

• 慢病专题:代谢性疾病 •

## 低强度激光照射对加速糖尿病患者创面愈合及改善经皮氧张力的效果\*

王擒虎,杨欢,车红霞<sup>△</sup>

(甘肃省第三人民医院内分泌科,甘肃兰州 730020)

**[摘要]** **目的** 探讨低强度激光照射(LLLT)对糖尿病患者创面愈合及改善经皮氧张力(TcPO<sub>2</sub>)的效果。**方法** 该研究为前瞻随机对照试验,选取 2023 年 1 月至 2024 年 10 月该院收治的糖尿病伴全身溃疡患者 120 例,采用随机数字表法分为研究组和对照组,每组 60 例。对照组给予基础治疗,包括口服降糖药物、创面常规处理等;研究组在对照组治疗基础上加用低强度 LLLT 治疗。2 组患者均接受 4 周治疗。记录 2 组患者临床疗效、创面愈合情况、创面氧合状态指标、炎症因子水平、不良症状发生情况等。通过 logistics 回归模型分析影响疗效的独立因素。**结果** 研究组患者总有效率,以及治疗后创面 TcPO<sub>2</sub>、组织氧饱和度均明显高于对照组,治疗后 7、14、21、28 d 溃疡面积均明显低于对照组,溃疡愈合时间明显短于对照组,治疗后创面 pH 值下降趋势明显优于对照组,治疗后肿瘤坏死因子- $\alpha$ 、白细胞介素-6、C 反应蛋白水平均明显低于对照组,不良症状总发生率明显低于对照组,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。治疗前创面 TcPO<sub>2</sub>、治疗方法是影响患者预后的独立危险因素(优势比=1.301、0.141, $P < 0.001$ 、0.006)。**结论** 低强度 LLLT 可明显加速糖尿病伴全身创面溃疡患者创面愈合,改善 TcPO<sub>2</sub>,降低炎症因子水平,且安全性较高。

**[关键词]** 低强度激光照射; 糖尿病; 创面愈合; 经皮氧张力; 炎症因子

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2026.02.014 中图法分类号:R587.2

文章编号:1009-5519(2026)02-0317-07

文献标识码:A

### Effect of Low-Level Laser Therapy on accelerating wound healing and improving transcutaneous oxygen tension in diabetic patients\*

WANG Qinhu, YANG Huan, CHE Hongxia<sup>△</sup>

(Department of Endocrinology, the Third People's Hospital of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**[Abstract]** **Objective** To investigate the effect of low-level laser therapy(LLLT) on wound healing and transcutaneous oxygen tension(TcPO<sub>2</sub>) in diabetic patients. **Methods** A total of 120 diabetic patients with systemic ulcerative lesions were enrolled from our hospital between January 2023 and October 2024 in this prospective randomized controlled trial. Participants were randomly allocated to the control group or the test group, with 60 participants in each group, using a random number table. The control group received basic treatment, including oral hypoglycemic drugs and conventional wound treatment; the test group added low-level laser irradiation to the control group. Both groups received 4 weeks of treatment. Clinical efficacy, wound healing, indicators of wound oxygenation status, levels of inflammatory factors, and the occurrence of adverse symptoms were recorded in both groups. Logistic regression was used to identify independent factors influencing efficacy. **Results** The overall response rate, along with post-treatment TcPO<sub>2</sub> and tissue oxygen saturation(StO<sub>2</sub>), were significantly higher in the LLLT group than in the control group. Compared with the control group, the LLLT group exhibited significantly smaller ulcer areas at 7, 14, 21, and 28 days post-treatment, a significantly shorter ulcer healing time, and a significantly greater reduction in wound pH. Furthermore, post-treatment serum levels of tumor necrosis factor- $\alpha$ , interleukin-6, and C-reactive protein as well as the overall incidence of adverse events were all significantly lower in the test group. All these differences were statistically significant( $P < 0.05$ ). Logistic regression analysis identified pre-treatment wound TcPO<sub>2</sub> ( $OR = 1.301, P < 0.001$ ) and treatment modality( $OR = 0.141, P = 0.006$ ) as independent factors influencing patient prognosis.

\* 基金项目:甘肃省卫生健康行业科研项目(GSWSKY2023-49)。

作者简介:王擒虎(1974—),本科,副主任医师,主要从事内分泌临床研究工作。 <sup>△</sup> 通信作者, E-mail:86531311@qq.com。

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20251023.1853.002\(2025-10-24\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20251023.1853.002(2025-10-24))

**Conclusion** LLLT significantly accelerates wound healing, improves TcPO<sub>2</sub>, reduces systemic inflammation and demonstrates a favorable safety profile in diabetic patients.

**[Key words]** Low-level laser therapy; Diabetes; Wound healing; Transcutaneous oxygen tension; Inflammatory factors

糖尿病是一种以慢性高血糖为特征的代谢性疾病, 主要由于胰岛素分泌不足或胰岛素作用受损所致, 其中 2 型糖尿病占近 90%<sup>[1]</sup>。糖尿病创面是糖尿病患者常见的严重并发症之一, 尤其是以糖尿病足溃疡(DFU)最为典型<sup>[2-3]</sup>。糖尿病创面的形成与高血糖引起的微血管病变、神经病变, 以及免疫功能受损密切相关。高血糖导致的微循环障碍和神经病变会降低患者对足部压力的感知能力, 增加创面形成的风险, 同时, 延缓创面愈合过程。糖尿病创面不仅严重影响患者的生活质量, 还可能导致严重的感染、骨髓炎, 甚至截肢<sup>[4-7]</sup>。一项针对我国 DFU 和糖尿病患者的大型队列研究表明, 在 1 年的随访期内糖尿病患者的年溃疡发病率为 8.1%, DFU 患者的年新溃疡发生率为 31.6%, DFU 患者的截肢率为 5.1%, 糖尿病和 DFU 患者的年死亡率分别为 2.8%、14.4%<sup>[8]</sup>。

目前, 糖尿病创面的治疗方法主要包括清创、负压伤口治疗、抗生素治疗、生长因子应用, 以及生物工程皮肤移植等<sup>[7]</sup>。然而这些方法在临床应用中仍存在一定的局限性, 部分患者疗效不佳, 愈合时间长, 且易复发。近年来, 随着生物医学技术的发展, 物理因子治疗逐渐受到关注, 其中激光治疗因其独特的优势在创面愈合领域展现出广阔的应用前景<sup>[9]</sup>。激光是一种高能量、高方向性和高单色性的光辐射, 其在医学领域的应用已有多年历史<sup>[10-11]</sup>。低强度激光照射(LLLT)是一种非热效应激光治疗技术, 通过特定波长和能量密度的激光照射能调节细胞代谢、促进组织修复、减轻炎症反应并改善局部血液循环<sup>[12]</sup>。多项研究表明, LLLT 能明显加速创面愈合, 改善创面氧合状态, 并降低炎症因子水平<sup>[13-16]</sup>。然而关于 LLLT 在糖尿病创面愈合中的应用研究仍相对较少见。本研究探讨了 LLLT 对糖尿病患者创面愈合及经皮氧张力(TcPO<sub>2</sub>)的改善效果, 以评估其在加速创面愈合、改善创面氧合状态、降低炎症因子水平及安全性方面的优势, 不仅有助于丰富糖尿病创面治疗的临床手段, 还为 LLLT 在糖尿病创面治疗中的应用提供了科学依据, 具有重要的理论和实践意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

**1.1.1 研究对象** 选取 2023 年 1 月至 2024 年 10 月本院收治的糖尿病伴全身创面溃疡患者 120 例作为研究对象, 采用随机数字表法分为研究组和对照组, 每组 60 例。本研究获本院医学伦理委员会审批(审批号: 2025-02-20)。

**1.1.2 纳入标准** (1)符合《中国 2 型糖尿病防治指

南(2020 年版)(上)》<sup>[17]</sup>诊断标准, 确诊为糖尿病; (2)年龄 18~75 岁; (3)创面面积大于或等于 100 mm<sup>2</sup>, 且为慢性溃疡创面; (4)临床资料完整; (5)签署本研究知情同意书。

**1.1.3 排除标准** (1)合并严重心、肝、肾等重要脏器功能障碍; (2)具有激光治疗禁忌证, 如对激光治疗过敏、患有光敏性疾病等; (3)合并严重感染、坏死性筋膜炎或骨髓炎等; (4)创面感染严重需立即进行外科手术干预; (5)近期使用过可能影响创面愈合的药物; (6)精神状态异常无法配合治疗和观察者。

### 1.2 方法

**1.2.1 样本量计算** 通过文献检索, 基于周文进等<sup>[18]</sup>的研究临床试验中 2 组总有效率(对照组 72.41%, 研究组 93.10%)作为效应量依据, 使用 PASS 软件计算两独立样本率差异性。设定显著性水平  $\alpha = 0.05$ (双侧检验), 检验效能  $1 - \beta = 80\%$ , 通过率比较公式

$$(n = \frac{(Z_{\alpha/2} \sqrt{2P(1-P)} + Z_{\beta} \sqrt{p_1(1-p_1) + p_2(1-p_2)})^2}{(p_1 - p_2)^2})$$

计算所需样本量。最终计算得出 2 组共需 56 例样本。考虑可能的病例脱落或数据缺失, 在计算结果基础上增加 10% 的样本量冗余, 最终得出需 62 例样本。

### 1.2.2 治疗方法

**1.2.2.1 对照组** 给予基础治疗, 包括口服阿卡波糖片(拜耳公司, 国药准字 H20213032; 规格: 50 mg), 每次 50 mg, 每天 3 次; 口服盐酸二甲双胍片(华北制药公司, 国药准字 H32021625; 规格: 0.25 g), 每次 0.25 g, 每天 3 次。若服用药物治疗后血糖控制不佳可皮下注射德谷门冬双胰岛素注射液(诺和诺德公司, 国药准字 S20240031; 规格: 3 mL : 300 U), 每次 3 mL, 每天 1 次。同时, 对创面进行常规处理, 使用湿润烧伤膏(汕头市美宝制药有限公司, 国药准字 Z20000004)进行涂抹, 厚度约 2 mm, 用无菌纱布包扎, 每 2 天换药 1 次。

**1.2.2.2 研究组** 在对照组治疗基础上加用 LLLT 治疗, 使用 LHH-500IVB 型半导体激光治疗仪, 设置波长为 830 nm, 输出功率为 1 500 mW, 光斑直径为 3~5 cm。首先确定创面位置, 将激光治疗仪器探头垂直照射创面, 照射时与皮肤创面保持 1~2 cm, 照射时间为 15 min。如患者皮肤有多处溃疡可分区照射, 每周照射 1 次<sup>[4]</sup>。

**1.2.2.3 疗程** 2 组患者均接受为期 4 周的治疗。

**1.2.3 疗效判定标准** (1)痊愈: 创面愈合面积大于

或等于 95% 至完全愈合,无渗出、红肿等;(2)显效:创面愈合面积达 80% 以上,渗出明显减少,红肿基本消退;(3)有效:创面愈合面积达 50%~80%,渗出有所减少,红肿有所缓解;(4)无效:创面愈合面积不足 50%,渗出和红肿无明显改善。总有效率=(痊愈例数+显效例数+有效例数)/总例数 $\times$ 100%。

#### 1.2.4 观察指标

**1.2.4.1 创面愈合情况** 测量 2 组患者治疗前,治疗 3、7、14、21、28 d 溃疡面积,记录溃疡愈合时间,并检测治疗前后创面 pH 值。

**1.2.4.2 创面氧合状态指标** 采用 TcPO<sub>2</sub> 测量仪(TCM4)和组织氧饱和度(StO<sub>2</sub>)测量仪(Oxygen Saturation Monitor)检测 2 组患者创面 TcPO<sub>2</sub> 和 StO<sub>2</sub>。

**1.2.4.3 炎症因子水平** 使用全自动生化分析仪(OLYMPUSAU640)检测 2 组患者治疗前后肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )、白细胞介素-6(IL-6)、C 反应蛋白(CRP)等。

**1.2.4.4 不良症状发生情况** 记录 2 组患者治疗过程中出现皮肤灼烧感、创口感染、皮肤瘙痒等不良症状的例数。

**1.3 统计学处理** 应用 SPSS20.00 统计软件进行数据分析,进行正态性检验,符合正态分布的计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,计数资料以率或构成比表示,采用独立样本  $t$  检验、配对  $t$  检验、 $\chi^2$  检验、Bonferroni 检验等。以患者临床疗效为因变量并根据赋值表(计量数据依据最佳 cut-off 值分类)进行 logistics 回归模型分析影响患者疗效的独立因素。赋值情况见表 1。  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 2 组患者一般资料比较

项目	对照组( $n=60$ )	研究组( $n=60$ )	$t/\chi^2$	$P$
年龄( $\bar{x} \pm s$ , 岁)	57.93 $\pm$ 7.59	60.55 $\pm$ 9.06	1.715	0.089
性别[ $n(\%)$ ]			1.637	0.201
男	32(53.33)	25(41.67)		
女	28(46.67)	35(58.33)		
BMI( $\bar{x} \pm s$ , kg/m <sup>2</sup> )	23.95 $\pm$ 1.83	24.46 $\pm$ 2.22	1.370	0.173
糖尿病的病程( $\bar{x} \pm s$ , 年)	5.48 $\pm$ 2.32	5.45 $\pm$ 2.51	0.076	0.940
感染部位[ $n(\%)$ ]			1.396	0.706
上肢	15(25.00)	18(30.00)		
下肢	26(43.33)	22(37.67)		
头面部	5(8.33)	3(5.00)		
腹背部	14(23.33)	17(28.33)		
脉压( $\bar{x} \pm s$ , mmHg)				
收缩压	105.41 $\pm$ 7.95	105.07 $\pm$ 8.19	-0.230	0.819
舒张压	72.53 $\pm$ 3.93	71.61 $\pm$ 4.37	-1.208	0.230

身体质量指数(BMI)、糖尿病的病程、感染部位、血压(包括收缩压和舒张压)及伴高血压、糖尿病肾病、视网膜病变情况比较,差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。见表 2。

表 1 赋值情况

变量	变量赋值内容
因变量	
临床疗效	有效=1,无效=0
自变量	
年龄(岁)	$\geq 55.50=1, < 55.50=0$
性别	男=1,女=0
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	$\geq 23.89=1, < 23.89=0$
糖尿病的病程(年)	$\geq 3.50=1, < 3.50=0$
感染部位	四肢=1,躯干及头部=0
收缩压(mmHg)	$\geq 109.26=1, < 109.26=0$
舒张压(mmHg)	$\geq 69.74=1, < 69.74=0$
高血压	有=1,无=0
糖尿病肾病	有=1,无=0
视网膜病变	有=1,无=0
治疗前	
创面的面积(mm <sup>2</sup> )	$\geq 562.62=1, < 562.62=0$
pH	$\geq 5.97=1, < 5.97=0$
TcPO <sub>2</sub> (mmHg)	$\geq 63.36=1, < 63.36=0$
StO <sub>2</sub> (%)	$\geq 89.86=1, < 89.86=0$
TNF- $\alpha$ (pg/mL)	$\geq 144.35=1, < 144.35=0$
IL-6(pg/mL)	$\geq 223.59=1, < 223.59=0$
CRP(mg/L)	$\geq 162.39=1, < 162.39=0$
治疗方法	研究组=1,对照组=0

注:1 mmHg=0.133 kPa。

续表 2 2 组患者一般资料比较

项目	对照组(n=60)	研究组(n=60)	t/χ <sup>2</sup>	P
高血压[n(%)]			0.363	0.547
有	19(31.67)	16(26.67)		
无	41(68.33)	44(73.33)		
糖尿病肾病[n(%)]			0.045	0.831
有	14(23.33)	15(25.00)		
无	46(76.67)	45(75.00)		
视网膜病变[n(%)]			0.261	0.609
有	10(16.67)	8(13.33)		
无	50(83.33)	52(86.67)		

注:1 mmHg=0.133 kPa。

**2.2 2 组患者临床疗效比较** 研究组患者总有效率明显高于对照组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 3。

**2.3 2 组患者创面愈合情况比较** 2 组患者治疗前、治疗后 3 d 溃疡面积,以及治疗前创面 pH 值比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ );研究组患者治疗后 7、14、21、28 d 溃疡面积均明显低于对照组,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。研究组患者溃疡愈合时间明显

短于对照组,治疗后创面 pH 值明显低于对照组,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 4、5。

表 3 2 组患者临床疗效比较[n(%)]

组别	n	痊愈	显效	有效	无效	总有效
对照组	60	4(6.67)	27(45.00)	15(25.00)	14(23.33)	46(76.67)
研究组	60	11(18.33)	33(55.00)	12(20.00)	4(6.67)	56(93.33) <sup>a</sup>

注:与对照组比较,χ<sup>2</sup>=6.536,<sup>a</sup>P=0.011。

表 4 2 组患者治疗前及治疗后 3、7、14、21、28 d 创面愈合情况比较( $\bar{x} \pm s, \text{mm}^2$ )

时间	对照组(n=60)	研究组(n=60)	t	P
治疗前	511.27±65.70	529.03±58.50	1.564	0.121
治疗后				
3 d	519.36±43.80	516.91±63.24	-0.246	0.806
7 d	406.42±48.48 <sup>ab</sup>	337.70±43.60 <sup>ab</sup>	-8.164	<0.001
14 d	279.84±52.49 <sup>abc</sup>	159.60±36.12 <sup>abc</sup>	14.620	<0.001
21 d	212.61±72.89 <sup>abcd</sup>	105.46±42.40 <sup>abcd</sup>	9.843	<0.001
28 d	130.41±69.54 <sup>abcde</sup>	79.95±30.66 <sup>abcde</sup>	3.353	0.001

注:与治疗前比较,<sup>a</sup>P<0.05;与治疗前 3 d 比较,<sup>b</sup>P<0.05;与治疗前 7 d 比较,<sup>c</sup>P<0.05;与治疗前 14 d 比较,<sup>d</sup>P<0.05;与治疗前 21 d 比较,<sup>e</sup>P<0.05。

表 5 2 组患者溃疡愈合时间及治疗前后创面 pH 值比较( $\bar{x} \pm s$ )

组别	n	溃疡愈合时间(d)	创面 pH 值	
			治疗前	治疗后
对照组	60	27.87±4.47	7.09±1.51	6.81±1.10
研究组	60	20.30±3.38	7.15±1.48	6.17±0.92
t	—	-10.457	0.190	-3.439
P	—	<0.001	0.849	<0.001

注:—表示无此项。

**2.4 2 组患者创面氧合状态指标比较** 2 组患者治疗前创面 TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub> 比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ );研究组治疗后创面 TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub> 均明显高于对照组,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。见

表 6。

表 6 2 组患者治疗前后创面 TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub> 比较( $\bar{x} \pm s$ )

组别	n	TcPO <sub>2</sub> (mmHg)		StO <sub>2</sub> (%)	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	60	59.91±6.20	70.70±6.49	82.09±8.81	86.65±10.38
研究组	60	61.16±5.59	76.25±6.61	79.15±10.94	94.92±10.12
t	—	1.168	4.636	-1.625	4.417
P	—	0.245	<0.001	0.107	<0.001

注:—表示无此项。

**2.5 2 组患者炎症因子水平比较** 2 组患者治疗前 TNF-α、IL-6、CRP 水平比较,差异均无统计学意义( $P > 0.05$ );研究组治疗后 TNF-α、IL-6、CRP 水平均明显低于对照组,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 7。

表 7 2 组患者治疗前后 TNF- $\alpha$ 、IL-6、CRP 水平比较( $\bar{x} \pm s$ )

组别	n	TNF- $\alpha$ (pg/mL)		IL-6(pg/mL)		CRP(mg/L)	
		治疗前	治疗后	治疗前	治疗后	治疗前	治疗后
对照组	60	160.23 $\pm$ 17.68	84.26 $\pm$ 10.23	229.14 $\pm$ 31.35	153.70 $\pm$ 18.54	169.28 $\pm$ 18.78	74.83 $\pm$ 8.34
研究组	60	161.05 $\pm$ 19.18	56.84 $\pm$ 7.31	238.56 $\pm$ 29.54	103.58 $\pm$ 10.98	170.66 $\pm$ 103.19	44.52 $\pm$ 6.33
t	—	0.243	-16.895	1.693	-18.016	0.102	-22.437
P	—	0.808	<0.001	0.093	<0.001	0.919	<0.001

注：—表示无此项。

2.6 2 组患者不良症状发生情况比较 研究组患者不良症状发生率明显低于对照组,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。见表 8。

表 8 2 组患者不良症状发生情况比较[n(%)]

组别	n	皮肤灼烧感	创口感染	皮肤瘙痒	合计
对照组	60	0	8(13.33)	6(10.00)	14(23.33)
研究组	60	0	0	1(1.67)	1(1.67) <sup>a</sup>

注：与对照组比较,  $\chi^2 = 12.876$ , <sup>a</sup> $P < 0.001$ 。

2.7 预后不良 logistics 回归模型分析 治疗前创面 TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub>, 以及治疗方法对疗效具有明显影响[优势比(OR) = 1.263、1.086、0.235,  $P < 0.001$ 、0.012、0.016];其余变量则无影响( $P > 0.05$ )。见图 1。治疗前创面 TcPO<sub>2</sub>、治疗方法是影响患者预后的独立危险因素(OR = 1.301、0.141,  $P < 0.001$ 、0.006)。见图 2。

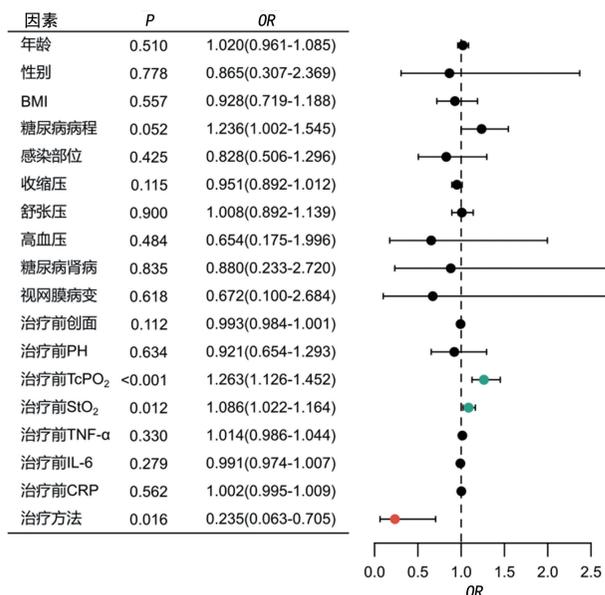


图 1 预后不良影响的单因素分析

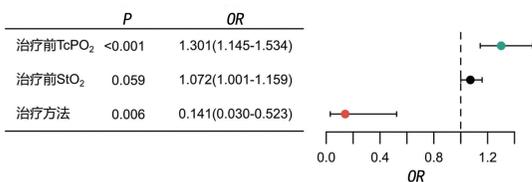


图 2 预后不良影响的多因素分析

### 3 讨 论

近年来,随着生物医学技术的快速发展,LLLTT 作为一种新兴的物理治疗手段在糖尿病创面愈合领域的研究逐渐受到关注<sup>[19]</sup>。与传统治疗方法比较,LLLTT 具有非侵入性、无创性、便携性、经济性、不良反应小等明显优势,尤其是在促进创面愈合、改善局部血液循环、减轻炎症反应方面表现出巨大的潜力<sup>[12]</sup>。SCHINDL 等<sup>[13]</sup>发现,LLLTT 在不同类型的难愈性溃疡中均表现出良好的疗效。然而尽管 LLLTT 在创面愈合领域展现出广阔的应用前景,关于其在糖尿病创面愈合中的具体机制和最佳治疗参数仍需进一步研究。本研究通过系统评估 LLLTT 对糖尿病患者创面愈合及 TcPO<sub>2</sub> 的改善效果,旨在为 LLLTT 在糖尿病创面治疗中的应用提供科学依据,并丰富糖尿病创面治疗的临床手段。

本研究通过随机对照试验系统评估了 LLLTT 对糖尿病患者创面愈合及 TcPO<sub>2</sub> 的改善效果,结果显示,研究组患者总有效率(93.33%)明显高于对照组(76.67%),且在创面愈合时间、溃疡面积缩小、创面 pH 值改善,以及创面氧合状态提升方面均表现出明显优势,表明 LLLTT 作为一种新兴的物理治疗手段能有效加速糖尿病伴全身创面溃疡患者创面愈合,并改善局部氧合状态,具有重要的临床应用价值。

LLLTT 能明显促进糖尿病创面的愈合,其核心机制在于调节细胞代谢和促进细胞增殖。有研究表明,LLLTT 可通过光生物调节作用,激活创面组织中的成纤维细胞和内皮细胞,促进其增殖和迁移,加速胶原蛋白的合成与沉积,从而加速创面的重塑和修复<sup>[20]</sup>。HOURELD 等<sup>[14]</sup>发现,LLLTT 能明显刺激糖尿病创面中成纤维细胞的活性,促进其向创面迁移并合成胶原蛋白。此外,LLLTT 还可通过增强线粒体功能,改善细胞的能量代谢,进一步促进细胞的正常生理功能。糖尿病创面愈合的延迟与局部微循环障碍密切相关<sup>[21]</sup>。

良好的氧合状态是创面愈合的重要前提,尤其是在糖尿病创面中微循环障碍是导致愈合延迟的关键因素之一。本研究结果显示,研究组患者治疗后创面 TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub> 均明显高于对照组,表明 LLLTT 能有效

改善局部血液循环。LLLT 通过扩张血管、增加血流量,明显改善创面局部的氧合状态。通过改善局部氧合,LLLT 为创面愈合提供了更理想的微环境<sup>[22-23]</sup>。

本研究还发现,LLLT 能明显降低糖尿病患者创面溃疡的炎症反应,研究组患者在治疗过程中不良反应发生率明显低于对照组,分别为 1.67%、23.33%。炎症反应是糖尿病创面愈合的主要障碍之一,创面延迟愈合过程常伴随着嗜中性粒细胞的趋化性和吞噬活性的降低及炎症的增加<sup>[24]</sup>。LLLT 可以通过调节免疫细胞的功能,减少炎症细胞的浸润,从而减轻创面的炎症反应<sup>[21]</sup>。有研究表明,LLLT 能明显增加后肢卸载模型小鼠的胶原沉积,以及 Ki67、CD31 水平,表现出促进细胞增殖和血管生成的作用<sup>[23]</sup>。与本研究结果相似。此外 LLLT 作为一种非侵入性、无创性的物理治疗手段,具有便携性、经济性、不良反应小等优势。与传统清创、负压治疗比较,LLLT 无需频繁更换敷料或进行手术干预,减少了患者的痛苦和治疗成本。同时,LLLT 的便携性使其能在基层医疗机构,甚至家庭环境中使用,为糖尿病创面的长期管理提供了新的选择。

本研究进一步通过多元 logistics 回归模型分析了影响糖尿病伴全身创面溃疡患者治疗预后的影响因素,单因素和多因素分析结果显示,治疗前创面 TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub>,以及治疗方法对患者疗效具有明显影响,其中创面 TcPO<sub>2</sub>、治疗方法是影响患者预后的独立危险因素。究其原因是糖尿病创面愈合的延迟与局部微循环障碍密切相关,而良好的氧合状态是创面愈合的重要前提。TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub> 是反映局部氧合状态的重要指标,较高的 TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub> 表明创面局部的氧气供应充足,能为细胞的代谢和修复提供更好的条件<sup>[24-25]</sup>。TcPO<sub>2</sub>、StO<sub>2</sub> 高低直接反映创面局部的氧合状态,进而影响细胞的代谢和功能。有研究表明,低氧环境会抑制成纤维细胞的增殖和胶原蛋白的合成,而高氧环境则能促进这些过程<sup>[25]</sup>。而 LLLT 通过多种机制促进了糖尿病创面的愈合。LLLT 能激活创面组织中的成纤维细胞和内皮细胞,促进其增殖和迁移,加速胶原蛋白的合成与沉积,从而加速创面的重塑和修复。LLLT 还可通过调节免疫细胞的功能,减少炎症细胞的浸润,降低炎症因子水平,从而减轻创面的炎症反应<sup>[21]</sup>。此外 LLLT 还可通过扩张血管、增加血流量明显改善创面局部的氧合状态,为细胞的代谢和修复功能提供更理想的微环境<sup>[22]</sup>。这些综合作用使 LLLT 成为一种安全、有效的治疗手段,能明显改善糖尿病创面患者预后。

本研究系统探讨了 LLLT 在糖尿病创面愈合及改善 TcPO<sub>2</sub> 方面的应用效果,通过随机对照试验不

仅验证了 LLLT 在加速创面愈合、缩短愈合时间、降低创面 pH 值,以及改善创面氧合状态方面的明显优势,还进一步揭示了其在降低炎症因子水平和不良反应发生率方面的潜在益处。尽管本研究取得了积极的成果,但仍存在一些不足之处:(1)样本量相对有限,且仅限于单一中心,可能影响结果的普遍性和外推性。今后应扩大样本量并开展多中心试验,以进一步验证 LLLT 在不同人群中的疗效和安全性。(2)虽然探讨了 LLLT 的部分作用机制,但对其在糖尿病创面愈合中的具体分子机制和最佳治疗参数仍缺乏深入研究。今后可通过动物模型和细胞实验进一步探索 LLLT 对细胞信号通路、免疫细胞功能、微血管生成的影响,以优化治疗方案。(3)未对患者长期随访数据进行分析。今后应关注 LLLT 治疗后创面的复发率和长期愈合质量,以全面评估其临床应用价值。

综上所述,LLLT 能明显加速创面愈合,改善局部氧合状态,降低炎症因子水平及不良反应发生率。本研究确定了治疗前创面 TcPO<sub>2</sub>、治疗方法是影响患者预后的独立影响因素,进一步完善了 LLLT 在糖尿病创面治疗中的应用价值和理论基础,为其作为一种安全、有效的新型治疗手段提供了有力支持。

## 参考文献

- [1] AHMAD E, LIM S, LAMPTEY R, et al. Type 2 diabetes [J]. *Lancet*, 2022, 400(10365): 1803-1820.
- [2] 叶梓, 王小兰, 雷颜宾, 等. 糖尿病创面治疗的研究新进展 [J]. *西南医科大学学报*, 2023, 46(4): 363-368.
- [3] 张海博, 王嘉森, 张国辉. 糖尿病足溃疡创面形成机制及外科治疗进展 [J]. *中国医疗美容*, 2024, 14(2): 135-141.
- [4] 李玲玲, 王霞, 高文秀. 激光照射治疗糖尿病慢性皮肤溃疡的临床安全性分析 [J]. *糖尿病新世界*, 2022, 25(17): 56-59.
- [5] PHANG S J, ARUMUGAM B, KUPPUSAMY U R, et al. A review of diabetic wound models-novel insights into diabetic foot ulcer [J]. *J Tissue Eng Regen Med*, 2021, 15(12): 1051-1068.
- [6] 周伟, 郑红波, 刘强, 等. 糖尿病足溃疡创面难愈合的原因及治疗进展 [J]. *中国医学创新*, 2025, 22(1): 158-163.
- [7] 夏如意, 唐棣, 吴娟娟, 等. 糖尿病患者创面难愈合的机制及治疗新进展 [J]. *中国美容整形外科杂志*, 2024, 35(3): 161-164.
- [8] YANG L, RONG G C, WU Q N. Diabetic foot ulcer: challenges and future [J]. *World J Diabetes*, 2022, 13(12): 1014-1034.
- [9] BESSER M, SCHAELEL L, PLATTFAUT I, et al. Pulsed low-intensity laser treatment stimulates wound healing without enhancing biofilm development in vitro [J]. *J Photochem Photobiol B*, 2022, 233(1): 112504.
- [10] KHALEEL AHMED M, JAFER M, NAYEEM M, et al.

Low-level laser therapy and topical medications for treating aphthous ulcers: a systematic review[J]. *J Multidiscip Healthc*, 2020, 13(10):1595-1605.

- [11] SHIVAKOTI I, KIBRIA G, CEP R, et al. Laser surface texturing for biomedical applications: a review [J]. *COATINGS*, 2021, 11(2):124-127.
- [12] HAMBLIN M R. Mechanisms and applications of the anti-inflammatory effects of photobiomodulation[J]. *AIMS Biophys*, 2017, 4(3):337-361.
- [13] SCHINDL M, KERSCHAN K, SCHINDL A, et al. Induction of complete wound healing in recalcitrant ulcers by low-intensity laser irradiation depends on ulcer cause and size[J]. *Photodermatol Photoimmunol Photomed*, 1999, 15(1):18-21.
- [14] HOURELD N, ABRAHAMSE H. Low-intensity laser irradiation stimulates wound healing in diabetic wounded fibroblast cells(WS1)[J]. *Diabetes Technol Ther*, 2010, 12(12):971-978.
- [15] 远航, 郭震. 低强度激光治疗对游泳大鼠氧化应激和功能恢复的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2020, 39(6):2813-2819.
- [16] 申海花. 低强度激光治疗固定正畸牙龈炎的临床效果观察[J]. *首都食品与医药*, 2019, 26(7):336-339.
- [17] 中华医学会糖尿病学分会. 中国 2 型糖尿病防治指南(2020 年版)(上)[J]. *中国实用内科杂志*, 2021, 41(8):668-695.
- [18] 周文进, 杨成, 陈思雨. 湿润烧伤膏联合川芎嗪治疗糖尿病足的临床疗效[J]. *临床合理用药杂志*, 2023, 16(12):95-97.
- [19] 王红玉, 郝艳艳, 曾满琴, 等. 超声清创结合光子治疗在慢性创面治疗中的应用[J]. *现代医药卫生*, 2024, 40(10):1683-1686.
- [20] DOMPE C, MONCRIEFF L, MATYS J, et al. Photobiomodulation-underlying mechanism and clinical applications[J]. *J Clin Med*, 2020, 9(6):1724.
- [21] WADEE A N, AREF M H F, NASSAR A A, et al. The influence of low-intensity laser irradiation versus hyperbaric Oxygen therapy on transcutaneous Oxygen tension in chronic diabetic foot ulcers: a controlled randomized trial[J]. *J Diabetes Metab Disord*, 2021, 20(2):1489-1497.
- [22] YE R A, HE Y, NI W, et al. LLLT accelerates experimental wound healing under microgravity conditions via PI3K/AKT-CCR2 signal axis[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12(1):1387474.
- [23] 朱永赞, 张培华. 趋化因子在糖尿病创面愈合过程中的研究进展[J]. *中国美容整形外科杂志*, 2024, 35(4):254-255.
- [24] WOO Y, SUH Y J, LEE H, et al. TcPO<sub>2</sub> value can predict wound healing time in clinical practice of CLTI patients[J]. *Ann Vasc Surg*, 2023, 91(2):249-256.
- [25] KESAVAN R, SASIKUMAR C S. Multimodal imaging device to comprehensively assess infection, oxygenation, and wound analytics-a pilot study[J]. *Wound Repair Regen*, 2024, 32(4):429-436.

(收稿日期:2025-03-12 修回日期:2025-09-30)

(上接第 316 页)

- [35] ARROYAVE-OSPINA J C, WU Z M, GENG Y N, et al. Role of oxidative stress in the pathogenesis of Non-Alcoholic fatty liver disease: implications for prevention and therapy[J]. *ANTIOXIDANTS*, 2021, 10(2):174.
- [36] FERRO D, BARATTA F, PASTORI D, et al. New insights into the pathogenesis of Non-Alcoholic fatty liver disease: Gut-Derived lipopolysaccharides and oxidative stress[J]. *Nutrients*, 2020, 12(9):2762.
- [37] RADOSAVLJEVIC T, BRANKOVIC M, SAMARDZIC J, et al. Altered mitochondrial function in MASLD: key features and promising therapeutic approaches[J]. *Antioxidants*, 2024, 13(8):906.
- [38] MUSAZADEH V, DEHGHAN P, SALEH-GHADIMI S, et al. Omega 3-rich *Camelina sativa* oil in the context of a weight loss program improves glucose homeostasis, inflammation and oxidative stress in patients with NAFLD: a randomised placebo-controlled clinical trial [J]. *Int J Clin Pract*, 2021, 75(11):e14744.
- [39] ZHAO W J, BIAN Y P, WANG Q H, et al. Blueberry-derived exosomes-like nanoparticles ameliorate nonalcoholic fatty liver disease by attenuating mitochondrial oxidative stress[J]. *Acta Pharmacol Sin*, 2022, 43(3):645-658.
- [40] WANG Y, LIU B B, WU P X, et al. Dietary Selenium alleviated mouse liver oxidative stress and NAFLD induced by obesity by regulating the KEAP1/NRF2 pathway[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(2):349.
- [41] KIM M B, LEE J, LEE J Y. Targeting mitochondrial dysfunction for the prevention and treatment of metabolic disease by bioactive food components[J]. *J Lipid Atheroscler*, 2024, 13(3):306-327.

(收稿日期:2025-03-09 修回日期:2025-09-20)