



电容电阻式靶向疗法结合 β -羟基 β -甲基丁酸盐营养补充剂对老年肌少性肥胖患者的疗效观察*

王任杰^{1,2,3}, 梁玉祥^{1,2,3}, 王丽琼^{1,2,3}, 杨茗⁴, 蒋佼佼^{1,2,3 Δ}

1. 四川大学华西医院 康复医学中心(成都 610041); 2. 四川大学华西医院 康复医学研究所(成都 610041);
3. 康复医学四川省重点实验室(成都 610041); 4. 四川大学华西医院 老年医学中心(成都 610041)

【摘要】 目的 探讨电容电阻式靶向疗法(Transcutaneous Capacitive and Resistive Electric Transfer, TECAR)联合 β -羟基 β -甲基丁酸盐(β -hydroxy- β -methylbutyrate, HMB)营养补充对老年肌少性肥胖(sarcopenic obesity, SO)患者的综合干预效果。方法 采用随机对照试验设计,纳入140例符合亚洲肌少性肥胖诊断标准的老年患者,随机分为四组:A组(双安慰剂)、B组(TECAR+安慰剂)、C组(假TECAR+HMB)、D组(TECAR+HMB),每组35例。干预周期为12周,主要结局指标为简易体能状况量表(SPPB)总分,次要指标包括改良的Barthel指数(modified Barthel index, MBI)、微型营养评估简表(MNA-SF)评分、握力、体质量及体质量指数(BMI)。采用双因素方差分析评估TECAR与HMB的交互效应。结果 干预后,D组(TECAR+HMB)各项指标较干预前差异均有统计学意义:SPPB总分从(6.29 \pm 1.34)分提高至(8.06 \pm 1.51)分(P <0.001),其中步行速度[(2.71 \pm 0.86)分 vs. (1.97 \pm 0.82)分]、椅子站立测试[(2.60 \pm 0.55)分 vs. (2.11 \pm 0.47)分]和平衡能力[(2.74 \pm 0.74)分 vs. (2.20 \pm 0.76)分]三个子项均有明显提高;MBI从(71.74 \pm 14.41)提高至(79.91 \pm 10.52)(P <0.001);握力从(13.65 \pm 5.05) kg提升至(15.72 \pm 4.89) kg(P =0.001);体质量从(81.78 \pm 9.02) kg下降至(76.95 \pm 9.89) kg(P <0.001),BMI从(30.14 \pm 1.68) kg/m²下降至(28.34 \pm 2.33) kg/m²(P <0.001)。交互效应分析显示,TECAR和HMB在改善SPPB总分(F =16.374, P <0.001, η^2 =0.107)、降低BMI(F =14.328, P <0.001, η^2 =0.095)等方面具有显著协同作用。结论 TECAR联合HMB能显著改善老年肌少性肥胖患者的躯体功能、生活能力和BMI,且两者具有协同增效作用。

【关键词】 肌少性肥胖 TECAR疗法 β -羟基 β -甲基丁酸盐 随机对照试验

Efficacy of Transfer Energy Capacitive and Resistive Therapy Combined With β -Hydroxy- β -Methylbutyrate Nutritional Supplementation in Older Adults With Sarcopenic Obesity

WANG Renjie^{1,2,3}, LIANG Yuxiang^{1,2,3}, WANG Liqiong^{1,2,3}, YANG Ming⁴, JIANG Jiaojiao^{1,2,3 Δ} .

1. Department of Rehabilitation Medicine, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Rehabilitation Medicine Research Institute, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 3. Sichuan Provincial Key Laboratory of Rehabilitation Medicine, Chengdu 610041, China; 4. Department of Geriatrics, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Δ Corresponding author, E-mail: jiangjiaojiao1997@163.com

【Abstract】 **Objective** To investigate the comprehensive intervention effects of transfer energy capacitive and resistive (TECAR) therapy combined with β -hydroxy- β -methylbutyrate (HMB) nutritional supplementation in older patients with sarcopenic obesity (SO). **Methods** We conducted a randomized controlled trial, enrolling 140 older patients who met the Asian diagnostic criteria for SO. Participants were randomly assigned to 4 groups, including a double-placebo group (Group A), TECAR + placebo group (Group B), sham TECAR + HMB group (Group C), and TECAR + HMB group (Group D), with 35 patients in each group. The intervention lasted 12 weeks. The primary outcome measure was the total score of the Short Physical Performance Battery (SPPB). Secondary outcome indicators included the modified Barthel Index (MBI), scores of the Mini Nutritional Assessment-Short Form (MNA-SF), handgrip strength, body mass, and body mass index (BMI). A two-way analysis of variance (ANOVA) was used to assess the interaction effects between TECAR and HMB. **Results** After the intervention, Group D (TECAR + HMB) demonstrated significant improvements across all metrics. The SPPB total score increased from 6.29 \pm 1.34 to 8.06 \pm 1.51 (P < 0.001), with notable enhancements in walking speed (2.71 \pm 0.86 vs. 1.97 \pm 0.82), chair stand (2.60 \pm 0.55 vs. 2.11 \pm 0.47), and balance (2.74 \pm

* 四川省科技厅四川省科普培训项目(No. 2024JDKP0099)资助

Δ 通信作者, E-mail: jiangjiaojiao1997@163.com

出版日期: 2025-07-20

0.74 vs. 2.20 ± 0.76). MBI improved from 71.74 ± 14.41 to 79.91 ± 10.52 ($P < 0.001$). Handgrip strength increased from (13.65 ± 5.05) kg to (15.72 ± 4.89) kg ($P = 0.001$). Body mass decreased from (81.78 ± 9.02) kg to (76.95 ± 9.89) kg ($P < 0.001$), and BMI reduced from (30.14 ± 1.68) kg/m^2 to (28.34 ± 2.33) kg/m^2 ($P < 0.001$). Interaction analysis revealed significant synergistic effects between TECAR and HMB in improving the SPPB total scores ($F = 16.374$, $P < 0.001$, $\eta^2 = 0.107$) and reducing BMI ($F = 14.328$, $P < 0.001$, $\eta^2 = 0.095$). **Conclusion** TECAR therapy combined with HMB supplementation significantly enhances physical function, activities of daily living, and body composition in elderly patients with sarcopenic obesity, demonstrating a synergistic effect.

[Key words] Sarcopenic obesity Transfer energy capacitive and resistive therapy β-hydroxy-β-methylbutyrate Randomized controlled trial

随着全球人口老龄化持续加剧,老年综合症的防治成为一项重大的公共卫生挑战。肌少症与肥胖在老年人群中常同时发生,这种共存的状态被称为肌少性肥胖(sarcopenic obesity, SO),其特征是肌肉质量与力量进行性下降的同时伴随体脂尤其是异位脂肪(如内脏脂肪和肌内脂肪)的过度累积^[1-2]。SO不仅显著损害老年人的躯体功能、增加跌倒和失能风险,更与代谢综合征、胰岛素抵抗、心血管疾病及全因死亡率升高密切相关^[3-4],严重威胁老年人的健康寿命与生活质量^[5]。

改善肌肉健康是应对SO的核心策略。在营养干预方面,富含蛋白质及特定功能成分的口营养补充剂展现出应用潜力。其中,β-羟基β-甲基丁酸盐(β-hydroxy-β-methylbutyrate, HMB)作为亮氨酸的活性代谢物,已被证实能通过调节mTOR通路、抑制泛素蛋白酶体系统等机制,有效促进肌肉蛋白质合成并减少分解^[6-7]。近期PENG等^[8]开展的随机对照试验进一步证明,对社区居住的衰弱前期老年人每日补充含3 g HMB的高蛋白口服营养补充剂12周,可显著增加其大腿肌肉横截面积,改善营养状态(MNA-SF评分)和血清维生素D水平,并显示出降低肌内脂肪组织与肌肉横截面积比值的趋势。该研究首次采用MRI揭示了HMB对改善“肌肉质量”(即减少肌内脂肪浸润)的潜在效益,这对于SO患者尤为重要,因为肌内脂肪组织的累积是连接肌肉流失、代谢功能障碍和功能下降的关键病理环节^[9-10]。

然而,单一的营养干预(如补充HMB)对肌肉力量(如握力)和整体躯体功能[如简易体能状况量表(Simplified Physical Performance Battery, SPPB)评分]的改善效果并不显著^[11],提示需要更综合的干预策略。物理疗法是改善肌肉功能的重要手段。电容电阻式靶向疗法(transfer energy capacitive and resistive therapy, TECAR)是一种非侵入性的物理能量疗法。该技术通过电容和电阻模式在深层组织产生内生热效应和生物刺激作用,具有促进细胞代谢、深层透热和镇痛三重效果,不仅能够有效缓解疼痛,促进血液循环和淋巴循环,还能促进胶原蛋白和弹性

蛋白生成,提高细胞代谢效能,实现减脂的目的^[12-13]。

鉴于肌少性肥胖复杂的病理生理机制(包括肌肉流失、脂肪异位沉积、炎症、代谢紊乱等)以及单一干预模式的局限性。将针对性的TECAR疗法和已被证实有效的营养代谢干预(如HMB补充)相结合,形成多靶点、协同作用的综合治疗方案,有望为老年SO患者带来更全面的临床获益。然而,目前尚缺乏评估TECAR疗法与HMB营养补充联合应用对老年SO患者疗效的高质量研究。因此,本研究旨在通过一项随机对照试验,观察TECAR疗法结合HMB营养补充剂对老年SO患者的综合疗效,重点评估其对肌肉质量(包括肌肉量和肌内脂肪含量)、肌肉力量、躯体功能、身体成分及代谢指标的影响,以期为该类人群探索更有效的非药物干预策略提供循证依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

选取2023年5月–2024年4月期间就诊于四川大学华西医院老年医学中心及康复医学中心病房,诊断为老年SO的患者为研究对象。纳入标准:年龄 ≥ 65 岁,自身基础疾病稳定、生命体征平稳;SO诊断符合亚洲标准:①肌少症:AWGS 2019标准[握力男性 < 28 kg/女性 < 18 kg, SPPB评分 ≤ 9 分,DXA四肢肌量(ASMI)男性 < 7.0 kg/m^2 /女性 < 5.4 kg/m^2];②肥胖:体质量指数(BMI) ≥ 28 kg/m^2 或体脂率男性 $> 25\%$ /女性 $> 35\%$ (通过InBody 770测定);③可独立行走 ≥ 20 m,并能理解指令与合作。排除标准:①严重心肺疾病,包括纽约心脏病协会心功能分级(NYHA)Ⅲ~Ⅳ级、慢性阻塞性肺疾病全球倡议(GOLD)分级3~4级;②神经系统疾病(如卒中后遗症、帕金森病H&Y ≥ 3 期);③体内植入电子设备(如心脏起搏器、植入式心律转复除颤器等);④存在HMB使用禁忌症(包括苯丙酮尿症、重度肝肾功能不全);⑤近3个月内参与其他临床试验。所有参与者在接受干预前均签署了知情同意书。该研究已经通过四川大学华西医院伦理学委员会批准(2021年审第771号)。

1.2 试验设计

本研究采用随机对照试验设计,受试者和评估者均为盲法,而治疗师则为非盲法。样本量通过 G*Power 3.1 软件,基于 SPPB 评分变化进行估算。参考既往研究^[8],设定 HMB 主效应差异为 1.0 分、标准差为 1.5 分(效应量 $f=0.67$),ANOVA 检验 $\alpha=0.05$ 、 $\beta=0.20$ 时,总样本量需 116 例(即每组 29 例)。考虑到 20% 的脱落风险,扩大至每组 35 例,共纳入 140 例患者。该样本量对 SPPB 评分变化的检验效能达 92%。通过计算机生成随机数字表,由独立工作人员将 140 例肌少症患者按 1:1:1:1 的比例随机

分配到四组: A 组(双安慰组):假 TECAR+安慰剂营养剂; B 组(TECAR+安慰剂组); C 组(假 TECAR+HMB 组); D 组(TECAR+HMB 组)。其中安慰剂营养剂使用麦芽糊精,假 TECAR 进行无能量输出的治疗。各组干预 12 周后,对患者营养状况、体质量和身体功能状况进行评估。为保障结果客观性,分组及干预分配对受试者和结局评估人员设盲。本研究在四川大学华西医院老年医学中心与康复医学中心进行,所有干预措施和评估均由经过培训的康复治疗师实施,以确保措施的规范性。研究流程见图 1。

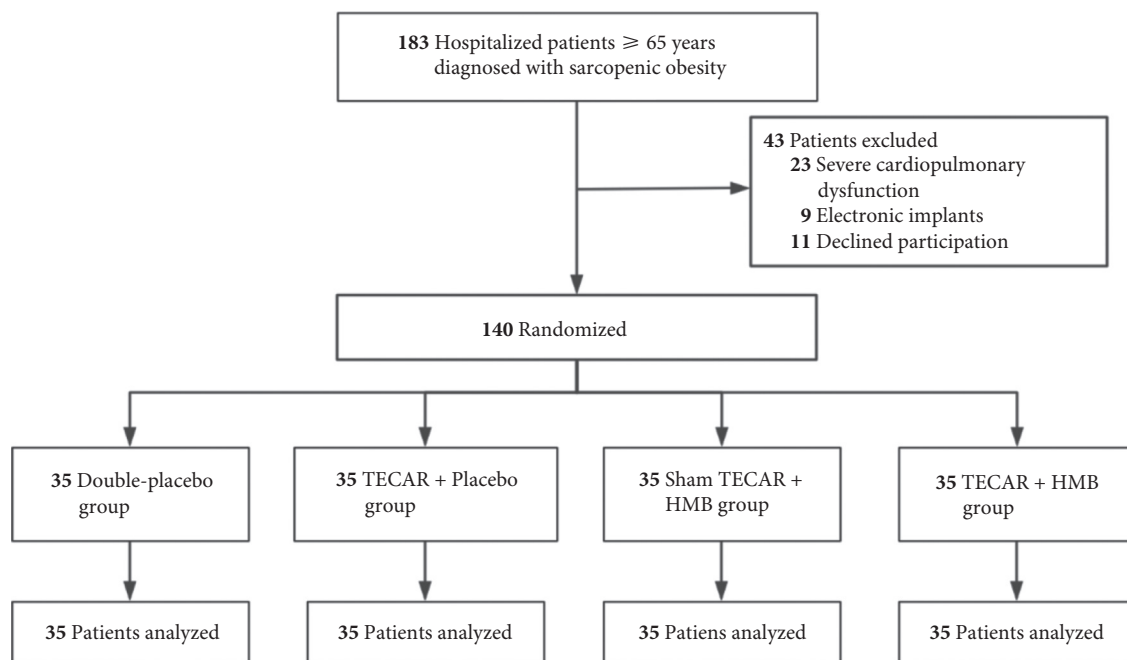


图 1 研究流程图

Fig 1 Study flowchart

1.3 干预方法

所有患者均接受常规护理及营养支持,并依据分组接受相应干预措施。各组干预过程均由专业经验丰富的康复治疗师进行一对一指导。

1.3.1 双安慰组

接受使用 WINBACK 设备进行的无能量输出模拟治疗(假 TECAR),同时每日口服等剂量安慰剂营养剂(麦芽糊精)。

1.3.2 TECAR+安慰剂营养剂组

接受 WINBACK 设备提供的真实 TECAR 治疗(电容+电阻双模式,治疗部位:股四头肌/臀肌/腹直肌,强度:500 kHz,30 min/session,3 sessions/week)联合等剂量安慰剂营养剂(麦芽糊精)。

1.3.3 假 TECAR+HMB 组

接受 WINBACK 设备进行的无能量输出模拟治疗(假

TECAR)联合 HMB 营养补充剂,3 g/d。

1.3.4 TECAR+HMB 组

接受 WINBACK 设备提供的真实 TECAR 治疗(电容+电阻双模式,治疗部位:股四头肌/臀肌/腹直肌,强度:500 kHz,30 min/session,3 sessions/week)联合 HMB 营养补充剂,3 g/d。

1.4 观察指标

所有数据均在干预前(基线)和干预 12 周后由经过统一培训与认证的独立评估员采集。评估员不参与治疗实施,且对受试者的分组信息保持盲态。采用标准化操作程序(SOP)确保测量方法的一致性。对关键指标(如 SPPB 评分、BMI 等)实施双人背对背独立评分及随机抽样复核,以最大限度减少评估偏倚。

1.4.1 主要结局指标

主要结局指标为 SPPB 总分。采用标准流程评估躯体

功能,包括3个动作:个体双脚并拢、半前后位和前后位站立的能力、常规步速测试(一般4 m)所需时间以及从椅子站起坐下反复5次需要时间,来评估其平衡能力、步态、力量强度和耐力情况。每个项目0~4分,总分0~12分,分值越高功能越好。

1.4.2 次要结局指标

1.4.2.1 改良的Barthel指数(MBI)

评估日常生活活动能力(进食、如厕、转移等10项),总分0~100分,≥60分通常认为具备“基本生活自理能力”。

1.4.2.2 MNA-SF评分

营养状态采用MNA-SF量表评估,包含体质量下降、进食能力等6个维度,总分0~14分。由经培训后的营养师在基线及干预12周后,小腿围使用SECA卷尺测量非优势侧小腿最粗处。

1.4.2.3 握力

握力采用Jamar液压测力计(Model J00105)测量优势手。受试者取标准坐位,连续测量3次取最大值。评估员均经过专业培训,设备每日校准(误差<0.1 kg)。

1.4.2.4 体质量及BMI

体质量及BMI使用InBody 770多频生物电阻抗仪测量。受试者空腹8 h后赤足站立,手握电极保持静止约60 s

获取数据。设备每日校准,操作员经标准化培训。体成分分析包括骨骼肌量和体脂率。

1.5 统计学方法

在干预前的基线比较中,对年龄、体质量、身高、BMI、ASMI、握力、MNA-SF评分、MBI、SPPB总分及各项指标等连续变量,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验四组之间的均值差异;对性别等分类变量,则运用 χ^2 检验来分析组间分布的差异性。在干预前后组内比较中采用配对样本 t 检验,用于评估各组在干预前后各指标的差异。通过双因素方差分析(Two-Way ANOVA)开展主体间效应检验,分析HMB和TECAR这两个因素的主效应及其交互效应。计数资料比较采用 χ^2 检验或Fisher's精确检验。检验水准选取双侧 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 基线资料

本研究共纳入140例受试者,随机分为四组(每组 $n=35$)。基线资料比较结果显示:所有连续变量(年龄、体质量、身高、BMI、ASMI、握力、MNA-SF、MBI、SPPB各子项及总分组间差异均无统计学意义($P>0.05$);性别构成比组间差异也无统计学意义($P=0.745$)。见表1和表2。

表1 患者部分基线资料比较

Table 1 Comparison of part of the baseline characteristics of the study population

Characteristic	A group ($n=35$)	B group ($n=35$)	C group ($n=35$)	D group ($n=35$)	F	P
Age/yr.	73.31 ± 4.40	71.86 ± 5.00	72.31 ± 4.61	72.86 ± 4.53	0.655	0.581
Male/case (%)	16 (45.7)	15 (42.9)	19 (54.3)	15 (42.9)	1.235	0.745
Height/cm	162.49 ± 8.27	166.71 ± 8.48	164.40 ± 9.02	164.60 ± 9.10	1.375	0.253
ASMI/(kg/m ²)	4.96 ± 1.12	4.96 ± 0.81	5.36 ± 1.20	4.97 ± 1.06	1.257	0.292

ASMI: appendicular skeletal muscle mass index.

2.2 干预前后效果比较

与基线相比,TECAR+HMB组的主要结局指标SPPB总分及次要指标(包括握力、MNA-SF评分和MBI)均提高,体质量和BMI下降(均 $P<0.05$);TECAR+安慰剂组MBI、SPPB总分、椅子站立测试(chair stand)子项评分及平衡能力(balance)子项评分提高,体质量下降(均 $P<0.05$),但在MNA-SF评分、握力以及BMI方面未见明显变化($P>0.05$);假TECAR+HMB组在体质量和BMI方面均下降,且MNA-SF评分、SPPB总分和步行速度(walking)子项评分提高(均 $P<0.05$);双安慰组所有指标均无明显变化($P>0.05$)。见表2。

2.3 组间疗效对比

TECAR+HMB组在躯体功能(SPPB总分, $P<0.001$), BMI($F=6.587, P<0.001$)、营养状态(MNA-SF, $P=0.014$)方面均优于其他组;SPPB各子项得分在组间比较中差异

均有统计学意义($P<0.05$),且以TECAR+HMB组表现最佳。体质量、握力和MBI方面,虽组间差异未达统计学意义,但TECAR+HMB组在体质量下降和MBI提高方面仍呈现数值上的改善趋势。见表2。

2.4 交互效应分析

在本研究中,TECAR和HMB联合干预在多个指标上表现出显著协同效应,其中主要结局指标SPPB总分($F=16.374, P<0.01, \eta^2=0.107$),次要结局指标体质量($F=4.591, P=0.049, \eta^2=0.033$)、BMI($F=14.328, P<0.001, \eta^2=0.095$)、MNA-SF($F=7.000, P=0.009, \eta^2=0.049$)中均表现出较好的协同作用。见表3。

3 讨论

本随机对照试验探讨了TECAR疗法联合HMB营养补充对老年SO患者的综合干预效果。研究结果支持了

表 2 四组干预前后主要指标的比较

Table 2 Comparison of outcome measures between the four groups before and after intervention

Index	A group (n = 35)	B group (n = 35)	C group (n = 35)	D group (n = 35)	F	P
Body mass/kg						
Before intervention	82.34 ± 8.15	85.21 ± 9.06	82.79 ± 9.36	81.78 ± 9.02	1.004	0.393
After intervention	82.16 ± 7.40	80.66 ± 6.16	80.76 ± 9.20	76.95 ± 9.89	2.533	0.060
t	0.335	2.265	3.185	7.738		
P	0.740	0.030	0.003	< 0.001		
BMI/(kg/m ²)						
Before intervention	31.18 ± 2.02	30.62 ± 1.98	30.58 ± 1.72	30.14 ± 1.68	1.852	0.141
After intervention	31.16 ± 2.27	29.20 ± 3.43	29.89 ± 2.77	28.34 ± 2.33	6.587	< 0.001
t	0.115	1.846	2.727	7.689		
P	0.909	0.074	0.010	< 0.001		
Handgrip strength/kg						
Before intervention	13.69 ± 5.11	14.67 ± 5.28	15.37 ± 5.65	13.65 ± 5.05	0.873	0.457
After intervention	14.01 ± 4.00	15.01 ± 2.67	15.67 ± 5.37	15.72 ± 4.89	1.170	0.324
t	-0.685	-0.534	-0.658	-3.640		
P	0.498	0.597	0.515	0.001		
MNA-SF						
Before intervention	10.89 ± 1.95	11.09 ± 2.23	10.80 ± 1.95	10.97 ± 1.79	0.132	0.941
After intervention	11.09 ± 1.92	11.17 ± 1.99	11.51 ± 1.95	12.40 ± 1.52	3.679	0.014
t	-1.364	-0.620	-5.632	-10.865		
P	0.182	0.539	< 0.001	< 0.001		
MBI						
Before intervention	73.86 ± 14.74	73.80 ± 15.19	75.74 ± 14.28	71.74 ± 14.41	0.435	0.728
After intervention	74.17 ± 13.65	76.14 ± 14.27	76.71 ± 11.88	79.91 ± 10.52	1.239	0.298
t	-0.320	-4.083	-0.850	-3.636		
P	0.751	< 0.001	0.401	0.001		
SPPB score (walking)						
Before intervention	2.00 ± 0.73	1.97 ± 0.75	2.03 ± 0.82	1.97 ± 0.82	0.043	0.988
After intervention	2.03 ± 0.71	2.23 ± 0.73	2.29 ± 0.79	2.71 ± 0.86	4.867	0.003
t	-0.197	-1.950	-2.172	-7.195		
P	0.845	0.059	0.037	< 0.001		
SPPB score (chair stand)						
Before intervention	2.00 ± 0.64	2.00 ± 0.77	2.06 ± 0.84	2.11 ± 0.47	0.218	0.884
After intervention	2.11 ± 0.68	2.23 ± 0.73	2.26 ± 0.61	2.60 ± 0.55	3.671	0.014
t	-1.071	-2.260	-1.484	-5.667		
P	0.292	0.030	0.147	< 0.001		
SPPB score (balance)						
Before intervention	2.11 ± 0.63	1.91 ± 0.82	2.03 ± 0.82	2.20 ± 0.76	0.899	0.443
After intervention	2.20 ± 0.83	2.29 ± 0.83	2.26 ± 0.70	2.74 ± 0.74	3.628	0.015
t	-0.723	-3.404	-1.486	-3.769		
P	0.475	0.002	0.147	0.001		
SPPB total score						
Before intervention	6.29 ± 1.34	5.89 ± 1.18	6.11 ± 1.64	6.29 ± 1.34	0.522	0.668
After intervention	6.34 ± 1.26	6.74 ± 1.12	6.80 ± 1.26	8.06 ± 1.51	11.512	< 0.001
t	-1.113	-4.909	-2.797	-8.460		
P	0.273	< 0.001	0.008	< 0.001		

BMI: body mass index; MNA-SF: Mini Nutritional Assessment-Short Form; MBI: modified Barthel index; SPPB: Simplified Physical Performance Battery.

笔者的假设, TECAR与HMB联合干预(D组)在改善躯体功能(SPPB总分)、营养状态(MNA-SF评分)和身体成分

(BMI)方面表现出显著的协同效应(交互效应 $P < 0.05$, η^2 介于 0.030 ~ 0.107)。具体而言, D组在SPPB总分

表3 交互效应分析 (n=140)
Table 3 Analysis of interaction effects (n = 140)

Index	HMB main effect (P)	TECAR main effect (P)	HMB × TECAR interaction (P)	Partial η^2 (interaction)	Adjusted R^2
Body mass/kg	0.68 (0.410)	3.33 (0.070)	4.59 (0.049)	0.033	0.032
BMI/(kg/m ²)	0.19 (0.665)	5.25 (0.024)	14.33 (< 0.001)	0.095	0.108
Handgrip strength/kg	0.42 (0.521)	0.50 (0.479)	4.59 (0.048)	0.033	0.004
MNA-SF	1.63 (0.204)	2.40 (0.123)	7.00 (0.009)	0.049	0.055
MBI	0.08 (0.775)	1.46 (0.229)	2.18 (0.143)	0.016	0.005
SPPB score (walking)	0.76 (0.384)	5.77 (0.018)	8.07 (0.005)	0.056	0.077
SPPB score (chair stand)	1.10 (0.297)	4.38 (0.038)	5.54 (0.020)	0.039	0.055
SPPB score (balance)	2.32 (0.130)	3.83 (0.052)	4.73 (0.031)	0.034	0.054
SPPB total score	3.83 (0.052)	14.33 (< 0.001)	16.37 (< 0.001)	0.107	0.185

The abbreviations are explained in the note to Table 1. Degrees of freedom (df) were (1, 136) for main effects and interactions, and (3, 136) for the model. Partial η^2 was calculated as $SS_{interaction}/(SS_{interaction} + SS_{error})$.

(+1.77分, $P < 0.001$)、平衡能力、起立行走能力及握力方面的改善幅度均明显优于单一干预组(B组和C组)和安慰剂组(A组), 且BMI明显降低(-1.80 kg/m^2 , $P < 0.001$)。这表明, 针对SO复杂的病理生理机制(包括肌肉流失、脂肪异位沉积、代谢紊乱等)采取多模式协同干预策略具有显著临床优势。

3.1 HMB的作用基础

HMB作为亮氨酸活性代谢物, 可通过激活mTOR通路促进肌肉蛋白质合成, 并抑制泛素-蛋白酶体系统以减少分解^[14-15]。本研究结果显示, 单独补充HMB(C组)能改善营养状态(MNA-SF评分升高)并降低体质量及BMI, 但对提高肌肉力量和改善复杂躯体功能(如SPPB中的平衡、起立)方面的效果有限, 提示单一营养干预在改善神经肌肉协调和功能方面的局限性。

3.2 TECAR的增效机制

TECAR疗法通过电容电阻双模式在深层组织(如股四头肌、臀肌和腹直肌)中产生内生热效应和生物电刺激^[16-17]。其潜在增效途径包括: ①改善局部微循环, 增加目标肌肉血流量, 可能促进HMB及其底物向肌细胞的输送; ②增强细胞代谢活性和线粒体功能, 为肌肉蛋白合成提供能量支持; ③减轻肌肉组织的低度炎症状态, 创造更有利的合成代谢环境; ④可能通过神经肌肉刺激增强肌肉收缩效率, 这与D组在SPPB平衡和起立测试中表现出的明显优势相符。TECAR单独应用(B组)虽能改善部分躯体功能(如SPPB中的椅子站立和平衡能力), 但对营养状态和握力无影响, 凸显其与营养补充的互补价值。

3.3 协同效应的临床意义

交互效应分析证实, 联合干预在提升SPPB总分($\eta^2 = 0.107$)、降低BMI($\eta^2 = 0.095$)和改善营养状况MNA-SF评分($\eta^2 = 0.049$)方面存在明显协同作用。联合干预组SPPB总分显著提高(+1.77分)源于对SO核心病理的同步

干预。HMB通过激活mTOR通路促进肌肉蛋白合成^[18], 而TECAR产生的内生热效应可增加局部血流量^[19], 加速HMB向肌肉组织的递送。同时, TECAR的生物刺激作用降低肌肉微环境中的TNF- α 、IL-6等促炎因子^[20-21], 减轻炎症对肌肉合成的抑制, 这解释了为何联合干预组握力提升(+2.07 kg)明显优于HMB单药组($P = 0.001$)。联合干预组BMI明显降低(-1.80 kg/m^2), 这可能与HMB通过抑制脂肪生成转录因子减少脂质沉积^[22], 而TECAR的热效应可激活脂肪细胞线粒体解偶联蛋白, 促进脂质氧化密切相关^[17]。

尽管本研究证实了TECAR疗法联合HMB营养补充的有效性, 但仍存在一定的局限性。首先, 该研究为单中心设计, 未涵盖社区及失能老年人; 其次, 缺乏核磁共振检查下评估肌内脂肪变化; 另外, 干预周期仅12周, 仅有干预前后的结果, 缺少对干预持久性的评价, 未来需延长随访验证效果持续性。

综上所述, TECAR疗法联合HMB营养补充可明显提高老年SO患者的日常生活活动能力、肌力、躯体功能状态, 并且能更好地降低体质量及BMI, 从而有效地减少跌倒的风险, 降低相关并发症, 改善生活品质, 这对于减轻家庭和社会的照护负担具有重要意义。同时该联合治疗易于实施且效果显著, 非常适合在社区和家庭环境中推广应用, 为衰弱老年人规避运动风险提供了替代选择。未来的研究应进一步探索TECAR疗法联合HMB营养补充对IMAT的影响, 寻找在不同人群中的最佳实施方案, 并评估其长期效果和成本效益, 以促进该联合治疗方法在SO患者中的更广泛应用。

* * *

作者贡献声明 王任杰负责论文构思、正式分析、研究方法、软件、可视化、初稿写作和审读与编辑写作, 梁玉祥和王丽琼负责调查研究和研究项目管理, 杨茗负责经费获取、提供资源和监督指导, 蒋佼佼负责经

费获取和审读与编辑写作。所有作者已经同意将文章提交给本刊,且对将要发表的版本进行最终定稿,并同意对工作的所有方面负责。

Author Contribution WANG Renjie is responsible for conceptualization, formal analysis, methodology, software, visualization, writing--original draft, and writing--review and editing. LIANG Yuxiang and WANG Liqiong are responsible for investigation and project administration. YANG Ming is responsible for funding acquisition, resources, and supervision. JIANG Jiaojiao is responsible for funding acquisition and writing--review and editing. All authors consented to the submission of the article to the Journal. All authors approved the final version to be published and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Declaration of Conflicting Interests All authors declare no competing interests.

参 考 文 献

- LORENZO M, DONINI L, Busetto L, et al. Definition and diagnostic criteria for sarcopenic obesity: ESPEN and EASO consensus statement. *Clin Nutr*, 2022, 41(4): 990-1000. doi: 10.1016/j.clnu.2021.11.014.
- KAHYAOGLU Z, DENIZ O, GÜNER M, et al. Sarcopenic obesity is independently associated with frailty in geriatric outpatients: a cross-sectional study from university hospital. *Nutr Clin Pract*, 2025, 40(1): 123-134. doi: 10.1002/ncp.11326.
- 梁玉祥,王任杰,蒋佼佼,等. 奥塔戈运动对老年肌少症患者日常生活活动能力的影响. *四川大学学报(医学版)*, 2025, 56(2): 543-548. doi: 10.12182/20250360608.
- LIANG Y X, WANG R J, JIANG J J, et al. Effect of the otago exercise program on activities of daily living in older adults with sarcopenia. *J Sichuan Univ (Med Sci)*, 2025, 56(2): 543-548. doi: 10.12182/20250360608.
- MO X, SHEN L, WANG X, et al. Melatonin mitigates sarcopenic obesity via microbiota and short-chain fatty acids: evidence from epidemiologic and *in vivo* studies. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2025, 16(2): 345-357. doi: 10.1002/jcsm.13869.
- YANG M, HU M, ZHANG Y, et al. Sarcopenic obesity is associated with frailty among community-dwelling older adults: findings from the WCHAT study. *BMC Geriatr*, 2022, 22(1): 456. doi: 10.1186/s12877-022-03617-z.
- 刘雅茹,朱鸣雷,刘晓红,等. β -羟基- β -甲基丁酸治疗肌少症的临床研究现状. *中华老年多器官疾病杂志*, 2018, 17(4): 309-312. doi: 10.11915/j.issn.1671-5403.2018.04.068.
- LIU Y R, ZHU M L, LIU X H, et al. B-hydroxy-B-methylbutyrate in treatment of sarcopenia in the elderly: clinical research update. *Chinese Journal of Multiple Organ Diseases in the Elderly*, 2018, 17(4): 309-312. doi: 10.11915/j.issn.1671-5403.2018.04.068.
- VIANA M V, BECCE F, PANTET O, et al. Impact of β -hydroxy- β -methylbutyrate (HMB) on muscle loss and protein metabolism in critically ill patients: a RCT. *Clin Nutr*, 2021, 40(8): 4872-4881. doi: 10.1016/j.clnu.2021.07.018.
- PENG L N, CHENG Y C, YU P C, et al. Oral nutritional supplement with β -hydroxy- β -methylbutyrate (HMB) improves nutrition, physical performance and ameliorates intramuscular adiposity in pre-frail older adults: a randomized controlled trial. *J Nutr Health Aging*, 2021, 25(6): 767-773. doi: 10.1007/s12603-021-1621-7.
- VISSER M, GOODPASTER B H, KRITCHEVSKY S B, et al. Muscle mass, muscle strength, and muscle fat infiltration as predictors of incident mobility limitations in well-functioning older persons. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2005, 60(3): 324-333. doi: 10.1093/gerona/60.3.324.
- JURDANA M, ŽIBERNA L. Sarcopenic obesity and hypertension in elderly patients: a narrative review of pathophysiology and management strategies. *Ann Ist Super Sanita*, 2023, 59(3): 256-267. doi: 10.4415/ANN.23_03_10.
- WU H, XIA Y, JIANG J, et al. Effect of β -hydroxy- β -methylbutyrate supplementation on muscle loss in older adults: a systematic review and meta-analysis. *Arch Gerontol Geriatr*, 2015, 61(2): 168-175. doi: 10.1016/j.archger.2015.06.020.
- UZUN Ö, ÖZCAN D S N, ARSLAN H B, et al. Impact of TECAR therapy on pain and function in adhesive capsulitis: a randomized controlled trial. *Lasers Med Sci*, 2025, 40(1): 45. doi: 10.1007/s10103-025-04492-x.
- GARCÍA-RUEDA L, CABANAS-VALDÉS R, SALGUEIRO C, et al. Immediate effects of TECAR therapy on lower limb to decrease hypertonia in chronic stroke survivors: a randomized controlled trial. *Disabil Rehabil*, 2024, 47(5): 1234-1242. doi: 10.1080/09638288.2024.2365992.
- FORTUNA R, SAWATSKY A, FULLER J C, et al. Effects of β -hydroxy- β -methylbutyrate supplementation on muscle mass and strength in onabotulinumtoxin type-A-injected and contralateral quadriceps femoris in rabbits. *J Rehabil Med*, 2021, 53(9): jrm00220. doi: 10.2340/16501977-2866.
- STAHN A C, MAGGIONI M A, GUNGA H C, et al. Combined protein and calcium β -hydroxy- β -methylbutyrate induced gains in leg fat free mass: a double-blinded, placebo-controlled study. *J Int Soc Sports Nutr*, 2020, 17(1): 33. doi: 10.1186/s12970-020-0336-1.
- VAHDATPOUR B, HAGHIGHAT S, SADRI L, et al. Effects of transfer energy capacitive and resistive on musculoskeletal pain: a systematic review and meta-analysis. *Galen Med J*, 2023, 11: e2407. doi: 10.31661/gmj.v11i.2407.
- TEZEN Ö, ATA A M, UZUN Ö, et al. Comparison of the effectiveness of ultrasound and transfer energy capacitive and resistive (TECAR) therapy in patients with carpal tunnel syndrome. *Lasers Med Sci*, 2025, 40(1): 38. doi: 10.1007/s10103-025-04412-z.
- SATO S, NOMURA M, YAMANA I, et al. A new *in vitro* muscle contraction model and its application for analysis of mTORC1 signaling in combination with contraction and β -hydroxy- β -methylbutyrate administration. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2019, 83(10): 1885-1893. doi: 10.1080/09168451.2019.1625261.
- RODRIGUEZ-SANZ J, PÉREZ-BELLMUNT A, LÓPEZ-DE-CELIS C, et al. Thermal and non-thermal effects of capacitive-resistive electric transfer application on different structures of the knee: a cadaveric study. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 12345. doi: 10.1038/s41598-020-78612-8.
- TASHIRO Y, SUZUKI Y, NAKAYAMA Y, et al. The effect of capacitive and resistive electric transfer on non-specific chronic low back pain. *Electromagn Biol Med*, 2020, 39(4): 437-444. doi: 10.1080/15368378.2020.1851255.
- BELTRAME R, RONCONI G, FERRARA P E, et al. Capacitive and resistive electric transfer therapy in rehabilitation: a systematic review. *Int J Rehabil Res*, 2020, 43(4): 291-298. doi: 10.1097/MRR.0000000000000435.
- WANG J, CUI C, CHIM Y N, et al. Vibration and β -hydroxy- β -methylbutyrate treatment suppresses intramuscular fat infiltration and adipogenic differentiation in sarcopenic mice. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2020, 11(2): 564-577. doi: 10.1002/jcsm.12535.

(2025-06-21收稿, 2025-07-01修回)

编辑 刘华



开放获取 本文使用遵循知识共享署名—非商业性使用4.0国际许可协议(CC BY-NC 4.0), 详细信息请访问

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>。

OPEN ACCESS This article is licensed for use under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (CC BY-NC 4.0). For more information, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

© 2025 《四川大学学报(医学版)》编辑部

Editorial Office of Journal of Sichuan University (Medical Sciences)