

经皮神经电刺激联合弹力带训练对慢性踝关节不稳患者康复影响研究与机制探讨

樊春婷¹, 杭丽菁², 成沛杨², 周佳诚², 于常晓^{2*}

¹杭州医学院临床医学院, 浙江 杭州

²杭州医学院康复学院, 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: 探讨经皮神经电刺激(Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation, TENS)联合弹力带训练对慢性踝关节不稳(Chronic Ankle Instability, CAI)患者姿势控制能力的影响。方法: 共纳入45名CAI患者, 随机分为TENS组、弹力带运动训练组和联合训练组各15名。在3个月的训练干预前后, 对所有患者进行静态和动态平衡测试以及肌肉电生理测试, 对采集数据进行重复测量双因素(干预方式 × 时间)方差分析其自变量对动、静态平衡能力以及肌肉激活模式的影响。结果: 经3个月干预, 三组的静动态平衡能力和肌肉活性均有所提高, 但联合训练组在静态平衡测试中摆动距离和速度下降最显著, 完成动态平衡测试所需时间最短以及肌肉活性显著提高($p < 0.05$), 表明TENS联合弹力带训练可有效提高CAI患者姿势控制能力。结论: 连续3个月的TENS联合弹力带训练在增强肌肉力量与活性、促进神经功能恢复、提升肢体平衡与协调功能等方面均表现出显著效果, 为CAI康复提供了新的策略。该结果表明多模式康复策略可能通过协同作用优化CAI患者的神经肌肉功能。

关键词

经皮神经电刺激, 弹力带, 肌肉活性, 神经肌肉功能

A Study on the Impact of Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation Combined with Elastic Band Training on the Rehabilitation of Patients with Chronic Ankle Instability and Its Mechanism Exploration

*通讯作者。

文章引用: 樊春婷, 杭丽菁, 成沛杨, 周佳诚, 于常晓. 经皮神经电刺激联合弹力带训练对慢性踝关节不稳患者康复影响研究与机制探讨[J]. 临床个性化医学, 2025, 4(2): 914-924. DOI: 10.12677/jcpm.2025.42260

Chunting Fan¹, Lijing Hang², Peiyang Cheng², Jiacheng Zhou², Changxiao Yu^{2*}¹School of Clinical Medicine, Hangzhou Medical College, Hangzhou Zhejiang²School of Rehabilitation, Hangzhou Medical College, Hangzhou ZhejiangReceived: Mar. 8th, 2025; accepted: Mar. 31st, 2025; published: Apr. 10th, 2025**Abstract**

Objective: To investigate the effect of transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) combined with elastic band training on postural control in patients with chronic ankle instability (CAI). **Methods:** A total of 45 patients with CAI were randomly divided into TENS group, elastic band exercise training group and joint training group, with 15 in each group. Before and after the three-month and six-week training intervention, static and dynamic balance tests and muscle electrophysiology tests were performed on all patients, and repeated measures of two-way (intervention mode × time) variance analysis were performed on the collected data, and the effects of independent variables on dynamic and static balance ability and muscle activation patterns were performed. **Results:** After 3 months and 6 weeks of intervention, the static and dynamic balance ability and muscle activity of the three groups were improved, but the swing distance and speed decreased most significantly in the static balance test in the joint training group, the time required to complete the dynamic balance test was the shortest, and the muscle activity was significantly increased ($p < 0.05$), indicating that TENS combined with elastic band training could effectively improve the posture control ability of CAI patients. **Conclusion:** TENS combined with elastic band training for three months and six weeks showed significant effects in enhancing muscle strength and activity, promoting neurological recovery, and improving limb balance and coordination function, which provided a new strategy for CAI rehabilitation. The results suggest that a multimodal rehabilitation strategy may optimize neuromuscular function in patients with CAI through synergistic effects.

Keywords**Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation, Elastic Bands, 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. 引言

慢性踝关节不稳(Chronic Ankle Instability, CAI)作为一种临床综合征,主要表现为因外侧踝关节不稳所导致的反复性踝关节扭伤。CAI 多见于首次踝关节扭伤后未能完全康复的患者,通常表现为长期的功能障碍和日常活动受限。流行病学数据显示,全球普通人群中约有 0.21%~2.66%的人曾经历过踝关节扭伤[1],其中 70%的首次踝关节扭伤者会发展为 CAI [2]。目前,CAI 的康复措施包括物理治疗、功能训练、手术治疗等。尽管这些康复手段在一定程度上缓解了症状,但许多患者在康复后仍然存在姿势不稳和再度扭伤的风险。因此,探索更有效的康复措施是当前研究的重要方向。

机械性不稳是由损伤引起的病理性松弛,导致关节活动度增加;而功能性不稳则与神经肌肉控制缺陷、本体感觉受损、力量不足以及姿势稳定性下降等因素密切相关[3]。无论损伤类型如何,CAI 患者通

常表现为本体感觉异常、姿势控制能力下降、运动功能异常和神经肌肉控制缺陷等症状。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, 中枢整合能力下降和运动输出不足, 从而引发姿势不稳[3]。此外, CAI 患者的足踝关节复合体常表现出运动受限和僵硬[4] [5], 这改变了运动过程的调节方式和模式, 进一步削弱姿势控制能力, 并增加再次受伤的风险。另有研究发现, CAI 患者的肌肉募集面积和体积减少[6]、静息阈值较高、活动阈值较低[7], 均导致中枢神经系统兴奋性降低。

目前, 针对 CAI 的康复主要集中在本体感觉训练、神经肌肉控制训练、姿势控制训练和肌力训练。一项 Meta 分析显示, 本体感觉训练可以有效提高神经肌肉控制能力, 增强维持姿势平衡能力, 改善踝关节位置觉, 从而减少踝关节扭伤的发生率[8]。翟宏伟等[9]研究进一步证明, 经过 6 周的对照试验, 发现在常规综合康复治疗训练的基础上, 增加平衡板训练、步行灵活性训练、半蹲训练等本体感觉训练可以有效提高踝关节位置感知能力。在神经肌肉控制训练方面, Kim 等[10]的研究表明, 6 周的训练能够显著改善 CAI 患者踝关节的外翻肌力和抗外部干扰、动作敏捷等的协调能力。在姿势控制训练方面, Anguish 等[11]通过为期四周的渐进式动态平衡训练, 发现患者的踝关节位置觉、中枢神经控制和动态姿势稳定性均有显著提升。此外, 研究表明, 肌力训练不仅能够提高肌肉力量, 在改善动态姿势稳定性方面, 其效果与平衡训练相似[12]。Hall 等[13]对 CAI 患者进行了不同类型的踝关节渐进抗阻训练, 结果表明, 踝关节周围肌群力量训练能显著改善踝关节的肌肉力量和稳定性。尽管上述康复手段在改善 CAI 患者症状方面取得了一定成效, 但仍存在一些不足之处, 例如, 目前尚无统一的治疗标准, 现有的训练模式多在单一运动平面上进行, 缺乏趣味性和特异性, 难以达到患者预期的恢复进程和实际运动需求, 部分训练需要特定仪器和专业人员指导。此外, CAI 患者的神经肌肉调控也可能存在障碍, 因此还需要关注传导通路方面的问题。基于以上挑战, 为了提高治疗效果, 建议考虑采用电刺激疗法, 并结合姿势控制与肌力训练进行综合治疗, 经皮神经电刺激联合弹力带训练的干预手段有望弥补以往研究的不足, 为 CAI 康复提供更全面的治疗策略。

经皮神经电刺激(Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation, TENS)通过电流刺激神经传导通路, 促进神经再生和修复, 进而改善本体感觉和神经肌肉控制。弹力带训练(Thera-Band Training)则通过利用和发展肌肉牵张反射, 增加运动信息的传入, 增强肌肉敏感性, 提高神经适应, 改善神经肌肉的协调性及肌肉募集效率, 增强肌肉力量和柔韧性, 进而提升关节稳定性[14]。已有研究表明, 弹性势能的储存与再利用、骨骼肌预拉伸增强[15]及牵张反射[16]是提高运动表现和预防运动损伤的主要机制。且弹力带具有便携性、经济性、多功能性等特点, 广受欢迎。本研究采用前者联合后者的康复训练方法, 旨在评估 TENS 联合弹力带训练对 CAI 患者姿势控制能力的影响, 探讨其潜在的作用机制, 为 CAI 的康复治疗提供新的思路和方法。

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。本研究采用双因素(干预方式 × 时间)重复测量方差分析的设计, 拟采用统计力(Power)为 0.95, 显著性水平为 0.05, 计算出需要最小样本量的总数为 42 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, 本研究预计纳入 45 名受试者。其中, 左侧扭伤 21 名, 右侧扭伤 24 名, 本研究进行随机分组(表 1)。根据国际踝关节协会提出的慢性踝关节不稳者筛选标准[17], 纳入标准如下: ① 一年内至少一次严重的踝关节扭伤病史并伴随疼痛、红肿等症状; ② 同侧踝关节在日常生活功能活动中出现踝关节不稳的症状 2 次及以上; ③ 汉化坎伯兰踝关节不稳量表得分 ≤ 24 [18]; ④ 踝关节前抽屉实验和距骨倾斜实验为阴性; ⑤ 有规律的运动

习惯，一周 3~5 次，每次 20~40 min。排除标准如下：① 有下肢骨折、感觉障碍或手术史；② 服用任何影响认知/运动表现的药物；③ 有精神类疾病史、家族史或其他影响运动功能的疾病；④ 同时有双侧踝关节扭伤严重损伤者。正式测试前告知受试者实验流程及实验目的并签署知情同意书。要求受试者实验前 24 小时内无剧烈运动，且无熬夜，测试前 4 小时不允许饮用具有诱发神经功能饮品或服用类似效果的药品，例如：酒精、可乐、咖啡、茶等。本研究得到杭州医学院伦理委员会的批准。

Table 1. Basic information

表 1. 基本信息

| 组别 | 年龄/岁 | 身高/cm | 体重/kg |
|-----------------------------|------------|-------------|------------|
| 经皮神经电刺激组(15 人) | 19.5 ± 1.6 | 172.3 ± 5.7 | 63.4 ± 8.2 |
| 弹力带运动训练组(15 人) | 19.7 ± 1.4 | 174.1 ± 6.2 | 68.1 ± 9.5 |
| 经皮神经电刺激联合 弹力带运动训练组(15 人) | 19.3 ± 1.8 | 173.5 ± 4.4 | 65.4 ± 7.3 |

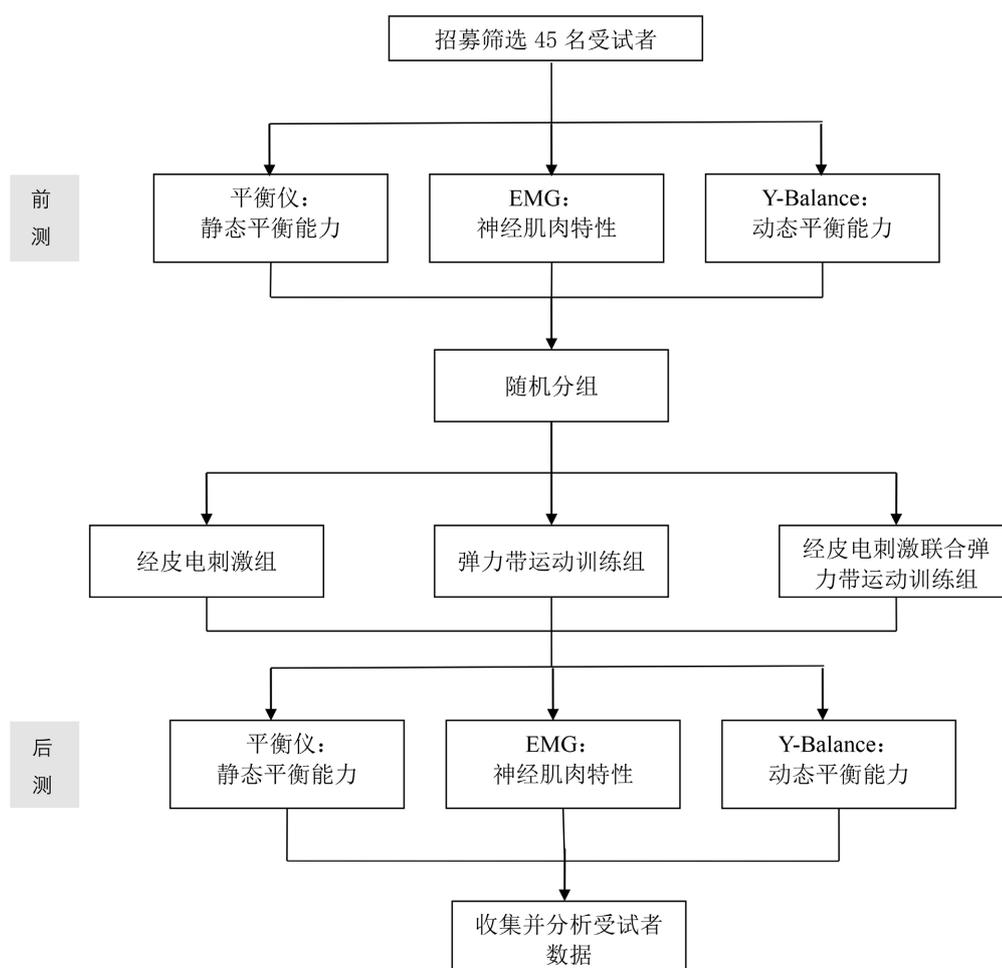


Figure 1. Experimental procedure

图 1. 实验流程

2.2. 实验流程

在实验干预前,对受试者进行随机分组,每组 15 人。受试者分别进行前测数据采集,包含动态/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,采集顺序随机。之后对三组受试者进行连续 3 个月不同方式的干预训练。干预结束第二天,再进行同前测的数据采集,用于后续对比研究(图 1)。

2.2.1. 静态平衡测试

受试者在 B-PHY-02 测试系统上完成静态平衡测试,测试包括双足睁眼/闭眼、单足(患侧)睁眼/闭眼站立。双足测试时,要求受试者双手抱胸,双脚与肩同宽,睁眼测试需平视前方“+”标记,尽量维持身体平衡并保持 30 s。单足测试时,非支撑腿需抬离平台 30~50 cm,站立 10 s。各采集 3 次有效数据,每次间隔 10 s。站立过程中,若搀扶他物、非支撑腿触地或未维持正确的站立姿势,则视为无效数据,需重新测试。

2.2.2. 动态平衡测试

在进行 Y-Balance 动态平衡测试前,测量受试者腿长,即髌前上棘到同侧脚内踝中点的距离。受试者患侧单腿赤足站在测试平台上,拇趾对准测试平台上的红色起始线,双手叉腰,非支撑腿尽可能地向前方、后内侧、后外侧推动测试板然后缓慢回到起始线上,分别记录不同方向推动测试板的最远距离(精确至 0.5 cm),每个方向顺序随机重复三次,换腿支撑,重复上述测试并记录结果,每次测试给予受试者 1 min 休息。测试过程中,若出现以下情况,则数据无效,需重新测试:① 单腿站立未维持平衡,出现双手未叉腰、跨步等;② 推动测试板时,脚触地;③ 非支撑腿未缓慢回到起始线。

2.2.3. 肌肉电生理测试

在肌肉电生理测试实验前,要求受试者清除小腿处毛发,保证光滑洁净。实验时,首先用酒精清洁所需皮肤,将肌电贴置于受试者患侧腿的腓肠肌内侧头、外侧头、比目鱼肌和胫骨前肌的肌腹,方向与肌纤维走向一致。实验人员对受试者患腿施加较大阻力,使其产生 3 s 最大等长收缩,过程中积极鼓励受试者用力达到最大肌肉力量。采集受试者患腿安静状态和最大自主跖屈、背屈状态的各 3 次肌电信号。

2.2.4. 干预过程

经皮神经电刺激组采用经皮神经电刺激仪[19]进行干预,实验人员对受试者患侧腿的腓肠肌内侧头、外侧头、比目鱼肌及胫骨前肌的肌腹进行电刺激干预并且记录每次受试者的最大耐受强度。治疗参数:脉冲模式,频率设为 75~100 Hz,脉宽设为 200~300 ms,强度均以患者耐受最适宜强度,每次治疗 20 min,每周一、三、五干预,进行 3 个月的干预。

弹力带运动训练组进行为期 3 个月的弹力带足踝训练。将弹力带一端固定,受试者分别向前、后、交叉和反向交叉四个方向完成患侧足踝训练。各方向拉动弹力带至自身极限 15 次,并维持 2 s,完成一个方向可休息 30 s,四个方向为一组,每组之间休息 1 min,每天连续做 4 组,每周 3 次。

经皮神经电刺激联合弹力带运动训练组 3 个月干预中,每次干预分别完成经皮神经电刺激和弹力带足踝组运动训练,运动量同上,干预顺序随机。

2.3. 数据处理

根据前测和后测采集的数据进行纵向和横向对比。受试者在平衡仪上进行双足和单足睁/闭眼任务态测试,该设备的压力传感器可以记录到静态姿势控制过程中的重心轨迹长度(总长度、x 轴长度和 y 轴长度)、重心移动速度,以及单位面积轨迹的变化,通过足底各参数分析受试者的静态平衡能力,三个数值越小,说明静态平衡能力越好,反之越差。通过 Y-Balance 对受试者进行动态平衡能力的评估,记录三个

方向数值和下肢长度, 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。采集的原始肌电数据经过带通滤波(20~250 Hz), 数据分析前进行全波整流处理。我们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。基于前人的研究方法, 我们同样使用均方根振幅(Root Mean Square, RMS)表示对趾背屈肌的电生理活动水平。计算公式如下:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} EMG^2(t) dt}$$

其中, t 为 EMG 的开始时间点, $t + T$ 为信号的结束时间点。

2.4. 统计分析

运用 SPSS 22.0 统计软件对数据进行分析, 计量资料以均数 \pm 标准差表示, 正态分布资料用独立样本 t 检验; 非正态分布资料采用独立样本的秩和检验, 比较采用双因素方差分析方法进行统计学分析; 计数资料用 χ^2 检验, $p < 0.05$ 为差异, 有显著性意义。

3. 研究结果

3.1. 静态平衡能力

方差分析结果显示, 在双足和单足睁眼站立的静态平衡测试中, 训练方式与训练时间之间没有显著的交互效应(表 2)。在双足闭眼站立测试中, 前后和左右摆动的平均距离均有显著交互作用。事后分析显示, 经过 3 个月干预训练, 实验组 I 和实验组 II 在静态平衡测试中的前后和左右摆动平均距离均较训练前显著减少, 且这两个实验组的训练效果均明显优于对照组。但实验组 I 与实验组 II 之间在双足闭眼站立的前后和左右摆动平均距离并未发现显著性差异。对于单足闭眼站立测试, 前后和左右的摆动平均距离以及平均速度均表现出训练方式与训练时间的显著交互作用。事后分析进一步显示, 与训练前相比, 实验组 I 和实验组 II 在训练后的摆动平均距离和速度均有显著下降。同时, 这两个实验组在训练后的摆动平均距离和速度上均显著低于对照组。此外, 实验组 I 的摆动距离和速度相较于实验组 II 均显著更小。

Table 2. The effect of different intervention conditions on static balance

表 2. 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 \pm 4.11 | 11.92 \pm 5.64 | 12.75 \pm 4.34 | 0.605 |
| | | 干预后 | 10.37 \pm 3.72 | 11.03 \pm 4.67 | 11.64 \pm 3.85 | |
| | 左右摆动平均距离(mm) | 干预前 | 6.37 \pm 4.68 | 6.45 \pm 3.57 | 6.13 \pm 4.21 | 0.476 |
| | | 干预后 | 5.51 \pm 4.23 | 5.68 \pm 4.71 | 5.59 \pm 4.67 | |
| | 前后摆动平均速度(mm/s) | 干预前 | 8.67 \pm 1.50 | 8.52 \pm 1.37 | 8.62 \pm 1.43 | 0.308 |
| | | 干预后 | 8.41 \pm 1.28 | 8.27 \pm 1.33 | 8.34 \pm 1.37 | |
| | 左右摆动平均速度(mm/s) | 干预前 | 6.57 \pm 1.21 | 6.41 \pm 1.13 | 6.52 \pm 1.37 | 0.679 |
| | | 干预后 | 6.42 \pm 1.52 | 6.53 \pm 1.27 | 6.44 \pm 1.23 | |

续表

| | | | | | | |
|--------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| 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 | |
| | 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 | | |

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。实验组 I：联合训练组；实验组 II：单一电刺激组；对照组：单一训练组。

3.2. 动态平衡能力

方差分析结果显示, 经过 3 个月的干预, 三组在 Y-Balance 动态平衡测试的前侧、后内侧、后外侧三个方向上, 其达到距离未发现存在训练方式与训练时间之间的交互作用。然而, 完成这三个方向的动态平衡测试所需时间存在显著的交互作用(表 3)。事后分析进一步显示, 在前侧平衡测试中, 三组在训练后的完成时间均较训练前有显著缩短, 且实验组 I 和实验组 II 的完成时间均显著短于对照组, 但两者之间无显著性差异。对于后内侧测试, 实验组 I 和实验组 II 的完成时间同样显著短于对照组。与训练前相比, 仅实验组 I 和实验组 II 的完成时间有显著减少, 且实验组 I 的完成时间比实验组 II 更短。在后外侧平衡测试中, 实验组 I 和实验组 II 的完成时间也均显著短于对照组。此外, 这三组在训练后的完成时间均较训练前有显著缩短, 且实验组 I 的完成时间仍比实验组 II 更短。

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

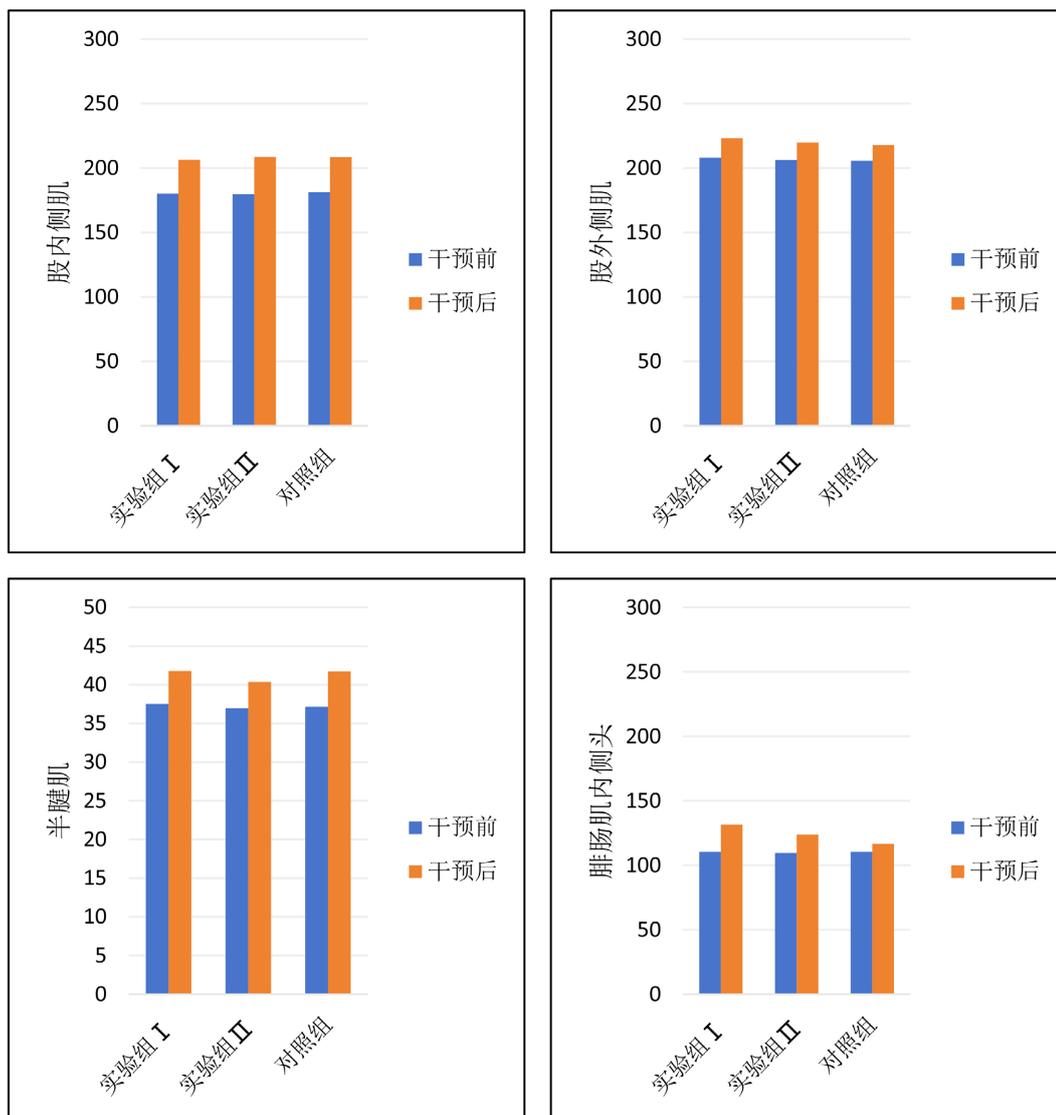
表 3. Y-Balance 动态平衡测试中不同干预模式对到达距离和移动阶段进行时间的影响

| 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 | |

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。

3.3. 肌肉电活动水平

方差分析结果显示, 对于最大跖屈、背屈阶段采集的腓肠肌内侧头、外侧头、比目鱼肌及胫骨前肌的肌肉活性均存在显著的干预方式与时间因素的交互作用(图 2)。事后分析进一步显示, 经过 3 个月干预后, 上述各肌肉的活性相较于干预前肌肉活性均显著增加。值得注意的是, 实验组 I 与实验组 II 的腓肠肌外侧头肌及腓肠肌内侧头肌肉活性较对照组更为显著的升高。此外, 实验组 I 中的腓肠肌外侧头肌的肌肉活性显著高于腓肠肌内侧头肌肉活性。



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。

Figure 2. The impact of different intervention conditions on RMS (%MVC)

图 2. 不同干预条件对 RMS 的影响(%MVC)

4. 分析讨论

本研究主要探讨经皮神经电刺激联合弹力带训练对提升慢踝患者姿势控制能力的影响。结果发现，联合训练组和单一刺激组闭眼站立摆动的平均距离和速度明显降低，且联合训练组闭眼单足站立优于单一刺激组。三组的动态平衡能力和肌肉活性均有所提高，但联合训练组完成测试所需时间最短以及肌肉活性显著提高。该结果揭示连续 3 个月联合干预可有效提高慢踝患者姿势控制能力，从而增加踝关节稳定性，减少再次扭伤风险。

在静态平衡方面，单足和双足睁眼的静态平衡能力均有所增强，表明单一刺激和联合训练可以显著改善睁眼平衡时的重心转移。人体保持平衡与小脑、基底神经节、调节策略和信息整合有关，受视觉、前庭觉和本体感觉的信息传入影响，其原因可能是在训练时均是在睁眼状态下。联合训练组单足闭眼站

立时的摆动距离和速度显著低于单一刺激组。这一现象可能归因于 TENS 通过刺激外周神经通路, 增强中枢神经对肌肉的本体感觉输入, 而弹力带训练则通过牵张反射和动态阻力强化踝周肌群的协调性。两者结合不仅提升了神经冲动的传导效率, 还通过反复的预拉伸增强了肌肉的弹性势能储存能力, 从而在闭眼状态下(视觉输入受限时)更有效地维持姿势稳定性。这与 Lazarou 等[20]的研究结果一致, 即本体感觉神经肌肉促进技术和平衡训练可通过增强外翻肌力与动作协调性改善 CAI 患者的静态平衡能力。此外, 联合训练组腓肠肌内侧头和外侧头的肌肉活性显著升高, 表明干预可能通过增加运动单位募集频率和同步性, 进一步优化了踝关节的静态支撑能力。

动态平衡测试中, 联合训练组在后内侧和后外侧方向的完成时间显著缩短, 表明其神经肌肉适应能力更强。这一结果与 Mollà-Casanova 等[21]的发现相符, 即动态平衡训练可显著提升踝关节位置觉和中枢整合能力。值得注意的是, 联合训练组在动态任务中的优势可能源于弹力带训练对多方向阻力的适应性刺激, 其通过增加肌肉敏感性促进了运动信息的传入效率, 而 TENS 则通过调节脊髓节段兴奋性增强了神经肌肉的快速响应能力。这种协同效应可能弥补了单一平面训练的不足, 更贴合实际运动中对多方向稳定性的需求。

肌肉电生理测试, 联合训练组腓肠肌外侧头的活性显著高于其他组, 反映了跖屈肌群力量与神经支配能力的同步增强。这与 Hubbard 等[22]的研究一致, 即 CAI 患者的跖屈肌力峰值力矩显著低于正常人, 而渐进抗阻训练可通过提高肌肉募集效率改善踝关节稳定性。此外, TENS 可能通过抑制脊髓抑制性中间神经元的活动, 降低静息阈值, 从而提升中枢神经系统的兴奋性, 进一步优化肌肉的激活模式。这种机制与弹力带训练对牵张反射的强化作用相结合, 可能共同促进了踝周肌群的协调收缩能力, 为动态姿势控制提供了生理学基础。

在本研究中, 依从性是指慢踝患者按照实验方案的要求, 坚持接受经皮神经电刺激治疗和弹力带训练的程度。良好的依从性能够确保康复方案的连续性和有效性, 促进患者踝关节功能的恢复, 提高生活质量。反之, 依从性差导致治疗效果不佳, 甚至延误康复进程。联合训练组的总依从率为 89.23%, 另外两组为 87.45% 和 88.72%。三组各自依从率相差较小, 且依从性较高, 反映干预措施本身对实验结果的影响较高。TENS 具有镇痛作用, 能够刺激神经纤维传递非疼痛信号, 干扰大脑对疼痛信息的接收和处理, 从而减轻踝关节疼痛。疼痛的减轻有助于患者更好地进行康复训练, 提高训练效果和依从性。弹力带训练通过提供不同强度和方向的阻力, 可以针对性地增强踝关节周围肌肉的力量, 特别是腓肠肌、比目鱼肌等关键肌肉群。肌肉力量的增强有助于提升踝关节的稳定性, 减少因肌肉无力而导致的踝关节扭伤风险。从运动学角度来看, 这种方法能够改善踝关节的运动功能、促进神经功能恢复、提升步态稳定性与平衡能力, 从而提高患者的生活质量并减少医疗成本。

尽管本研究证实了联合干预的有效性, 但仍存在一定局限性。例如, 样本量较小且随访时间较短, 未能评估长期疗效; 此外, 训练方案未纳入双任务模式, 而唐晨曦[17]指出, CAI 患者在复杂环境中的步态控制能力可能更易受损。未来研究可结合虚拟现实或功能性任务设计, 进一步验证联合干预的泛化效果。

5. 结论

综上所述, TENS 联合弹力带训练通过调控神经肌肉功能, 为 CAI 康复提供了新的策略。这一结果表明多模式康复策略可能通过协同作用优化 CAI 患者的神经肌肉功能。其效果不仅体现在动静平衡能力等生物力学指标的改善上, 更通过电生理数据揭示了肌肉激活模式的优化机制, 为临床制定个体化、多维度康复方案提供了理论依据。

声明

该病例报道已获得病人的知情同意。

参考文献

- [1] 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>
- [2] Doherty, C., Delahunt, E., Caulfield, B., Hertel, J., Ryan, J. and Bleakley, C. (2013) The Incidence and Prevalence of Ankle Sprain Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Epidemiological Studies. *Sports Medicine*, **44**, 123-140. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0102-5>
- [3] 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>
- [4] Fraser, J.J., Feger, M.A. and Hertel, J. (2016) Midfoot and Forefoot Involvement in Lateral Ankle Sprains and Chronic Ankle Instability. Part 1: Anatomy and Biomechanics. *International Journal of Sports Physical Therapy*, **11**, 992-1005.
- [5] 陈亚平, 胡志伟. 足踝疾病康复进展[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2018, 10(5): 19-23.
- [6] Kosik, K.B., Terada, M., Drinkard, C.P., Mccann, R.S. and Gribble, P.A. (2017) Potential Corticomotor Plasticity in Those with and without Chronic Ankle Instability. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **49**, 141-149. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000001066>
- [7] McLeod, M.M., Gribble, P.A. and Pietrosimone, B.G. (2015) Chronic Ankle Instability and Neural Excitability of the Lower Extremity. *Journal of Athletic Training*, **50**, 847-853. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.4.06>
- [8] 陈玉潇, 刘姣姣, 伊长松, 等. 本体感觉训练对运动员踝关节扭伤康复效果 Meta 分析[J]. 康复学报, 2020, 30(6): 489-496.
- [9] 翟宏伟, 孙洁, 巩尊科, 等. 本体感觉训练对踝关节功能障碍恢复的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2016, 38(2): 147-149.
- [10] Kim, T., Kim, E. and Choi, H. (2017) Effects of a 6-Week Neuromuscular Rehabilitation Program on Ankle-Evertor Strength and Postural Stability in Elite Women Field Hockey Players with Chronic Ankle Instability. *Journal of Sport Rehabilitation*, **26**, 269-280. <https://doi.org/10.1123/jsr.2016-0031>
- [11] Anguish, B. and Sandrey, M.A. (2018) Two 4-Week Balance-Training Programs for Chronic Ankle Instability. *Journal of Athletic Training*, **53**, 662-671. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-555-16>
- [12] Mollà-Casanova, S., Inglés, M. and Serra-Añó, P. (2021) Effects of Balance Training on Functionality, Ankle Instability, and Dynamic Balance Outcomes in People with Chronic Ankle Instability: Systematic Review and Meta-Analysis. *Clinical Rehabilitation*, **35**, 1694-1709. <https://doi.org/10.1177/02692155211022009>
- [13] Hall, E.A., Docherty, C.L., Simon, J., Kingma, J.J. and Klossner, J.C. (2015) Strength-training Protocols to Improve Deficits in Participants with Chronic Ankle Instability: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Athletic Training*, **50**, 36-44. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.71>
- [14] Asadi, A., Saez de Villarreal, E. and Arazi, H. (2015) The Effects of Plyometric Type Neuromuscular Training on Postural Control Performance of Male Team Basketball Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, **29**, 1870-1875. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000000832>
- [15] BOSCO, C., KOMI, P.V. and ITO, A. (1981) Prestretch Potentiation of Human Skeletal Muscle during Ballistic Movement. *Acta Physiologica Scandinavica*, **111**, 135-140. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1981.tb06716.x>
- [16] Markovic, G. and Mikulic, P. (2010) Neuro-musculoskeletal and Performance Adaptations to Lower-Extremity Plyometric Training. *Sports Medicine*, **40**, 859-895. <https://doi.org/10.2165/11318370-000000000-00000>
- [17] 唐晨曦. 双任务下两种防护方式对慢性踝关节不稳人群步态特征的影响[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海体育学院, 2020.
- [18] Gribble, P.A., Delahunt, E., Bleakley, C., Caulfield, B., Docherty, C., Fourchet, F., et al. (2013) Selection Criteria for Patients with Chronic Ankle Instability in Controlled Research: A Position Statement of the International Ankle Consortium. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, **43**, 585-591. <https://doi.org/10.2519/jospt.2013.0303>
- [19] 杨海, 蔡菊红, 周驰, 等. 超声波结合经皮神经电刺激对膝关节炎患者膝关节疼痛和功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(8): 1174-1179.
- [20] Lazarou, L., Kofotolis, N., Pafis, G. and Kellis, E. (2018) Effects of Two Proprioceptive Training Programs on Ankle Range of Motion, Pain, Functional and Balance Performance in Individuals with Ankle Sprain. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, **31**, 437-446. <https://doi.org/10.3233/bmr-170836>
- [21] Mollà-Casanova, S., Inglés, M. and Serra-Añó, P. (2021) Effects of Balance Training on Functionality, Ankle Instability, and Dynamic Balance Outcomes in People with Chronic Ankle Instability: Systematic Review and Meta-Analysis. *Clinical Rehabilitation*, **35**, 1694-1709. <https://doi.org/10.1177/02692155211022009>
- [22] Hubbard, T.J., Kramer, L.C., Denegar, C.R. and Hertel, J. (2007) Contributing Factors to Chronic Ankle Instability. *Foot & Ankle International*, **28**, 343-354. <https://doi.org/10.3113/fai.2007.0343>