

双层人工真皮联合外用rh-bFGF在手指端皮肤缺损修复中的应用

黄静, 林木良, 王婷婷, 胡小峰, 郑晓飞, 冷楠楠

[东部战区总医院秦淮医疗区骨科(手足外病区) 江苏南京 210000]

[摘要]目的: 探究双层人工真皮联合外用重组人碱性成纤维细胞生长因子(Recombinant Human Basic Fibroblast Growth Factor, rh-bFGF)在手指端皮肤缺损修复中的应用效果。**方法:** 选取2018年8月-2023年12月笔者医院收治的手指端创伤并进行皮肤缺损修复的70例(96指)患者为研究对象,根据是否采用外用rh-bFGF分为两组。对照组31例(40指)患者彻底清创后,采用双层人工真皮覆盖创面,观察组39例(56指)患者在双层人工真皮覆盖创面基础上采用外用rh-bFGF治疗。记录两组一期愈合情况、愈合时间、温哥华瘢痕量表(VSS)评分及手部功能评分情况。**结果:** 观察组一期愈合率达87.18%,高于对照组的64.52% ($P < 0.05$)。对照组11例患者与观察组5例患者拆除人工真皮硅胶膜后有少量创面残留,均进行植皮手术治疗,两组植皮区成活率均为100%。两组感染率(对照组6.45%,观察组0.00%)比较,差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。观察组愈合时间为(31.36 ± 3.15) d,短于对照组愈合时间(38.94 ± 3.87) d。术后6个月,观察组VSS各评分均低于对照组 ($P < 0.05$);两组手部功能各维度评分比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。**结论:** 双层人工真皮联合外用rh-bFGF可提高手指端创伤后皮肤缺损修复患者一期愈合率,降低植皮手术率,缩短修复部位愈合时间,术后瘢痕较轻,值得临床推荐。

[关键词] 重组人碱性成纤维细胞生长因子(rh-bFGF); 双层人工真皮; 指端缺损; 瘢痕; 手功能

[中图分类号]R622 [文献标志码]A [文章编号]1008-6455(2026)01-0058-04

The Application of Double - Layer Artificial Dermis Combined with Topical rh - bFGF in the Repair of Skin Defects at the Finger Tip

HUANG Jing, LIN Muliang, WANG Tingting, HU Xiaofeng, ZHENG Xiaofei, LENG Nannan

[Department of Orthopedics (Hand and Foot Surgery Ward), Qinhuai Medical Area, Eastern Theater General Hospital, Nanjing 210000, Jiangsu, China]

Abstract: Objective To investigate the application effect of double-layer artificial dermis combined with topical application of recombinant human basic fibroblast growth factor (rh-bFGF) in the repair of skin defects at the tips of hands. **Methods** Seventy cases (96 fingers) of patients with finger-end trauma with skin defect repair admitted from August 2018 to December 2023 were selected and divided into two groups according to whether recombinant human fibroblast growth factor was used or not. In the control group, 31 patients (40 fingers) were treated with double-layer artificial dermis to cover the trauma after thorough debridement, and in the observation group, 39 patients (56 fingers) were treated with recombinant human fibroblast growth factor on the basis of double-layer artificial dermis to cover the trauma. Phase I healing, healing time, Vancouver Scar Scale (VSS) score and hand function score were recorded in both groups. **Results** The one-stage healing rate of the observation group was 87.18%, which was higher than 64.52% of the control group ($P < 0.05$). Eleven patients in the control group and five patients in the observation group had a small amount of traumatic residue after removing the artificial dermal silicone membrane, and all of them underwent implantation surgery, and the survival rate of implantation area in both groups was 100%. The infection rate of the two groups (6.45% in the control group and 0.00% in the observation group) was compared, and the difference was not statistically significant ($P > 0.05$). Both groups were followed up for 6 months, and the healing time of the observation group was (31.36 ± 3.15) days, which was shorter than the healing time of the control group (38.94 ± 3.87) days ($P < 0.05$). At 6 months after operation, the VSS scores of the observation group were lower than those of the control group ($P < 0.05$). There was no significant difference in the scores of each dimension of hand function between the two groups ($P > 0.05$). **Conclusion** The combined use of double-layered artificial dermis and topical rh-bFGF can improve the one-stage healing rate in patients with

fingertip trauma-induced skin defects, reduce the need for skin grafting surgery, shorten the healing time at the repair site, result in lighter postoperative scars, and is clinically recommended.

Key words: recombinant human fibroblast growth factor (rh-bFGF); double-layer artificial dermis; fingertip defect; scar; hand function

手部创伤后皮肤缺损的处理对手部功能的恢复至关重要^[1]。手指末端皮肤软组织缺损的修复尤为复杂，因为其位置特殊，周围缺乏足够的自由组织用于直接闭合创面^[2]。传统修复方法，如皮瓣转移和游离皮瓣移植，虽能覆盖创面，但存在皮瓣肿胀、色素沉着和坏死的风险^[3]。人工真皮的应用为这一难题提供了新的解决方案，自1996年首个人工真皮Integra获批以来，人工真皮技术已在全球广泛应用。在我国，广泛使用的人工合成真皮如日本的Pelnac敷料，以及我国自主研发的双层人工真皮，均在结构上与Pelnac类似，有效改善了手指端皮肤缺损的临床治疗效果^[4]。然而，部分患者仍面临创面愈合慢和功能重建障碍的问题。本研究引入了外用rh-bFGF，该因子能促进成纤维细胞增殖和分化，加速伤口愈合，优化局部微环境，减少瘢痕形成，从而增强修复质量^[5-7]。本研究旨在探讨双层人工真皮联合外用rh-bFGF在手指端创伤皮肤缺损修复及功能重建中的应用效果，以期为临床提供更有效的治疗策略。

1 资料和方法

1.1 一般资料：回顾性选取2018年8月-2023年12月笔者医院收治的手指端创伤并进行皮肤缺损修复的70例（96指）患者为研究对象。纳入标准：外伤致手指指端缺损；年龄18~60岁；受伤至手术时间<6 h；临床资料完整无缺失。排除标准：受伤前存在手足发绀症；合并血栓闭塞性脉管炎、动脉硬化闭塞症；存在精神疾病；孕期或哺乳期患者；合并严重躯体疾病；合并高血压、糖尿病。根据是否采用外用rh-bFGF将纳入患者分为两组。对照组31例（40指），缺损面积0.5~4.0 cm²，合并指端骨外露面积0.2~0.8 cm²。观察组39例（56指），缺损面积0.4~4.0 cm²，合并指端骨外露面积0.2~0.7 cm²。两组一般资料比较差异无统计学意义（*P*>0.05），具有可比性，见表1。

1.2 方法

1.2.1 对照组：患者在彻底清创后，采用双层人工真皮覆盖创面。首先，在指根神经阻滞麻醉下，用3%过氧化氢、

0.9%氯化钠溶液和0.5%碘伏多次冲洗伤口。对于露骨情况，若条件允许，在保持指骨长度的同时，用咬骨钳修整指骨至与软组织平齐，确保露出骨头面积不超过0.5 cm²，并尽量用邻近筋膜覆盖。同时，修复甲床或甲根裂伤。将国产双层人工真皮（Lando，国械注准20173461356）浸泡于0.9%氯化钠溶液中10~15 min，裁剪以适应伤口大小，固定后轻刺小孔以防积血，并用纱布轻压包扎。术后进行3~5 d的抗感染治疗，每1~2 d更换敷料1次。术后4~6周，根据愈合情况拆除硅胶膜，评估治疗效果。人工真皮硅胶膜拆除后如有创面残留，进行植皮手术治疗。

1.2.2 观察组：双层人工真皮覆盖创面基础上采用外用rh-bFGF（南海朗肽制药有限公司，20 000 IU，国药准字S20040053）治疗。双层人工真皮覆盖后，每次更换敷料时在创口上均匀喷洒生长因子，使用剂量为150 IU/cm²，持续使用1周。其他操作同对照组。

1.3 观察指标：术后统计比较两组一期愈合率、植皮手术率、感染情况及愈合时间。术后随访6个月，采用温哥华瘢痕量表（VSS）^[8]评估创面瘢痕，VSS包括色泽（0~3分）、厚度（0~4分）、血管分布（0~3分）、柔软度（0~5分），量表满分15分，分值越高提示瘢痕越严重。采用手部功能评分量表^[9]评估患者手部功能，量表评分标准见表2。

表2 手部功能评分量表

项目	0分	5分	10分
肤色	紫红	稍微有点深	与周围肤色相近
外观	较皮面高>5 mm	较皮面高3~5 mm	较皮面高<2 mm
出汗	无	减少	正常
温度	皮温差>1℃	皮温差0.6℃~1℃	皮温差≤0.5℃
痛觉	无	迟钝	正常
两点辨别觉	无	>10 mm	≤10 mm
持物稳定性	不稳	一般	稳
使用情况	疼痛	偶尔疼痛	无疼痛

1.4 统计学分析：采用SPSS 26.0软件分析数据，计数资料

表1 两组一般资料比较

[例（%）， $\bar{x}\pm s$]

组别	性别		受伤至手术时间/h	年龄/岁	缺损面积/cm ²	受伤原因			合并指端骨外露	外露面积/cm ²
	男	女				碾压伤	挤压伤	切割伤		
对照组（ <i>n</i> =31）	20（64.52）	11（35.48）	2.04±0.56	42.89±9.44	1.89±0.74	14（45.16）	8（25.81）	9（29.03）	25（80.65）	0.49±0.22
观察组（ <i>n</i> =39）	24（61.54）	15（38.46）	1.99±0.47	43.01±10.15	1.92±0.78	20（51.28）	12（30.77）	7（17.95）	37（94.87）	0.48±0.26
χ^2/t 值	0.066		0.406	-0.051	0.096	0.259	0.208	1.203	3.453	0.171
<i>P</i> 值	0.798		0.686	0.960	0.924	0.611	0.648	0.273	0.063	0.865

表3 两组治疗基本情况比较

[例(%), $\bar{x}\pm s$]

组别	一期愈合	植皮手术	感染情况		愈合时间/d
			感染	未感染	
对照组 (n=31)	20 (64.52)	11 (35.48)	2 (6.45)	29 (93.55)	38.94±3.87
观察组 (n=39)	34 (87.18)	5 (12.82)	0 (0.00)	39 (100.00)	31.36±3.15
χ^2/t 值		5.031		2.590	9.037
P值		0.025		0.108	<0.001

表5 两组手部功能评分比较

($\bar{x}\pm s$, 分)

组别	肤色	外观	出汗	温度	痛觉	两点辨别觉	持物稳定性	使用情况
对照组 (n=31)	9.25±0.63	9.65±0.23	9.36±0.58	8.25±0.86	9.85±0.11	8.89±0.57	9.33±0.35	8.96±0.47
观察组 (n=39)	9.36±0.45	9.70±0.18	9.42±0.56	8.33±0.94	9.81±0.12	8.83±0.61	9.42±0.30	9.02±0.44
t值	0.851	1.021	0.438	0.367	1.437	0.421	1.158	0.550
P值	0.398	0.311	0.663	0.715	0.155	0.675	0.251	0.584

应用 n (%)描述,采用卡方检验或秩和检验比较,符合正态分布的计量资料用($\bar{x}\pm s$)描述,比较应用 t 检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

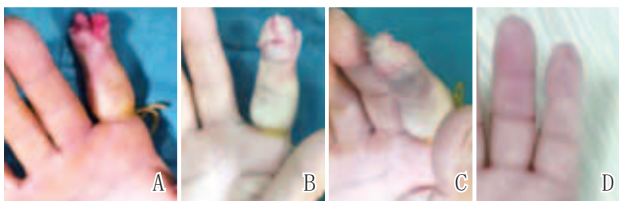
2 结果

2.1 两组治疗基本情况:术后,观察组一期愈合率达87.18%,高于对照组一期愈合率的64.52%($P<0.05$)。对照组11例患者与观察组5例患者拆除人工真皮硅胶膜后有少量创面残留,均进行植皮手术治疗。观察组植皮手术率为12.82%,低于对照组植皮手术率的35.48%($P<0.05$)。两组植皮区成活率均为100%。治疗期间,对照组出现2例感染,观察组无,但组间比较差异无统计学意义($P>0.05$)。观察组创面愈合时间短于对照组($P<0.05$)。见表3。

2.2 瘢痕及手部功能评分:术后6个月,观察组VSS各评分均低于对照组($P<0.05$);两组手部功能各维度评分比较差异无统计学意义($P>0.05$)。见表4~5。观察组典型病例见图1。

表4 两组VSS评分比较 ($\bar{x}\pm s$, 分)

组别	色泽	厚度	血管分布	柔软度
对照组 (n=31)	1.12±0.28	1.68±0.26	1.24±0.22	1.89±0.42
观察组 (n=39)	0.89±0.21	1.11±0.23	0.96±0.24	1.33±0.28
t值	3.927	9.721	5.029	6.673
P值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001



注: A. 术前; B. 术后即刻; C. 术后10 d; D. 术后6个月

图1 观察组典型病例治疗前后

3 讨论

手指端创伤是一种常见的创伤类型,常由机械损伤、化学灼伤或热灼伤等原因引起。手指端创伤不仅会导致皮肤缺损,还可能涉及深层组织损伤,包括肌腱、神经和血管^[10]。这类创伤的修复和功能重建一直是临床治疗中的一个难题。由于手指端皮肤面积小且功能复杂,如何在保障创面愈合的同时,最大限度地恢复手指的功能,是临床关注的焦点。近年来,随着生物材料和生物技术的进步,人工真皮在创面修复中的应用逐渐受到重视。双层人工真皮底层由去端肽处理的牛跟腱胶原蛋白与糖胺聚糖组成,形成一个多孔的基质^[11]。这种特殊的组合提供了一个稳固的支架,可以促进周围细胞和组织向受损区域的迁移和新生,从而加速愈合过程。rh-bFGF是一种具有强效促细胞增殖和分化能力的多肽类生长因子,能够促进成纤维细胞的增殖和胶原蛋白的合成,加速创面愈合过程^[12]。已有研究表明,单独应用双层人工真皮或外用rh-bFGF在创面修复中均具有一定的疗效^[13-14]。然而,关于二者联合应用于手指端创伤皮肤缺损修复及功能重建的研究较少。

本研究结果显示,观察组的一期愈合率显著高于对照组,这可能归因于rh-bFGF对新血管形成和成纤维细胞活性的促进作用。此外,观察组的植皮手术需求显著低于对照组,这进一步说明,在手指末端创伤后皮肤缺损的修复过程中,双层人工真皮联合外用rh-bFGF的治疗策略显著提高了一期愈合率,并有效降低了植皮手术的需求。具体来说,rh-bFGF的作用主要通过激活特定的细胞内信号传导通路实现,其中最关键的是有丝分裂原活化蛋白激酶/细胞外信号调节激酶(MEK/ERK)和磷酸肌醇3激酶/蛋白激酶B(PI3K/Akt)两大通路^[15]。MEK/ERK信号通路在调控细胞生长和分化中具有关键作用。rh-bFGF通过该路径的激活,促进细胞周期的推进,增加细胞分裂的频率,从而加快组织的生长和再生。此外,ERK激酶还直接影响基因表达,进一步调节细胞的增殖和分化行为^[16]。PI3K/Akt通路则主要

与细胞的存活、增殖及代谢活动相关。rh-bFGF通过激活此通路,不仅能增强细胞对外界生存信号的响应,提高细胞抵抗凋亡的能力,还可以促进细胞对营养物质的吸收和利用,增强细胞的生长动力。Akt激酶的激活还与细胞的迁移能力增强直接相关,这对于伤口愈合过程中细胞移动至创伤区域尤为重要^[17]。通过这些信号通路的综合作用,rh-bFGF不仅促进了成纤维细胞的增殖,还有助于加快DNA的合成速度,从而提高组织修复和再生的效率。

本研究结果还显示,两组感染率(对照组6.45%,观察组0.00%)比较,差异无统计学意义,这说明双层人工真皮联合外用rh-bFGF的治疗方式并未显著增加感染风险。从治疗时机来看,在本研究中两组患者接受手术治疗的时机相近,使得局部组织的炎症反应程度和微生物滋生环境处于相似状态,进而在感染率上体现出明显差别。另外,两组进行了相同的创面清创方法,感染相关的混杂因素在一定程度上得到控制,排除了因清创方式不同而对感染率造成的潜在影响,使得两组最终的感染率差异无统计学意义。观察组愈合时间明显短于对照组。这是因为,观察组的治疗方法首先建立了双层人工真皮支架来引导真皮层的重建,随后应用外用rh-bFGF来促进表皮层的增殖,从而避免了仅依靠双层人工真皮治疗所需的自然表皮化过程。此外,外用rh-bFGF不仅加速了伤口内皮细胞的增殖,还促进了这些细胞产生血小板衍生生长因子、趋化因子等多种炎症相关的趋化分子,这些分子有效地吸引单核细胞和巨噬细胞迁移到伤口区域。这种炎症细胞的集聚有助于迅速清除受损和坏死的细胞,进而激发大量成纤维细胞和新血管的形成,加速肉芽组织的形成与表皮的重建,从而显著缩短了伤口愈合的时间^[18]。

在瘢痕的外观和功能方面,观察组色泽评分、厚度评分、血管分布评分、柔软度评分低于对照组。这体现了双层人工真皮联合外用rh-bFGF的治疗策略在促进手指末端创伤后皮肤缺损的愈合速度和改善瘢痕质量方面的显著优势。rh-bFGF不仅可促进毛细血管的形成和表皮层的重新覆盖,还能通过抑制前胶原基因的活性,减少胶原蛋白的过量积累,从而有效避免病理性瘢痕的形成^[19]。此外,rh-bFGF的作用还包括加强指腹末端毛细血管网的重建,这有助于改善治疗区域的色泽,使其在外观上相较于对照组显示出更佳的恢复效果^[20]。

进一步对两组手部功能进行评估,结果显示,观察组肤色、外观、出汗、温度、痛觉、两点辨别觉、持物稳定性及使用情况评分与对照组比较,差异无统计学意义,这表明虽然治疗方法不同,但在这些具体的功能和感观属性方面,两种治疗策略的效果相似,没有显著区分。双层人工真皮联合外用rh-bFGF可以加速皮肤愈合并改善瘢痕条件,主要影响的是愈合速度和瘢痕质量,而不直接影响手部的功能性恢复。但这一结果也可能源于“手部功能评分”本身的局限性。该评分体系虽从多个维度对手部功

能进行了量化,但各维度评分仍存在一定主观性,且部分指标的区分度相对有限,难以精准捕捉两组治疗方式在手部功能恢复上的细微差异。同时,患者的依从性差异可能影响功能恢复效果,如在康复训练的执行程度上,即使接受相同的治疗,依从性好、积极配合康复训练的患者可能手部功能恢复更佳,但本研究未能充分考量这一因素。此外,患者受伤前的手部基础功能状态、工作性质及日常手部活动习惯等个体差异,也可能对术后手部功能评分产生干扰,掩盖了治疗方法间的潜在差异,从而导致观察组与对照组在手功能方面未呈现显著差异,未来研究还将更全面综合地考量这些因素,以更精准地评估治疗方式对手部功能恢复的真实影响。

综上所述,双层人工真皮联合外用rh-bFGF可提高手指端创伤后皮肤缺损修复患者一期愈合率,降低植皮手术率,缩短修复部位愈合时间,术后瘢痕较轻,但对手功能重建的影响不大。本研究的局限性在于样本量相对较小且研究设计为单中心。未来研究应包括更多样本和多中心数据,以验证这些初步结果的普适性。此外,探讨外用rh-bFGF的不同剂量和应用时间对手部功能恢复的影响也是未来研究重要方向。

[参考文献]

- [1]Huang Y, Lin F, Hao C Y, et al. [Effects of modified proper digital artery island flap in repairing complex fingertip defects][J]. Zhonghua Shaoshang Yu Chuangmian Xiufu Zazhi, 2023,39(10):947-952.
- [2]Mendame Ehya R E, Bounda G A, Xiao W, et al. Clinical effectiveness of dorsal branch skin flap of proper palmar digital artery with distal pedicle in repairing of fingertip soft tissue defect: A 1-year prospective study in a chinese tertiary referral teaching hospital[J]. J Hand Surg Asian Pac Vol, 2021,26(2):265-273.
- [3]Yi L, Xu Z, Sun J, et al. [Clinical application of neurovascular staghorn flap for repairing of defects in fingertips][J]. Zhongguo Xiufu Chongjian Waike Zazhi, 2023,37(6):717-720.
- [4]李哲哲,姚忠军,赵飞,等. 双层人工真皮修复指端皮肤缺损的临床疗效观察[J].生物医学工程与临床, 2021,25(1):58-61.
- [5]施佳,朱海军,卢伟伟. 皮耐克一期修复伴有骨或肌腱外露的大面积皮肤缺损[J].骨科,2022,13(5):414-417.
- [6]李中成,丁伟,薛成龙,等. 双层人工真皮在手指皮肤皮下组织缺损中的应用[J].实用手外科杂志, 2022,36(4):431-433.
- [7]吴磊,祁义民,杨蓓勃,等. 人工真皮联合重组人酸性成纤维细胞生长因子在指端皮肤缺损的临床应用[J].医学研究生学报, 2023,36(1):45-49.
- [8]Kim J K, Park J Y, Shin Y H, et al. Reliability and validity of Vancouver Scar Scale and Withey score after syndactyly release[J]. J Pediatr Orthop B, 2022,31(6):603-607.
- [9]王宗立. 带蒂皮瓣修复手部创面与手功能效果评价[J].现代康复, 1999,3(12):1412.
- [10]Hao R, Wang H, Huo Y, et al. Fingertip degloving injury coverage with homodactyle bipediced dorsal island flap[J]. Hand Surg

- Rehabil, 2023,42(2):134-140.
- [11] 郭佳敏, 杨豪, 李祺, 等. 局部注射富血小板血浆联合双层人工真皮治疗四肢肌腱外露创面的临床疗效[J]. 中华烧伤与创面修复杂志, 2023,39(9):849-856.
- [12] 江榕, 何洪青, 陈小彬, 等. 大隐静脉高位结扎联合泡沫硬化剂注射术+外用重组人酸性成纤维细胞生长因子治疗重度静脉曲张合并溃疡患者的临床疗效[J]. 血管与腔内血管外科杂志, 2024,10(3):257-261,281.
- [13] Wu J M, Yang H, Li Q, et al. [Clinical efficacy of local injection of platelet-rich plasma combined with double-layer artificial dermis in treating wounds with exposed tendon on extremity][J]. *Zhonghua Shaoshang Yu Chuangmian Xiufu Zazhi*, 2023,39(9):849-856.
- [14] 夏冰心, 张少翔, 徐海波. rb-bFGF联合美容缝合技术在儿童颌面部软组织创伤愈合中的应用[J]. 中国美容医学, 2024,33(9):62-65.
- [15] 王阳, 刘铁成, 李为朋, 等. 生肌愈皮软膏联合重组牛碱性成纤维细胞生长因子凝胶治疗体表慢性溃疡的临床研究[J]. 现代药物与临床, 2024,39(5):1294-1298.
- [16] Mauro A K, Clemente L, Khurshid N, et al. Src kinase partially mediates cytokine-induced endothelial dysfunction[J]. *Pregnancy Hypertens*, 2023,34:83-89.
- [17] Kriauciūnaitė K, Pociūtė A, Kaušylė A, et al. Basic fibroblast growth factor opens and closes the endothelial blood-brain barrier in a concentration-dependent manner[J]. *Neurochem Res*, 2023,48(4):1211-1221.
- [18] 李江怀, 梁延军, 范学敏, 等. 重组人碱性成纤维细胞生长因子联合封闭负压引流技术对创面修复的疗效及瘢痕形成的影响[J]. 实用皮肤病学杂志, 2024,17(5):282-286.
- [19] 唐黎璐, 李笑眉, 张筱薇, 等. 负压创面治疗技术联合重组人碱性成纤维细胞生长因子持续冲洗在慢性创面治疗中的应用[J]. 中国美容医学, 2022,31(8):36-39.
- [20] 温旭, 申晶. 纳米银抗菌水凝胶敷料联合重组人碱性成纤维细胞生长因子在踝部开放骨折创面的应用[J]. 中国组织工程研究, 2021,25(29):4638-4643.
- [收稿日期]2024-11-05
- 本文引用格式: 黄静, 林木良, 王婷婷, 等. 双层人工真皮联合外用rh-bFGF在手指端皮肤缺损修复中的应用[J]. 中国美容医学, 2026,35(1):58-62.
- ~~~~~
- (上接第17页)
- [11] 钟喆, 张正朴, 曾祥龙. 新型周期性细胞压缩牵张仪的研制与应用[J]. 现代口腔医学杂志, 2010,25(3):170-173.
- [12] Zhong Z, Zeng X L, Ni J H, et al. Comparison of the biological response of osteoblasts after tension and compression[J]. *Eur J Orthod*, 2013, 35(1): 59-65.
- [13] Huang H, Williams R C, Kyrkanides S. Accelerated orthodontic tooth movement: molecular mechanisms[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2014, 146(5):620-632.
- [14] Jiang J H, Li Y, Zhang Q. Clinical applications and mechanisms of low-level laser therapy in orthodontics: a narrative review[J]. *Laser Therapy*, 2022,31(2):89-98.
- [15] Mostafavinia A, Dehdehi L, Ghoreishi S K, et al. Effect of in vivo low-level laser therapy on bone marrow-derived mesenchymal stem cells in ovariectomy-induced osteoporosis of rats[J]. *J Photochem Photobiol B*, 2017, 175:29-36.
- [16] Abramovitch-Gottlieb L, Gross T, Naveh D, et al. Low-level laser irradiation enhances osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells on 3D scaffolds: updated evidence from in vitro and in vivo models[J]. *Lasers Med Sci*, 2020,35(8):1789-1801.
- [17] 邵馨, 王爽, 郭小梅, 等. 低能量激光对衰老牙周膜干细胞增殖和成骨分化功能的影响[J]. 山西医科大学学报, 2022,53(11):1452-1457.
- [18] Wang L, Wu F, Liu C, et al. Low-level laser irradiation modulates the proliferation and the osteogenic differentiation of bone marrow mesenchymal stem cells under healthy and inflammatory condition[J]. *Lasers Med Sci*, 2019,34(1):169-178.
- [19] Oliveira F A, Matos A A, Matsuda S S, et al. Low level laser therapy modulates viability, alkaline phosphatase and matrix metalloproteinase-2 activities of osteoblasts[J]. *J Photochem Photobiol B*, 2017,169:35-40.
- [20] Alazzawi M M J, Husein A, Alam M K, et al. Effect of low level laser and low intensity pulsed ultrasound therapy on bone remodeling during orthodontic tooth movement in rats[J]. *Prog Orthod*, 2018,19(1):10.
- [21] Heo J H, Choi J H, Kim IR, et al. Combined treatment with Low-level laser and rhbmp-2 promotes differentiation and mineralization of osteoblastic cells under hypoxic stress[J]. *Tissue Eng Regen Med*, 2018,15(6):793-801.
- [22] He Y, Leng J, Li K, et al. A multifunctional hydrogel coating to direct fibroblast activation and infected wound healing via simultaneously controllable photobiomodulation and photodynamic therapies[J]. *Biomaterials*, 2021, 278:121164.
- [23] Singh A, Singh V, Tiwari R L, et al. The IRAK-ERK-p67phox-Nox-2 axis mediates TLR4, 2-induced ROS production for IL-1 β transcription and processing in monocytes[J]. *Cell Mol Immunol*, 2016, 13(6): 745-763.
- [24] Twigg S R F, Vorgia E, McGowan S J, et al. Reduced dosage of ERF causes complex craniosynostosis in humans and mice and links ERK1/2 signaling to regulation of osteogenesis[J]. *Nat Genet*, 2013,45(3):308-313.
- [收稿日期]2024-05-24
- 本文引用格式: 李杨, 董世涛, 周佳星, 等. 低能量激光通过激活ROS/ERK通路促进张力诱导下MC3T3-E1成骨分化的机制研究[J]. 中国美容医学, 2026,35(1):14-17,62.