

经皮神经电刺激联合弹力带训练提升功能性慢踝患者运动能力的作用效果及其机制研究

成沛杨¹, 樊春婷², 杭丽菁², 周佳诚², 于常晓^{1*}

¹杭州医学院康复学院, 浙江 杭州

²杭州医学院临床学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年3月31日; 发布日期: 2025年4月10日

摘要

目的: 本研究旨在探讨经皮神经电刺激(TENS)联合弹力带训练对慢性踝关节不稳定(CAI)患者运动能力的改善效果及其潜在机制。方法: 研究招募45名CAI患者, 随机分为经皮神经电刺激组、弹力带训练组和TENS联合弹力带训练组。干预周期为6周, 实验前后分别测试受试者的肌肉电活动水平、动态平衡能力及静态平衡能力, 并使用SPSS22.0统计分析。结果: 6周干预后, 所有受试者的肌电活动水平、动态平衡能力及静态平衡能力均有显著改善($p < 0.05$), 但TENS联合弹力带训练组的改善幅度最大, 显著优于单独训练组($p < 0.05$)。结论: TENS联合弹力带训练能通过提高神经肌肉控制和肌肉力量, 优化运动单位激活模式, 提高踝关节稳定性, 为CAI患者提供一种高效的康复策略。

关键词

经皮神经电刺激, 弹力带, 肌肉活性, 神经肌肉功能

Effect of Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation Combined with Elastic Band Training on Improving Exercise Capacity in Patients with Functional Chronic Ankle Instability and Its Mechanism

Peiyang Cheng¹, Chunting Fan², Lijing Hang², Jiacheng Zhou², Changxiao Yu^{1*}

¹School of Rehabilitation, Hangzhou Medical College, Hangzhou Zhejiang

²School of Clinical Medicine, Hangzhou Medical College, Hangzhou Zhejiang

*通讯作者。

文章引用: 成沛杨, 樊春婷, 杭丽菁, 周佳诚, 于常晓. 经皮神经电刺激联合弹力带训练提升功能性慢踝患者运动能力的作用效果及其机制研究[J]. 临床医学进展, 2025, 15(4): 1166-1175. DOI: 10.12677/acm.2025.1541043

Received: Mar. 8th, 2025; accepted: Mar. 31st, 2025; published: Apr. 10th, 2025

Abstract

Objective: This study aimed to investigate the effect of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) combined with elastic band training on improving exercise capacity in patients with chronic ankle instability (CAI) and explore its underlying mechanisms. **Methods:** Forty-five CAI patients were recruited and randomly assigned to a TENS group, an elastic band training group, or a combined TENS and elastic band training group. The intervention lasted 6 weeks. Muscle electrical activity, dynamic balance, and static balance were assessed before and after the intervention. Data were analyzed using SPSS 22.0. **Results:** After 6 weeks, all groups showed significant improvements in muscle activity, dynamic balance, and static balance ($p < 0.05$). However, the combined TENS and elastic band training group exhibited the greatest improvement, significantly outperforming the single-intervention groups ($p < 0.05$). **Conclusion:** The combination of TENS and elastic band training enhances neuromuscular control and muscle strength by optimizing motor unit activation patterns, thereby improving ankle stability. This approach provides an effective rehabilitation strategy for CAI patients.

Keywords

Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation, Elastic Band, Muscle Activity, Neuromuscular Function

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. 前言

慢性踝关节不稳定(Chronic Ankle Instability, CAI)指反复发生外侧踝关节不稳定, 导致踝关节多次扭伤[1]。调查研究显示, 70%的急性踝关节外侧扭伤患者在初次损伤后短时间内约有 40%可能发展为 CAI [2]。CAI 以反复发作和难以治疗为特点, 产生扭伤带来的疼痛、肿胀和功能不稳等问题严重降低患者活动表现及生活质量[3]。目前治疗 CAI 最有效的方法仍存在争议, 因此针对 CAI 的康复治疗 and 预防研究尤为重要。

通常, CAI 患者主要表现为姿势控制能力下降、肌力下降、运动功能异常和神经肌肉控制缺陷等[4]。治疗应从患者活动表现入手, 恢复并提高其运动能力。目前国内外针对 CAI 患者所采用的治疗手段主要为手术治疗和康复治疗, 其中康复治疗主要包括本体感觉训练、肌肉力量训练及神经肌肉控制训练。本体感觉训练能减低踝关节扭伤的再发率以及对 CAI 有显著的预防作用[5]。Jaime 等[6]使用 TrP-DN 联合本体感觉锻炼对 CAI 患者进行了为期八周的治疗, 结果显示, 本体感觉训练能有效减低损伤后的疼痛感。胡惠莉等[7]对 36 名 CAI 患者进行了 6 周的 CST 联合踝力量训练, 结果显示: 力量训练对 CAI 患者踝的神经肌肉控制能力、动态姿势稳定性以及踝关节的稳定性有明显改善。神经肌肉控制训练能预防踝关节再次扭伤[8], 同时加强神经肌肉控制与本体感觉重建, 促进平衡肌肉力量, 加强核心稳定[9]。另外, 弹力绷带在踝关节损伤防护中应用已久, 有较好的预防效果[10]。但也有研究对此持有不同观点, 有学者研究了弹力绷带对慢踝患者姿势控制的影响, 结果显示虽然佩戴弹力绷带后患者主观安全感得到提升, 但

其姿势控制能力并没有增强,且由于主观安全提升可能导致踝关节再次损伤风险增高[11]。常规康复训练、功能性训练都能提高患踝功能,但联合效果比单独训练效果更好[12]。

尽管上述手段均取得了一些成果,但康复治疗手段多样,最有效的干预方式仍存在争议。手术治疗医疗成本高,并发症较多[13]。传统康复治疗采用单一方法,措施较为局部,或需要特定仪器完成,也无法提供个性化服务,难以调动参与者的积极性等,都是目前治疗 CAI 的不足。有研究指出, Thera-Band 弹力带抗阻训练疗法可以有效治疗和预防踝关节内翻损伤,还能显著增强踝部肌肉力量,缓解疼痛,恢复关节功能[14]。并且还拥有便携、安全、适用广泛、易于操作等特性。研究发现, CAI 患者的踝关节及周围的躯体感觉减弱,导致感觉输入减少[4]。受损的机械刺激感受器和传入神经纤维引起本体觉下降,阻碍中枢神经系统对踝关节空间位置的准确感知[15]。经皮神经电刺激(Transcutaneous electrical nerve stimulation, TENS)技术通过电刺激神经,增强肌肉收缩和神经肌肉控制能力[16]。TENS 安全有效、经济低廉、易操作,有镇痛、解痉、重建邻近完好的神经元功能等良好的临床疗效,值得临床进一步研究和推广[17]。因此,本研究的目的是探究 TENS 联合弹力带训练对恢复 CAI 患者运动能力的作用效果及其内在机制,希望能改善患者状况和提升生活质量的同时为 CAI 患者的康复治疗提供新思路、新方法。

本研究假设: TENS 结合弹力带训练相比传统的康复训练法能够显著提高 CAI 患者的运动表现和姿势稳定性、更有效预防 CAI 复发,并且比传统康复治疗手段医疗成本更低,更为便捷。

2. 研究方法

2.1. 研究对象

利用 G*Power3.1.9.2 软件计算出本研究需要的最小样本量。本研究使用双因素方差分析,统计功效(Power)设定为 80%,显著性水平设定为 0.05,效应量(Effect size)设定为 0.25 (中等效应),计算得到最小样本量为每组 12 人。为保证实验结果更加具有统计效力和防止后期受试者流失或数据遗失,本研究预计招募 45 名在校大学生为受试者。

纳入标准:坎伯兰踝关节不稳量表(Cumberland ankle instability tool, CAIT)评分 ≤ 24 分;实验前 6 个月至少出现 1 次踝关节“打软脚”现象;有严重踝关节扭伤病史,扭伤后踝关节出现肿胀、疼痛等炎症症状,至少 1 天不能正常参与日常活动;未接受过系统康复训练。

排除标准为:下肢有骨折或外科手术史;体内有心脏起搏器或其他金属器械;测试电极贴附处皮肤破溃;有精神类疾病史或家庭史;存在前庭、视觉、听觉或认知障碍;下肢有机械性不稳定或急性病理症状。

为提高实验的结果可靠性,将受试者随机平均分为 3 组:经皮神经电刺激组、弹力带训练组和经皮神经电刺激联合弹力带训练组(以下简称联合组)。受试者信息见表 1。

测试前告知受试者实验流程及目的,所有受试者均自愿参加本实验并于实验前签署知情同意书。本研究获得杭州医学院伦理委员会的批准。

Table 1. Basic information table of test object (N=45)

表 1. 测试对象基本信息表(N = 45)

指标	经皮神经电刺激组	弹力带组	联合组
年龄/岁	19.5 $\pm$ 1.6	19.7 $\pm$ 1.4	19.3 $\pm$ 1.8
身高/cm	172.3 $\pm$ 5.7	174.1 $\pm$ 6.2	173.5 $\pm$ 4.4
体重/kg	63.4 $\pm$ 8.2	68.1 $\pm$ 9.5	65.4 $\pm$ 7.3

2.2. 数据采集

在实验开始前,收集三组受试者的相关数据,即动态/静态平衡能力和受试者跖屈和背屈最大自主收缩时的肌电数据。随后,对三组 CAI 患者进行为期 6 周的干预。在干预过程中,所有实施干预的人员都严格按照流程进行操作。干预结束后第二天,进行后测,用于后续对比研究。

对 45 名受试者随机进行肌肉力量、动态/静态平衡能力和肌肉和表面肌电的生物力学特征测试,每项测试间隔约 5 分钟。具体实验测试如下:

2.2.1. 静态平衡测试

首先,受试者裸足站立于 Footscan 足底压力测试仪指示区域,完成 30 秒双足睁眼/闭眼站立测试、10 秒单足(患侧)睁眼/闭眼站立测试,每次测试间隔 30 秒。测试过程中要求受试者保持放松姿势,躯干不出现大幅度晃动,支撑腿保持稳定、不离开指示区域,摆动腿不能接触任何地方,此外,睁眼测试中要求受试者目视前方。各项测试均采集三次准确、稳定的足底压力数据。

2.2.2. 动态平衡测试

本研究运用 Y-Balance 方法对受试者进行动态平衡测试。测试前,测量受试者腿长,即髌前上棘到内踝的长度。测试时要求受试者裸足,支撑腿(患侧)拇趾对准 Y 形板中央红色标线,进行三个方向(前、后内、后外)测试。此过程需要受试者通过滑块沿着测试板臂方向移动,试图达到最远的距离,然后缓慢且平稳的返回到初始位置。各方向分别记录三次有效数据。在测试过程中,如果患者身体出现晃动、支撑足出现位移或未能按照规定的方向移动则视为无效数据。

2.2.3. 肌肉电生理测试

肌电贴前,剃除预置电极部位的毛发,并用酒精棉球擦拭,再贴于受试者腓肠肌内侧头、外侧头,比目鱼肌和股外侧肌肌腹处。粘贴方法参考 SEMG 无创评估指南(SENIAM) [18]。收集受试者安静状态和最大自主跖屈、背屈状态的肌电信号。每个动作持续 3 秒,分别采集 3 次有效数据。

2.3. 实验干预

通过采用不同干预模式来达到增强功能性 CAI 患者肌力和提高踝关节稳定性的目的。训练过程如下:

经皮神经电刺激组需要对受试者患侧腓肠肌内侧头、外侧头、比目鱼肌、胫前前肌肌腹进行强度为个人耐受值的电刺激干预。干预时间为每周 4 次(周一、周三、周五、周日),每次 20 分钟,共 6 周。干预过程中需要工作人员记录每位受试者每块肌肉的最大耐受值。

弹力带运动干预需要将弹力带一端固定于稳定处,再将弹力带活动端置于受试者脚踝处,分别完成四个方向(前侧、后侧、交叉、反向交叉)的足踝运动训练。每次运动到弹力带最远端时停留 1 秒,每个方向每组 15 次,每完成一个方向间歇 30 秒,组间休息 1 分钟,每天连续做 3 组,每周 4 次训练,共 6 周。

联合组需要在 6 周内完成经皮神经电刺激和弹力带训练干预,干预顺序不做要求,干预训练量需要一致。

干预结束后第二天,对受试者进行静态平衡能力、动态平衡能力、肌肉电生理特性评估,测试记录内容与前测相同(实验流程见图 1)。

2.4. 数据处理

本研究使用 Footscan 足底压力测试仪测得身体平衡性、重心偏移(x 轴和 y 轴长度)、足底压力分布等多个维度数据,数据值相对越小,说明受试者静态平衡能力越好。采用 Y-Balance 动态平衡测试三个方向

测试数值，以及下肢长度，根据前后到达距离和完成时间相对值越大，动态平衡能力越好，反之越差。提取每次肌肉收缩期间肌电平均振幅最大时的1秒用于计算MVC的平均肌肉活性。使用均方根振幅(Root mean square, RMS)表示目标肌肉的电活动水平。计算公式如下：

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N EMG(i)^2}$$

N 表示为整个数据长度， i 表示幅值。蹬伸阶段的平均肌肉活性与 MVC 的平均肌肉活性的比值作为标准化处理。

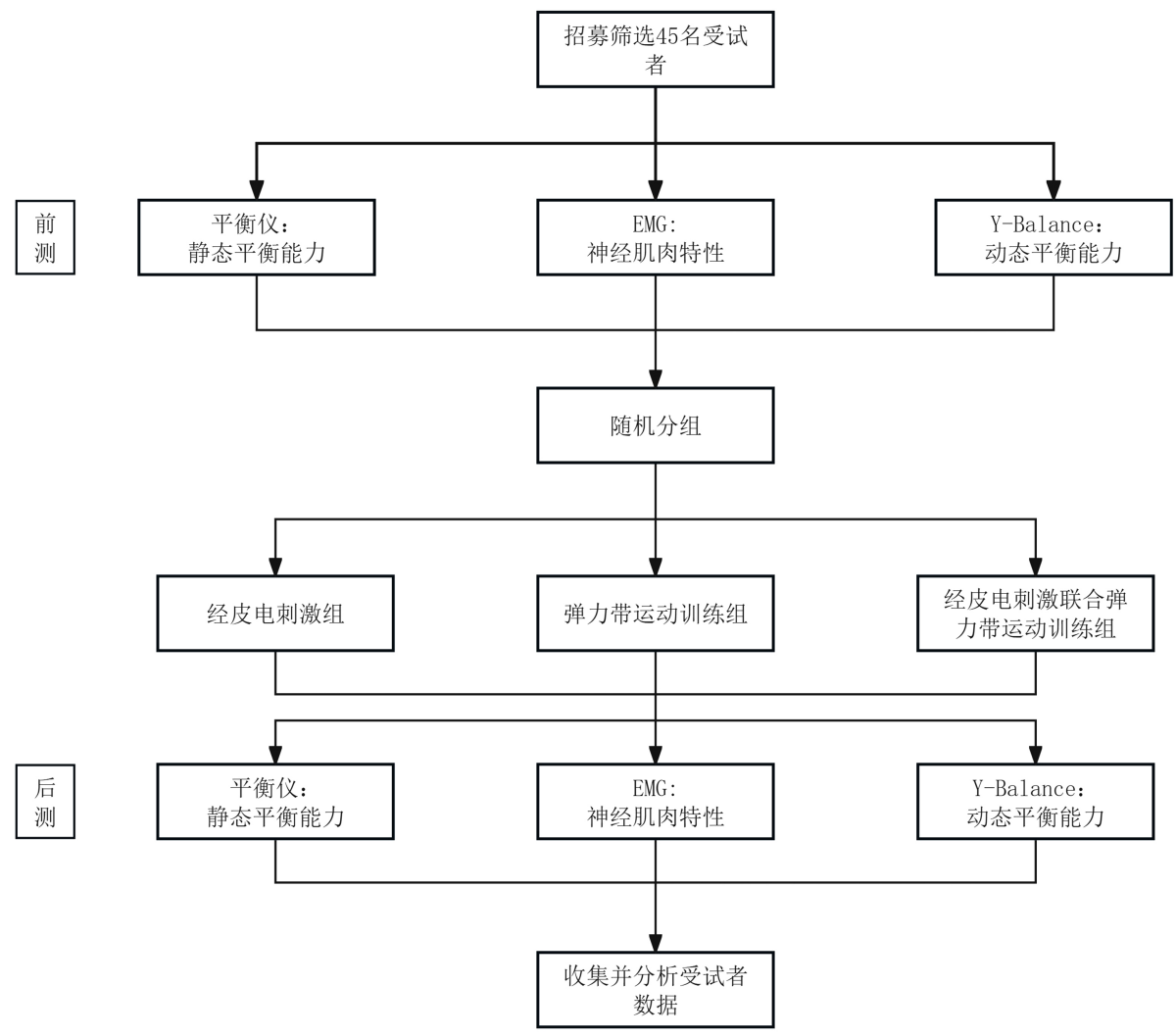


Figure 1. Experimental procedure
图 1. 实验流程

2.5. 统计分析

使用 SPSS22.0 进行数据的统计学分析，在分析前对数据进行正态分布检验。对符合正态分布的数据采用双因素(干预方式和时间长短)方差分析各自变量的差异。为验证三组基线水平的差异性，对各测得的指标进行单因素方差 t 检验。显著性水平设置为 $p < 0.05$ 。

3. 研究结果

3.1. 肌肉电活动水平

Table 2. Effect of different intervention conditions on RMS (%MVC)

表 2. 不同干预条件对 RMS 的影响(%MVC)

	电刺激联合训练组		单一电刺激组		单一训练组		P 值
	干预前	干预后	干预前	干预后	干预前	干预后	交互效应
股外侧肌	208.12 ± 112.31 ^a	223.09 ± 124.36 ^b	206.42 ± 108.27 ^a	219.86 ± 120.77 ^b	205.68 ± 110.43 ^a	217.75 ± 118.67 ^b	0.024
腓肠肌外侧头	180.24 ± 84.77 ^a	206.48 ± 75.31 ^b	179.57 ± 80.56 ^a	208.52 ± 81.37 ^c	181.38 ± 82.33 ^a	208.47 ± 78.46 ^d	0.037
比目鱼肌	37.52 ± 19.37 ^a	41.76 ± 24.18 ^b	36.98 ± 18.64 ^a	40.37 ± 26.18 ^b	37.14 ± 17.86 ^a	41.73 ± 20.67 ^b	0.043
腓肠肌内侧头	110.54 ± 31.47 ^a	131.58 ± 40.37 ^b	109.56 ± 29.87 ^a	123.75 ± 41.59 ^c	110.48 ± 30.36 ^a	116.55 ± 35.76 ^d	0.026

备注：对于重复测量 ANOVA 模型中组别和干预前后之间存在显著交互作用的结果，同一参数相同字母表示之间不存在显著差异，不同字母表示之间存在显著差异。

如表 2 所示，训练后，纵跳蹬伸阶段股外侧肌、腓肠肌外侧头、比目鱼肌和腓肠肌内侧头的肌肉活性均存在显著的干预方式和时间的交互效应。经事后分析发现，骨外侧肌、腓肠肌外侧头、比目鱼肌和腓肠肌内侧头的肌肉活性在实验组I(电刺激联合训练组)、实验组II(单一电刺激组)和对照组(单一训练组) 6 周干预后相较于干预前均显著增加($p < 0.05$)；而 6 周干预后，实验组I和实验组II的腓肠肌外侧头和腓肠肌内侧头的活性均显著地大于对照组的肌肉活性($p < 0.05$)。而实验组I的腓肠肌外侧头和腓肠肌内侧头的活性显著高于实验组II的肌肉活性($p < 0.05$)。组别和干预前后之间均存在交互作用，进一步证实了联合干预对肌肉电活动的积极影响。

3.2. 动态平衡能力变化

Table 3. The effect of different intervention modes on arrival distance and duration of movement phase in Y-balance dynamic equilibrium test

表 3. Y-balance 动态平衡测试中不同干预模式对到达距离和移动阶段进行时间的影响

参数	方向	干预前后	实验组I	实验组II	对照组	P 值
达到距离(%)	前侧	干预前	65.2 ± 4.8	64.7 ± 4.6	65.5 ± 4.7	0.348
		干预后	66.8 ± 5.7	66.2 ± 6.4	66.4 ± 5.5	
	后内侧	干预前	116.5 ± 7.3	116.1 ± 9.0	116.8 ± 7.8	0.326
		干预后	118.3 ± 10.7	118.1 ± 11.7	118.5 ± 10.5	
	后外侧	干预前	131.7 ± 6.8	130.5 ± 5.6	130.9 ± 4.5	0.203
		干预后	133.1 ± 7.2	131.6 ± 7.1	130.7 ± 6.8	
用时(s)	前侧	干预前	5.12 ± 1.35 ^a	5.24 ± 1.03 ^a	5.07 ± 1.27 ^a	0.032
		干预后	3.01 ± 1.23 ^b	3.36 ± 1.07 ^b	4.75 ± 1.37 ^c	
	后内侧	干预前	7.54 ± 2.32 ^a	7.46 ± 2.44 ^a	7.51 ± 3.01 ^a	0.024
		干预后	5.61 ± 2.41 ^b	6.02 ± 2.57 ^c	7.14 ± 2.64 ^a	
	后外侧	干预前	5.18 ± 1.84 ^a	5.31 ± 1.62 ^a	5.27 ± 1.77 ^a	0.037
		干预后	3.21 ± 1.24 ^b	3.95 ± 1.45 ^c	4.67 ± 1.51 ^d	

备注：对于重复测量 ANOVA 模型中组别和干预前后之间存在显著交互作用的结果，同一参数相同字母表示之间不存在显著差异，不同字母表示之间存在显著差异。

方差分析结果显示(表 3), 6 周干预后, 三组在 Y-Balance 动态平衡测试三个方向(前侧、后内侧和后外侧)的到达距离上未发现存在训练方式和训练前后的交互作用。但在完成三个方向的动态平衡测试时间上均存在交互作用。进一步分析发现, 上述三组在训练后相较于训练前用时均显著减少。此外, 在完成前侧平衡测试中, 对比干预前, 实验组I用时显著缩短, 显著优于实验组II和对照组。在完成内侧动态平衡测试中, 实验组I和实验组II用时均显著小于对照组, 但相较于训练前, 仅实验组I和实验组II用时显著减少, 此外, 实验组I比实验组II用时更少; 类似的, 在完成外侧平衡测试中, 实验组 I 和实验组 II 用时也显著小于对照组, 且相较于训练前, 三组用时均减少, 此外, 实验组 I 比实验组 II 用时更少。达到距离方面, 三组在三个方向上的数值略有提升, 但组间差异无统计学意义($p > 0.05$)。

3.3. 静态平衡能力变化

Table 4. Effect of different intervention conditions on static equilibrium
表 4. 不同干预条件对静态平衡的影响

项目	参数	干预前后	实验组I	实验组II	对照组	P 值
双足睁眼 站立	前后摆动平均距离 (mm)	干预前	12.41 ± 4.11	11.92 ± 5.64	12.75 ± 4.34	0.605
		干预后	10.37 ± 3.72	11.03 ± 4.67	11.64 ± 3.85	
	左右摆动平均距离 (mm)	干预前	6.37 ± 4.68	6.45 ± 3.57	6.13 ± 4.21	0.476
		干预后	5.51 ± 4.23	5.68 ± 4.71	5.59 ± 4.67	
	前后摆动平均速度 (mm/s)	干预前	8.67 ± 1.50	8.52 ± 1.37	8.62 ± 1.43	0.308
		干预后	8.41 ± 1.28	8.27 ± 1.33	8.34 ± 1.37	
	左右摆动平均速度 (mm/s)	干预前	6.57 ± 1.21	6.41 ± 1.13	6.52 ± 1.37	0.679
		干预后	6.42 ± 1.52	6.53 ± 1.27	6.44 ± 1.23	
双足闭眼 站立	前后摆动平均距离 (mm)	干预前	23.61 ± 12.31 ^a	24.13 ± 11.75 ^a	23.54 ± 13.84 ^a	0.042
		干预后	19.62 ± 13.39 ^b	20.41 ± 12.97 ^b	22.05 ± 12.75 ^a	
	左右摆动平均距离 (mm)	干预前	6.61 ± 2.80 ^a	6.37 ± 2.64 ^a	6.58 ± 2.37 ^a	0.035
		干预后	4.17 ± 1.94 ^b	5.34 ± 2.03 ^b	6.08 ± 2.11 ^a	
	前后摆动平均速度 (mm/s)	干预前	9.38 ± 1.38	9.49 ± 2.17	9.35 ± 1.78	0.561
		干预后	9.12 ± 1.61	9.26 ± 1.57	9.38 ± 1.86	
	左右摆动平均速度 (mm/s)	干预前	7.13 ± 1.12	6.98 ± 1.07	7.08 ± 1.26	0.673
		干预后	6.63 ± 1.35	6.77 ± 1.68	6.94 ± 1.34	
单足睁眼 站立	前后摆动平均距离 (mm)	干预前	3.68 ± 2.81	3.62 ± 2.37	3.55 ± 2.64	0.516
		干预后	3.71 ± 3.54	3.84 ± 2.34	3.86 ± 2.67	
	左右摆动平均距离 (mm)	干预前	108.37 ± 15.76	107.34 ± 13.85	108.83 ± 14.51	0.157
		干预后	107.27 ± 14.84	107.56 ± 12.38	107.18 ± 16.48	
	前后摆动平均速度 (mm/s)	干预前	28.45 ± 5.47	29.35 ± 6.78	28.57 ± 5.86	0.574
		干预后	28.16 ± 4.33	28.76 ± 6.47	28.49 ± 5.67	
	左右摆动平均速度 (mm/s)	干预前	32.36 ± 7.58	31.84 ± 8.67	32.82 ± 7.88	0.482
		干预后	30.48 ± 8.07	30.87 ± 7.94	31.07 ± 6.84	
单足闭眼 站立	前后摆动平均距离 (mm)	干预前	16.41 ± 5.38 ^a	15.87 ± 6.12 ^a	16.38 ± 5.76 ^a	0.038
		干预后	11.52 ± 4.67 ^b	13.36 ± 5.65 ^c	15.93 ± 5.17 ^a	

续表

左右摆动平均距离 (mm)	干预前	108.15 ± 16.34 ^a	107.67 ± 15.94 ^a	108.37 ± 16.25 ^a	0.029
	干预后	97.75 ± 15.29 ^b	100.46 ± 17.38 ^c	106.18 ± 15.08 ^a	
前后摆动平均速度 (mm/s)	干预前	67.75 ± 15.16 ^a	68.19 ± 13.75 ^a	67.83 ± 14.86 ^a	0.005
	干预后	52.18 ± 13.76 ^b	58.53 ± 14.68 ^c	65.28 ± 13.57 ^a	
左右摆动平均速度 (mm/s)	干预前	65.48 ± 16.42 ^a	65.97 ± 17.23 ^a	66.07 ± 17.12 ^a	0.018
	干预后	51.16 ± 15.23 ^b	58.54 ± 16.85 ^c	65.48 ± 15.67 ^a	

备注：对于重复测量 ANOVA 模型中组别和干预前后之间存在显著交互作用的结果，同一参数相同字母表示之间不存在显著差异，不同字母表示之间存在显著差异。

方差分析显示，静态平衡在双足睁眼站立和单足睁眼站立测试中未发现存在训练方式和训练时间的交互作用。双足闭眼站立在前后和左右摆动平均距离上均存在显著的交互作用。经事后分析发现，相较于训练前，实验组I和实验组II经 6 周的训练后在静态平衡测试的前后和左右摆动平均距离上均显著减少，且实验组I和实验组II的训练效果均显著优于对照组，但实验组I与实验组II在双足闭眼站立的前后和左右摆动平均距离上未发现存在显著差异。单足闭眼站立在摆动平均距离(前后和左右)和平均速度(前后和左右)上均存在训练方式和训练时间的显著交互作用。经事后分析发现，相较于训练前，实验组I和实验组II训练后在摆动平均距离和速度上均显著减少，且实验组I和实验组II比对照组在训练后摆动平均距离和速度上均显著降低，此外，实验组I比实验组II的摆动距离和速度均显著较小(表 4)。

4. 分析讨论

本研究旨在探讨 TENS 联合弹力带训练对 CAI 患者运动能力的改善作用及其潜在机制。经过为期 6 周的干预，所有受试者在肌电活动、动态平衡及静态平衡测试中均表现出显著改善，但试验组 I 较对照组在肌肉激活水平和平衡控制方面的提升更为明显。这一结果表明，为期 6 周的 TENS 与弹力带训练的联合干预能够更有效地增强踝关节周围肌群的功能，进而提高踝关节稳定性，为 CAI 患者康复提供了新的干预策略。

CAI 患者通常伴有踝关节内翻、外翻以及跖屈、背屈肌力的减弱，这不仅与肌肉力量下降有关，更涉及神经调控及本体感觉异常[19]。本文发现，在动静态平衡测试中，试验组 I 干预结束后移动阶段用时较试验组 II 和对照组显著减少，另外，试验组 II 比对照组用时更少。这可能归因于 6 周的弹力带或电刺激干预训练使得肌肉募集运动单位的数量或激活程度提高，从而使踝关节周围肌群肌力得到增加、关节周围本体感觉的器官功能提升、肌肉反应时缩短，进而使踝关节稳定性得到提升。前人的相关研究也证实上述结果，Sousa 等[20]指出，CAI 患者存在感受肢体运动速度及屈伸感的肌梭神经元及感知、调节肢体负重变化的高尔基小体功能受损，导致本体感觉和运动觉降低，进而影响踝关节控制。而 TENS 通过刺激肌肉本体感受器，提高神经兴奋性和促进神经再生，不仅缩短了感觉传入时间，提高了对关节角度变化的敏感性，而且有助于激活更多运动单位，从而改善肌肉协同作用[21]。试验组 II 动态平衡用时以及静态平衡测试摆动距离数据比干预前显著提升可论证以上观点。另一方面，弹力带训练则通过提供多方向的线性阻力，模拟自然肌肉收缩曲线，Fox J 等[22]提到与踝关节相邻的膝、髋关节周围肌肉力量的加强也是影响踝关节运动控制能力的重要因素之一。髋、膝、踝关节作为一个整体，踝周肌力不足引起踝关节不稳定，将导致整个下肢动力链功能紊乱。本文发现 6 周弹力带干预后，患侧下肢股内侧肌、比目鱼肌和腓肠肌内侧头、外侧头的力量和协调性得到显著提升。

两种干预方式的联合作用，既弥补了单一方法在神经调控或力量增强方面的不足，又通过协同效应

进一步提升了踝关节的运动控制能力和稳定性。这与过去的相关研究保持一致,渐进式超负荷单腿训练对 CAI 患者双侧的腓肠肌、胫前肌、腓骨长肌肌力有显著提升效果,另外,表面肌肉电信号也得到明显改善作用[23]。Docherty 等[24]也报道了为期 6 周的渐进式阻力弹力带锻炼能增加背屈肌、跖屈肌、外翻肌和内翻肌的肌肉力量与 CAI 患者的平衡能力。本研究虽观察到 TENS 联合弹力带训练显著改善了肌肉电活动与平衡能力,但具体神经生理机制仍需深入探究。TENS 可能通过激活 A β 纤维抑制脊髓背角痛觉传递,同时促进皮质脊髓束兴奋性,优化运动皮质对踝周肌群的调控[25];弹力带训练提供的多向阻力可刺激关节囊机械感受器(如鲁菲尼小体、环层小体),增强中枢神经系统对踝关节位置感觉的整合能力。另外,联合干预可能通过上调 α 运动神经元募集阈值,减少拮抗肌共激活,提升跖屈-背屈肌群协同效率[26]。建议未来研究结合功能性磁共振成像(fMRI)或经颅磁刺激(TMS),量化干预前后皮质激活区域及脊髓反射通路的变化,以明确神经重塑的具体机制。

与前人研究相比,本研究的创新之处在于探讨了 TENS 与弹力带训练联合应用的综合效应,其结果与 Kang 等[27]和 Stevens 等[28]关于 TENS 在改善平衡和肌力恢复中的报道基本一致,进一步验证了神经调控与机械训练相结合在康复中的潜在优势。同时,本研究的结果也呼应了 Needle 等[29]关于 TENS 对神经兴奋性影响不足以独立实现长期临床功能改善的观点,提示单一干预往往需要更长时间的训练才能达到持久效果。因此,建议在临床康复中结合长期的弹力带训练和 TENS 治疗,以达到更好的康复效果。另外,尽管本研究在验证 TENS 联合弹力带训练对 CAI 患者康复效果方面取得了积极成果,但本研究样本量较小局限于在校大学生,对照组仅设置单一弹力带训练组,缺乏完全未接受干预的空白对照组,因此无法排除时间效应或自然康复对结果的潜在影响。另外,本研究干预时长仅有 6 周,无法充分反映长期康复效果和稳定性维持情况。未来的研究应扩大样本多样性、延长干预以及随访时间,并采用多参数。另外,研究还应增设空白对照组(仅进行常规活动),并采用三臂设计(联合组、TENS 组、弹力带组、空白对照组),以更精准地分离不同干预方式的独立效应与协同效应。

5. 结论

本研究结果表明,TENS 与弹力带训练的联合干预通过双重机制:一方面通过提高神经肌肉控制和本体感觉敏感性,优化运动单位的激活模式;另一方面通过针对性力量训练改善局部肌肉力量,二者相辅相成,共同提升踝关节稳定性。该干预策略不仅能显著缩短动态平衡测试时间,降低静态平衡中摆动距离和速度,还为 CAI 患者提供了一种更高效的康复途径。综上所述,TENS 联合弹力带训练具有较高的临床应用潜力,值得在更大规模的临床试验中进一步验证其效果,为 CAI 患者康复治疗提供新的思路与方法。

参考文献

- [1] Hertel, J. (2002) Functional Anatomy, Pathomechanics, and Pathophysiology of Lateral Ankle Instability. *Journal of Athletic Training*, 37, 364-375.
- [2] Herzog, M.M., Kerr, Z.Y., Marshall, S.W. and Wikstrom, E.A. (2019) Epidemiology of Ankle Sprains and Chronic Ankle Instability. *Journal of Athletic Training*, 54, 603-610. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-447-17>
- [3] Demeritt, K.M., Shultz, S.J., Docherty, C.L., et al. (2002) Chronic Ankle Instability Does Not Affect Lower Extremity Functional Performance. *Journal of Athletic Training*, 37, 507-511.
- [4] Hertel, J. and Corbett, R.O. (2019) An Updated Model of Chronic Ankle Instability. *Journal of Athletic Training*, 54, 572-588. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-344-18>
- [5] 焦爽, 闫汝蕴. 本体感觉训练预防踝关节运动损伤研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2009, 28(6): 713-716.
- [6] Salom-Moreno, J., Ayuso-Casado, B., Tamaral-Costa, B., Sánchez-Milá, Z., Fernández-de-las-Peñas, C. and Alburquerque-Sendín, F. (2015) Trigger Point Dry Needling and Proprioceptive Exercises for the Management of Chronic Ankle Instability: A Randomized Clinical Trial. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2015, Article ID:

790209. <https://doi.org/10.1155/2015/790209>
- [7] 胡惠莉. 核心稳定性训练联合踝肌力量训练对慢性踝关节不稳患者的疗效研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉体育学院, 2021.
 - [8] Doherty, C., Bleakley, C., Delahunt, E. and Holden, S. (2016) Treatment and Prevention of Acute and Recurrent Ankle Sprain: An Overview of Systematic Reviews with Meta-Analysis. *British Journal of Sports Medicine*, **51**, 113-125. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096178>
 - [9] 苏玉莹, 彭亮, 李卫, 等. 整合性神经肌肉训练对慢性踝关节不稳康复与预防的研究进展[J]. 中国体育科技, 2023, 59(7): 47-52.
 - [10] Witjes, S., Gresnigt, F., van den Bekerom, M.P., Olsman, J.G. and van Dijk, N.C. (2012) The ANKLE TRIAL (ANKLE Treatment after Injuries of the Ankle Ligaments): What Is the Benefit of External Support Devices in the Functional Treatment of Acute Ankle Sprain? A Randomised Controlled Trial. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **13**, Article No. 21. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-13-21>
 - [11] Alguacil-Diego, I.M., de-la-Torre-Domingo, C., López-Román, A., Miangolarra-Page, J.C. and Molina-Rueda, F. (2017) Effect of Elastic Bandage on Postural Control in Subjects with Chronic Ankle Instability: A Randomised Clinical Trial. *Disability and Rehabilitation*, **40**, 806-812. <https://doi.org/10.1080/09638288.2016.1276975>
 - [12] 汤振达. 功能性训练联合常规康复训练对功能性踝关节不稳的疗效研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉体育学院, 2024.
 - [13] 刘天择, 徐卫东. 慢性踝关节不稳定手术治疗的特点与研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(4): 327-335.
 - [14] 赵香雨, 史曙生. 弹力带抗阻运动疗法: 踝关节内翻损伤康复治疗研究[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2020(4): 41-44.
 - [15] Hertel, J. (2008) Sensorimotor Deficits with Ankle Sprains and Chronic Ankle Instability. *Clinics in Sports Medicine*, **27**, 353-370. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2008.03.006>
 - [16] 李卫红, 毕彭玲. 运动疗法治疗慢性踝关节不稳定患者疗效分析[J]. 中国现代医生, 2008, 46(23): 58, 60.
 - [17] 陈瑶, 陈创, 项育枝, 等. 经皮神经电刺激疗法临床应用的研究进展[J]. 临床荟萃, 2019, 34(2): 175-179.
 - [18] Hermens, H.J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C. and Rau, G. (2000) Development of Recommendations for SEMG Sensors and Sensor Placement Procedures. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, **10**, 361-374. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(00\)00027-4](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(00)00027-4)
 - [19] Yildiz, Y., Aydin, T., Sekir, U., et al. (2003) Peak and End Range Eccentric Evertor/Concentric Invertor Muscle Strength Ratios in Chronically Unstable Ankles: Comparison with Healthy Individuals. *Journal of Sports Science & Medicine*, **2**, 70-76.
 - [20] Sousa, A.S.P., Leite, J., Costa, B. and Santos, R. (2017) Bilateral Proprioceptive Evaluation in Individuals with Unilateral Chronic Ankle Instability. *Journal of Athletic Training*, **52**, 360-367. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.2.08>
 - [21] Ni, L., Yao, Z., Zhao, Y., Zhang, T., Wang, J., Li, S., et al. (2023) Electrical Stimulation Therapy for Peripheral Nerve Injury. *Frontiers in Neurology*, **14**, Article 1081458. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1081458>
 - [22] Fox, J., Docherty, C.L., Schrader, J. and Applegate, T. (2008) Eccentric Plantar-Flexor Torque Deficits in Participants with Functional Ankle Instability. *Journal of Athletic Training*, **43**, 51-54. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-43.1.51>
 - [23] 谭永充. 渐进式超负荷单腿训练联合核心力量训练对慢性踝关节不稳的康复作用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉体育学院, 2024.
 - [24] Docherty, C.L., Moore, J.H. and Arnold, B.L. (1998) Effects of Strength Training on Strength Development and Joint Position Sense in Functionally Unstable Ankles. *Journal of Athletic Training*, **33**, 310-314.
 - [25] 钱菁华. 功能性踝关节不稳的神经肌肉控制机制及 PNF 干预效果研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京体育大学, 2011.
 - [26] McKnight, C.M. and Armstrong, C.W. (1997) The Role of Ankle Strength in Functional Ankle Instability. *Journal of Sport Rehabilitation*, **6**, 21-29. <https://doi.org/10.1123/jsr.6.1.21>
 - [27] Kang, M., Nam, B., Lee, Y. and Cheon, S. (2013) Relationship between the Application of TENS to the Lower Limbs and Balance of Healthy Subjects. *Journal of Physical Therapy Science*, **25**, 1079-1081. <https://doi.org/10.1589/jpts.25.1079>
 - [28] Stevens-Lapsley, J.E., Balter, J.E., Wolfe, P., Eckhoff, D.G. and Kohrt, W.M. (2012) Early Neuromuscular Electrical Stimulation to Improve Quadriceps Muscle Strength after Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. *Physical Therapy*, **92**, 210-226. <https://doi.org/10.2522/ptj.20110124>
 - [29] Needle, A.R., Tinsley, J.E., Cash, J.J., Koeval, B.K., Barton, J.A. and Howard, J.S. (2023) The Effects of Neuromuscular Electrical Stimulation to the Ankle Pronators on Neural Excitability & Functional Status in Patients with Chronic Ankle Instability. *Physical Therapy in Sport*, **60**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.12.001>