组别	例数	左侧胫前肌皮层RMT		右侧胫前肌皮层RMT	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
运动组	28	67.29±1.88	62.89±1.17[1)]	63.32±1.44	59.39±0.92[1)]
tDCS组	28	66.96±1.71	63.07±0.94[1)]	63.50±1.69	59.39±0.92[1)]
联合组	28	66.43±1.50	60.86±0.93[1)2)3)]	62.86±1.76	56.61±1.13[1)2)3)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与运动组比较,2) $P<0.016\ 7$;与tDCS组比较,3) $P<0.016\ 7$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the exercise group, 2) $P<0.016\ 7$; compared with the tDCS group, 3) $P<0.016\ 7$.

3.5 各指标交互效应结果分析

重复测量方差分析结果显示，除左侧股四头肌PT值(60°/s)外，其余指标评分交互效应均具有统计学意义($P<0.05$)。见表6。

表6 各指标的重复测量方差分析结果

Table 6 Repeated measures ANOVA results for each indicator

变量			平方和	自由度	均方	F值	P值
BBS评分		组内×组间	425.012	2	214.477	30.389	<0.001
TUG时间		组内×组间	125.801	2	66.272	4.378	0.016
股四头肌PT值	左侧(60°/s)	组内×组间	477.419	2	249.841	2.481	0.091
	右侧(60°/s)	组内×组间	1 390.825	2	712.716	7.926	0.001
	左侧(180°/s)	组内×组间	474.422	2	238.809	4.729	0.011
	右侧(180°/s)	组内×组间	379.715	2	197.251	3.613	0.032
胫前肌皮层RMT	左侧	组内×组间	46.726	2	24.159	14.992	<0.001
	右侧	组内×组间	20.798	2	11.113	4.895	<0.001

4 讨 论

4.1 运动训练可提高老年人平衡功能及下肢肌力，预防跌倒

《“健康中国2030”规划纲要》[22]强调预防老年人跌倒工作的重要性，指出所有老年人均应接受跌倒知识的科普和规律的运动锻炼。神经和肌肉骨骼系统衰退造成的平衡功能失调是老年人跌倒的直接原因[23]。Meta分析显示，平衡训练可有效改善跌倒相关自我效能，减轻老年人的跌倒恐惧，提高移动步行能力，减少跌倒次数[6,24]。下肢肌力尤其是股四头肌肌力降低，膝关节周围肌腱和韧带强度的减弱，导致关节稳定性变差，诱发平衡能力下降，跌倒风险增加[25]。程文昌等[26]发现，股四头肌抗阻肌力训练可明显提高老年人膝部力量和耐力，增强平衡能力，降低跌倒风险。世界卫生组织建议老年人应进行≥3 d/周的以增加平衡功能和力量为主的中高强度运动，进而预防跌倒[27]。本研究运动组侧重于平衡和肌力训练，每周5 d，每天>1 h。治疗4周后，受试者BBS评分升高、TUG时间缩短、股四头肌PT值升高，表明下肢肌力和平衡能力明显改善，与上述研究结果一致。原因可能是适宜强度的抗阻力量训练可以减轻老年人的肌流失，预防肌萎缩，增强肌力和耐力，提高膝关节的稳定性[28]；而平衡训练可提高中枢神经系统的整合信息能力，从而增强其对外周肢体的控制能力，改善姿势稳定性，有效预防跌倒发生[29]。另外，运动训练可诱导大脑皮层产生结构和功能的适应性改变，提高中枢神经的兴奋性[30]。

4.2 atDCS可通过提高大脑皮质兴奋性改善老年人退化的脑功能

tDCS是一种利用恒定、低强度直流电(1～2 mA)刺激目标脑区以调节皮层兴奋性的无创性神经刺激技术[31]。阳极刺激可增强皮质兴奋性，阴极刺激降低皮质兴奋性[32]。老年人由于年龄增大导致脑功能退化，M1区、背外侧前额叶等与平衡相关的脑区通路激活水平降低，中枢传导和整合能力的退化会影响平衡、肌力、协调和步态等身体功能，使跌倒的危险性增加[33]。M1区是tDCS提升运动表现的常用刺激靶区。YOSEPHI等[34]发现atDCS作用于M1区，可显著提高跌倒高风险老年人的平衡能力。胡惠莉等[35]采用atDCS刺激成年男性双侧M1区，强度为2 mA，结果显示下肢最大输出功率明显提高，且该效应可持续1 h。梁志强等[36]利用20 min、2 mA的atDCS靶向性刺激胫前肌皮层热点，结果显示可有效改善单足闭眼平衡表现，明显降低RMT。本研究tDCS组将atDCS置于双下肢M1区，治疗4周后，受试者各项评分均明显改善。其可能机制是：① atDCS可增强靶向脑区神经元兴奋性，诱发更高频率的神经电信号，募集更多运动单位参与收缩，提高同步化程度，使力矩输出更大，肌力增强[37]，与吴文广等[38]的研究结果一致；其还可减少神经肌肉抑制效应，延缓疲劳的发生，提升肌肉耐力[39]。② atDCS可增加刺激区域的脑血流灌注，改善脑部供血，增强姿势稳定性和平衡功能[40]。③ M1区被激活时，其他脑区的功能活性亦增强，这表明tDCS可加强不同脑区之间(如脑-小脑)的协同作用，提高脑可塑性[41]。tDCS操作简单，诱发癫痫的风险小，安全性好，患者更易接受。

4.3　外周-中枢联合干预更有利于提高老年人平衡功能及肌力,降低跌倒风险

研究发现,tDCS与运动干预相结合,可产生更大的增益。如BRUCE等[42]利用tDCS联合腓骨长肌离心训练治疗慢性踝关节不稳患者,治疗4周后,腓骨长肌RMT明显降低,动态姿势稳定性评分增加,改善幅度优于伪刺激组。本研究尝试在运动训练前给予atDCS,治疗4周后,联合组的BBS评分升高、TUG时间缩短、股四头肌PT值升高、胫前肌皮层RMT明显降低,以上指标改善幅度均优于其他2组,结果表明tDCS联合运动训练可更大幅度增强M1区兴奋性,提高老年人平衡能力和下肢肌力,可能降低跌倒风险。atDCS("外源性刺激")可预先激活与双下肢有关的运动皮区,增强整个皮质脊髓通路的兴奋性,增加局部脑血流量和全脑网络区间联系,强化神经驱动力,提高运动学习能力,从而有利于缩短运动训练("内源性刺激")调动外周神经肌肉的时间,提高治疗效率[43-44]。另外,运动训练可从外周增强感觉和运动输入,由下向上,传至中枢,提高大脑皮层兴奋性;而atDCS可直接兴奋相关功能脑区,自上而下,传至外周。这种"闭环刺激"模式实现了对整个上下运动神经元通路的刺激,使神经元之间建立更强的联系,可在更大限度上提高突触可塑性,促进长时程增强,获得更显著的治疗效果[45-46]。两者相互协作,可产生叠加效应,缩短训练周期,在短期内提升运动表现。整个过程均在专业人员的科学指导下进行,有利于提高老年人依从性,为跌倒高风险老人提供了一种健康服务新模式。

本研究尚存在一些不足之处:① 未设立对照组及伪刺激,且治疗过程中有6例患者脱落,可能产生偏移,影响研究结果的可靠性。由于tDCS刺激过程中受试者有瘙痒感、灼烧感等反应,而常用的伪刺激方法在关闭仪器后,受试者可察觉到刺激感消失,所以未来仍需寻找更适宜的伪激方式。② 受限于课题研究周期的影响,纳入样本量较少,干预时间较短,未对受试者干预后的跌倒情况进行随访,将在后续研究中增加样本数量,延长干预时间,并对跌倒情况进行统计分析。最后,跌倒的发生受多种因素影响,本研究仅在平衡、肌力和脑皮质兴奋性方面给予干预,最有效的策略应是综合的、多元化干预,未来可在认知、家庭及社区环境等方面进一步深入研究。

5　结　论

tDCS联合运动训练可更有效提高跌倒高风险老年人运动皮质兴奋性,改善下肢肌力、耐力和平衡能力,可能降低其跌倒风险。此干预措施简单易行、安全有效,值得在其他运动促进健康中心中推广、使用。

参考文献

[1] 刘迪智,倪晓琳,贾春媛,等. 老年人跌倒损伤发生现状及危险因素分析[J]. 中国老年保健医学,2022,20(6):23-28.
LIU D Z,NI X L,JIA C Y,et al. Analysis of the occurrence status and risk factors of fall injury in the elderly [J]. Chin J Geriatr Care,2022,20(6):23-28.

[2] 张田田,丰志强,王婉晨,等. 中国老年人跌倒现状及影响因素研究[J]. 中华疾病控制杂志,2022,26(5):502-507.
ZHANG T T,FENG Z Q,WANG W C,et al. A study on the status quo and influencing factors of falls among the elderly in China [J]. Chin J Dis Control Prev,2022,26(5):502-507.

[3] MONTERO-ODASSO M,VAN DER VELDE N,MARTIN F C,et al. World guidelines for falls prevention and management for older adults:a global initiative [J]. Age Ageing,2022,51(9):afac205.

[4] JADCZAK A D,MAKWANA N,LUSCOMBE-MARSH N,et al. Effectiveness of exercise interventions on physical function in community-dwelling frail older people:an umbrella review of systematic reviews [J]. JBI Database Syst Rev Implement Rep,2018,16(3):752-775.

[5] HESS J A,WOOLLACOTT M. Effect of high-intensity strength-training on functional measures of balance ability in balance-impaired older adults [J]. J Manipulative Physiol Ther,2005,28(8):582-590.

[6] BOULARES A,FABRE C,CHERNI A,et al. Effects of a physical activity program that incorporates exercises targeting balance,strength,and proprioception on cognitive functions and physical performance in old adults with mild cognitive impairment [J]. J Alzheimers Dis,2023,96(1):245-260.

[7] 国务院关于印发全民健身计划(2021—2025年)的通知[EB/OL]. (2021-08-03)[2022-10-25]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021- 08/03/content_5629218.htm.
Issued by the State Council on the national fitness plan (2021—2025) notice [EB/OL]. (2021-08-03)[2022-10-25]. http://www.gov.Cn/zhengce/content / 2021-08/03/content_5629218.htm.

[8] 刘鸿民,常波,高海宁. 体医融合背景下我国"运动银行"网络平台建设:经验、困境及策略[J]. 沈阳体育学院学报,2023,42(1):50-56.
LIU H M,CHANG B,GAO H N. Construction of China's sports bank network platform under the background of sports-medicine integration:experience,dilemmas and strategies [J]. J Shenyang Sport Univ,2023,42(1):50-56.

[9] HOU J Q,NITSCHE M A,YI L Y,et al. Effects of transcranial

direct current stimulation over the primary motor cortex in improving postural stability in healthy young adults [J]. Biology, 2022, 11(9): 1370.

[10] DA SILVA MACHADO D G, BIKSON M, DATTA A, et al. Acute effect of high-definition and conventional tDCS on exercise performance and psychophysiological responses in endurance athletes: a randomized controlled trial [J]. Sci Rep, 2021, 11: 13911.

[11] 宋俊敏,万丹婷,郑中梅,等. 美国CDC社区老人跌倒风险自评表在我国老年人群中测试和信效度[J]. 中国公共卫生,2020,36(4):592-595.
SONG J M, WAN D T, ZHENG Z M, et al. Reliability and validity of US CDC self-rated fall risk questionnaire among Chinese community-dwelling older adults [J]. Chin J Public Health, 2020, 36(4): 592-595.

[12] OU C Y, LI C L, AN X L, et al. Assessment of cognitive impairment in patients with cerebral infarction by MMSE and MoCA scales [J]. J Coll Physicians Surg Pak, 2020, 30(3): 342-343.

[13] 杜丽成,何梅,温兴隆. 核心肌群训练结合股四头肌肌力训练对稳定期慢性阻塞性肺疾病患者平衡功能的影响[J]. 中国康复医学杂志,2020,35(2):208-210.
DU L C, HE M, WEN X L. Effect of core muscle group training combined with quadriceps femoris muscle strength training on balance function of patients with stable chronic obstructive pulmonary disease [J]. Chin J Rehabil Med, 2020, 35(2): 208-210.

[14] 贾竹亭,王珊珊,窦连峰,等. 核心稳定性训练治疗膝骨性关节炎的疗效观察[J]. 中华物理医学与康复杂志,2022,44(4):337-339.
JIA Z T, WANG S S, DOU L F, et al. Observation on the therapeutic effect of core stability training on knee osteoarthritis [J]. Chin J Phys Med Rehabil, 2022, 44(4): 337-339.

[15] 陶峰,王传杰,陈本梅,等. 低频重复经颅磁刺激联合镜像疗法对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能及平衡能力的影响[J]. 中国康复医学杂志,2022,37(5):611-615,622.
TAO F, WANG C J, CHEN B M, et al. Effects of low frequency repetitive transcranial magnetic stimulation combined with mirror therapy on lower limb motor function and balance in stroke patients with hemiplegia [J]. Chin J Rehabil Med, 2022, 37(5): 611-615, 622.

[16] 蔡倩,徐亮,杨玺,等. 不同电极经颅直流电刺激对脑卒中上肢功能康复的效果[J]. 中国康复理论与实践,2023,29(5):521-526.
CAI Q, XU L, YANG X, et al. Effect of anodal or cathodal transcranial direct current stimulation on upper limb function of stroke patients [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2023, 29(5): 521-526.

[17] TAMURA S, MIYATA K, KOBAYASHI S, et al. The minimal clinically important difference in Berg Balance Scale scores among patients with early subacute stroke: a multicenter, retrospective, observational study [J]. Top Stroke Rehabil, 2022, 29(6): 423-429.

[18] ORTEGA-BASTIDAS P, GÓMEZ B, AQUEVEQUE P, et al. Instrumented timed up and go test (iTUG)-more than assessing time to predict falls: a systematic review [J]. Sensors, 2023, 23(7): 3426.

[19] PERKINS S, CANAVAN P. Isokinetic assessment of knee flexor and extensor strength and lower extremity flexibility assessment of an NCAA Division Ⅲ men's soccer team [J]. Int J Sports Phys Ther, 2023, 18(3): 626-635.

[20] CHA H G, KIM M K. The effects of repetitive transcranial magnetic stimulation integrated mirror therapy on the gait of chronic stroke patients [J]. J Magn, 2015, 20(2): 133-137.

[21] KRILE L, ENSAFI E, COLE J, et al. A dose-response characterization of transcranial magnetic stimulation intensity and evoked potential amplitude in the dorsolateral prefrontal cortex [J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 18650.

[22] 中共中央,国务院. "健康中国2030"规划纲要[EB/OL]. http://www.Gov.cn/xinwen/2016-10/25/content_5124174.htm, 2016-10-25.
The CPC Central Committee and The State Council. Outline of the Healthy China 2030 Plan [EB/OL]. http://www.Gov.cn/xinwen/2016-10/25/content_5124174.htm, 2016-10-25.

[23] FABER M J, BOSSCHER R J, CHIN A PAW M J, et al. Effects of exercise programs on falls and mobility in frail and pre-frail older adults: a multicenter randomized controlled trial [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2006, 87(7): 885-896.

[24] 王筱筱,李呈,方红,等. 平衡训练对老年人跌倒发生及平衡功能影响的Meta分析[J]. 护理研究,2019,33(5):775-780.
WANG X X, LI C, FANG H, et al. Meta-analysis of effects of balance training on fall occurrence and balance function in the elderly [J]. Chin Nurs Res, 2019, 33(5): 775-780.

[25] 郭静霞,陈亮,余启超,等. 运动对预防老年人跌倒效果的网状Meta分析[J]. 中国康复理论与实践,2021,27(5):563-573.
GUO J X, CHEN L, YU Q C, et al. Efficacy of exercise on fall in old adults: a network meta-analysis [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2021, 27(5): 563-573.

[26] 程文昌,霍少川,刘付懿斐,等. 等速肌力训练对老年人膝关节肌力和跌倒风险的影响[J]. 中国医药导报,2022,19(19):107-110.
CHENG W C, HUO S C, LIU F Y F, et al. Effect of isokinetic strength training on knee muscle strength and fall risk in the elderly [J]. China Med Her, 2022, 19(19): 107-110.

[27] World Health Organization. WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour [R/OL]. (2020-02-14)[2022-11-09]. https://www.who.int/publications/i/item/9789240015128.

[28] 倪广晓,韩晓勇,周鸿斌,等. 渐进式抗阻训练治疗女性膝关节骨关节炎的效果研究[J]. 中华老年骨科与康复电子杂志,2018,4(3):168-174.
NI G X, HAN X Y, ZHOU H B, et al. The effect of progressive resistance exercise program on female knee osteoarthritis [J]. Chin J Geriatr Orthop Rehabil Electron Ed, 2018, 4(3): 168-174.

[29] WANG J T, CHEN Z, SONG Y T. Falls in aged people of the Chinese mainland: epidemiology, risk factors and clinical strategies [J]. Ageing Res Rev, 2010, 9: S13-S17.

[30] ADKINS D L, BOYCHUK J, REMPLE M S, et al. Motor training induces experience-specific patterns of plasticity across motor

cortex and spinal cord [J]. J Appl Physiol, 2006, 101(6): 1776-1782.

[31] MA M, XU Y, XIANG Z L, et al. Functional whole-brain mechanisms underlying effects of tDCS on athletic performance of male rowing athletes revealed by resting-state fMRI [J]. Front Psychol, 2022, 13: 1002548.

[32] 陈慧,蔡倩,徐亮,等. 经颅直流电刺激联合镜像疗法对脑卒中患者上肢运动功能的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2020, 26(3): 301-305.
CHEN H, CAI Q, XU L, et al. Effects of transcranial direct current stimulation and mirror therapy on upper limb motor function for Patients after stroke [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2020, 26(3): 301-305.

[33] 范晨雨,李浩正,谢鸿宇,等. 基于功能性近红外光谱技术的健康青年人、老年人皮层脑网络静息态功能连接的特征研究[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(8): 931-937, 942.
FAN C Y, LI H Z, XIE H Y, et al. Healthy young and old adults functional connectivity among cortical networks: a resting-state functional near-infrared spectroscopy study [J]. Chin J Rehabil Med, 2021, 36(8): 931-937, 942.

[34] YOSEPHI M H, 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 [J]. Brain Stimul, 2018, 11(6): 1239-1250.

[35] 胡惠莉,李丹阳,聂秋,等. 双侧大脑运动区经颅直流电刺激可提高双下肢最大输出功率[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(26): 4180-4185.
HU H L, LI D Y, NIE Q, et al. Transcranial direct current stimulations at bilateral brain motor areas elevate maximum output power of both lower limbs [J]. Chin J Tissue Eng Res, 2021, 25(26): 4180-4185.

[36] 梁志强,江勇,教富佳,等. 靶向性调控胫骨前肌对静态平衡的影响:基于经颅直流电刺激的干预[J]. 应用力学学报, 2023, 40(1): 225-233.
LIANG Z Q, JIANG Y, JIAO F J, et al. Effect of targeted modulation of the anterior tibialis muscle via transcranial direct current stimulation on static balance [J]. Chin J Appl Mech, 2023, 40(1): 225-233.

[37] LU P P, HANSON N J, WEN L, et al. Transcranial direct current stimulation enhances muscle strength of non-dominant knee in healthy young males [J]. Front Physiol, 2021, 12: 788719.

[38] 吴文广,陈艳,刘梦晓,等. tDCS刺激对膝关节和肘关节肌群肌力的影响[J]. 南京体育学院学报, 2022, 21(12): 45-49, 80.
WU W G, CHEN Y, LIU M X, et al. Effect of tDCS stimulation on muscle strength of knee and elbow joint [J]. J Nanjing Phys Inst, 2022, 21(12): 45-49, 80.

[39] CHEN C H, CHEN Y C, JIANG R S, et al. Transcranial direct current stimulation decreases the decline of speed during repeated sprinting in basketball athletes [J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(13): 6967.

[40] SONG I U, NA S H, IM J J, et al. Transcranial direct current stimulation for the treatment of Parkinson's disease: clinical and regional cerebral blood flow SPECT outcomes [J]. J Neuroimaging, 2020, 30(2): 161-164.

[41] 蔡宏伟,罗志增,史红斐. 经颅直流电刺激对人体平衡脑网络特征的影响研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2023, 42(4): 394-402.
CAI H W, LUO Z Z, SHI H F. Effects of transcranial direct current stimulation on features of human balance brain network [J]. Chin J Biomed Eng, 2023, 42(4): 394-402.

[42] BRUCE A S, HOWARD J S, VAN WERKHOVEN H, et al. The effects of transcranial direct current stimulation on chronic ankle instability [J]. Med Sci Sports Exerc, 2020, 52(2): 335-344.

[43] LIEBRAND M, KARABANOV A, ANTONENKO D, et al. Beneficial effects of cerebellar tDCS on motor learning are associated with altered putamen-cerebellar connectivity: a simultaneous tDCS-fMRI study [J]. Neuroimage, 2020, 223: 117363.

[44] 王宝峰,肖松林,张希妮,等. 经颅直流电刺激联合运动干预对运动能力影响的研究进展[J]. 体育科研, 2022, 43(1): 21-27.
WANG B F, XIAO S L, ZHANG X N, et al. The research progress of transcranial direct current stimulation combined with physical training on the sport performance [J]. Phys Sci Res, 2022, 43(1): 21-27.

[45] 贾杰. "中枢-外周-中枢"闭环康复:脑卒中后手功能康复新理念[J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(11): 1180-1182.
JIA J. "Central-Peripheral-Central" closed-loop rehabilitation: a new concept for hand function rehabilitation after stroke [J]. Chin J Rehabil Med, 2016, 31(11): 1180-1182.

[46] 孙武东,蔡倩,徐亮,等. 重复经颅磁刺激联合双侧上肢训练对脑梗死患者上肢功能恢复的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(2): 218-221.
SUN W D, CAI Q, XU L, et al. Effect of repetitive transcranial magnetic stimulation combined with bilateral upper limb training on upper limb function recovery in patients with cerebral infarction [J]. Chin J Rehabil Med, 2022, 37(2): 218-221.

Effects of Transcranial Direct Current Stimulation Combined with Exercise Training on Balance Function, Lower Limb Muscle Strength, and Motor Cortex Excitability in Older Adults at High Risk of Falls

CAI Qian, XU Liang, YANG Xi, MA Ming*
Zhongda Hospital Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210009, China
*Correspondence: MA Ming, E-mail: nj9868@163.com

ABSTRACT **Objective** To observe the effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) combined with exercise training on balance function, lower limb muscle strength, and motor cortex excitability in older adults at high risk of falling. **Methods** From January to October 2024, a total of 90 older adults at high risk of falling were recruited from Daishan Community Health Service Center, Pukou Hospital of Traditional Chinese Medicine, and Maigaoqiao Community Health Service Center in Nanjing. They were divided into an exercise group, a tDCS group, and a combined group using a random number table, with 30 participants in each group. During the intervention, 3 cases withdrew due to sudden illness, including 2 cases in the exercise group and 1 case in the tDCS group; 3 cases withdrew due to intolerance to exercise training or tDCS treatment, including 1 case in the tDCS group and 2 cases in the combined group. A total of 84 participants ultimately completed the trial, with 28 cases in each group. Health education on fall prevention knowledge was provided to all three groups through videos, lectures, and other formats. The exercise group received exercise training only, once a day, 5 days per week, for 4 consecutive weeks. The tDCS group only received anodal tDCS (atDCS) stimulation over the bilateral lower limb primary motor cortex (M1) area, once a day, 5 days per week, for 4 consecutive weeks. The combined group first received atDCS stimulation over the bilateral lower limb M1 area, followed immediately by exercise training, with treatment parameters, frequency, and duration consistent with those of the exercise group and the tDCS group. The Berg Balance Scale (BBS) was used to assess participants' balance function; the timed up and go test (TUG) was used to assess participants' walking ability; the Biode Medical Systems Model 4 isokinetic muscle strength assessment and training system was used to measure the peak torque (PT) of the bilateral quadriceps femoris to assess quadriceps muscle strength; and the YD-MT500 transcranial magnetic stimulation therapeutic device was used to determine the resting motor threshold (RMT) and assess motor cortex excitability. **Results** Compared with those before treatment, the BBS scores of all three groups increased after treatment ($P<0.05$); compared with the exercise group and the tDCS group, the combined group had higher BBS scores after treatment ($P<0.05$). Compared with those before treatment, the TUG time of all three groups was shortened after treatment ($P<0.05$); compared with the exercise group and the tDCS group, the combined group had shorter TUG time after treatment ($P<0.05$). Compared with those before treatment, the bilateral quadriceps femoris PT values (at angular velocities of 60°/s and 180°/s) of all three groups increased after treatment ($P<0.05$); compared with the exercise group and the tDCS group, the combined group had higher bilateral quadriceps femoris PT values (at angular velocities of 60°/s and 180°/s) ($P<0.05$). Compared with those before treatment, the bilateral tibialis anterior cortical RMT of all three groups decreased after treatment ($P<0.05$); compared with the exercise group and the tDCS group, the combined group had lower RMT ($P<0.05$). Repeated-measures analysis of variance showed that, except for the left quadriceps femoris PT value (60°/s), the interaction effects of the remaining indicators were significant ($P<0.05$). **Conclusion** tDCS combined with exercise training can enhance balance function and lower limb muscle strength in older adults at high risk of falls, and its efficacy is superior to that of single-treatment groups. Its mechanism of action may be related to enhanced motor cortex excitability.

KEY WORDS older adults at high risk of falls; transcranial direct current stimulation; exercise training; balance function; lower limb muscle strength; motor cortex excitability
DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10004