

• 临床研究 •

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2025.05.007

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250326.0955.002\(2025-03-26\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250326.0955.002(2025-03-26))基于红外热成像的皮肤温度监测对糖尿病足患者
下肢动脉病变的诊断价值研究*

王利娇,何小兰

(温州医科大学附属第一医院创面修复中心,浙江温州 325035)

[摘要] **目的** 探讨基于红外热成像的皮肤温度监测对糖尿病足患者下肢动脉病变(LEAD)的诊断价值。**方法** 选取 2023 年 3 月至 2024 年 12 月该院收治的 160 例糖尿病足患者为研究对象,根据彩色多普勒超声诊断结果分为 LEAD 组($n=120$)和未病变组($n=40$)。Spearman 分析红外热成像的糖尿病足溃疡(DFU)创面相对温差与下肢动脉血管内径及血流量之间的相关性,逐步 logistic 回归分析 LEAD 的影响因素并按照是否感染进行亚组分析,受试者工作特征(ROC)曲线分析用于评估 DFU 创面相对温差对 LEAD 及下肢动脉硬化斑块、管腔狭窄和管腔闭塞的诊断效能。**结果** 两组不同 DFU 创面温度、健康侧同部位皮肤温度、DFU 创面相对温差、踝肱指数(ABI)、C 反应蛋白(CRP)、尿酸和股动脉、腘动脉、足背动脉血流峰值流速(PSV)、搏动指数(PI)水平及下肢动脉硬化斑块、下肢动脉管腔狭窄比例比较,差异有统计学意义($P<0.05$)。Spearman 分析结果显示,DFU 创面相对温差与股动脉、腘动脉和足背动脉的 PSV 呈负相关,与 PI 呈正相关($P<0.05$)。单因素 logistic 回归分析显示,DFU 创面相对温差、ABI、尿酸,以及股动脉、腘动脉和足背动脉的 PSV 及 PI 是 LEAD 的影响因素($P<0.05$)。多因素 logistic 回归分析结果显示,DFU 创面相对温差、尿酸是糖尿病足 LEAD 的影响因素($P<0.05$)。亚组分析结果表明,DFU 创面相对温差是糖尿病足 LEAD 的影响因素($P<0.05$),糖尿病足感染对于 DFU 创面相对温差与糖尿病足 LEAD 的关系无影响($P>0.05$)。DFU 创面相对温差在预测 LEAD 时的曲线下面积(AUC)为 0.923, cut-off 值为 5.4 °C;预测下肢动脉硬化斑块、管腔狭窄及管腔闭塞时的 AUC 分别为 0.720、0.657 和 0.554, cut-off 值分别为 5.6、6.3、4.6 °C。**结论** 红外热成像的 DFU 创面相对温差可有效诊断 LEAD。

[关键词] 红外热成像;糖尿病足;下肢动脉病变;创面相对温差;诊断价值

[中图法分类号] R587.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2025)05-1085-07

Diagnostic value of infrared thermography-based skin temperature monitoring
for lower extremity arterial disease in patients with diabetic foot*

WANG Lijiao, HE Xiaolan

(Wound Repair Center, the First Affiliated Hospital of Wenzhou Medical
University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the diagnostic value of infrared thermography-based skin temperature monitoring for lower extremity arterial disease (LEAD) in patients with diabetic foot. **Methods** A total of 160 patients with diabetic foot admitted to the hospital from March 2023 to December 2024 were selected as the research subjects and divided into the LEAD group ($n=120$) and the non-lesion group ($n=40$) based on the diagnostic results of color Doppler ultrasound. Spearman analysis was used to evaluate the correlation between the relative temperature of diabetic foot ulcer (DFU) wounds measured by infrared thermography and the diameter and blood flow of lower limb arteries. Stepwise logistic regression analysis was performed to identify the influencing factors of LEAD and subgroup analysis was conducted based on the presence or absence of infection. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis was used to assess the diagnostic efficacy of DFU wound relative temperature for LEAD and lower limb arterial atherosclerotic plaques, lumen stenosis, and lumen occlusion. **Results** There were statistically significant differences between the two groups in DFU wound temperature, skin temperature at the same site on the healthy side, DFU wound relative temperature, ankle brachial index (ABI), C-reactive protein (CRP), uric acid, and the peak velocity (PSV) and pulsatility

* 基金项目:浙江省温州市科技计划项目(Y20220630)。

index (PI) levels of the femoral artery, popliteal artery, and dorsalis pedis artery, as well as the proportions of lower limb arterial atherosclerotic plaques and lumen stenosis ($P < 0.05$). Spearman analysis showed that the relative temperature of DFU wounds was negatively correlated with PSV of the femoral artery, popliteal artery, and dorsalis pedis artery, and positively correlated with PI ($P < 0.05$). Univariate logistic regression analysis indicated that ABI, DFU wound relative temperature, uric acid, and the PSV and PI of the femoral artery, popliteal artery, and dorsalis pedis artery were influencing factors for LEAD ($P < 0.05$). Multivariate logistic regression analysis revealed that DFU wound relative temperature and uric acid were influencing factors for LEAD in diabetic foot ($P < 0.05$). Subgroup analysis showed that DFU wound relative temperature was an influencing factor for LEAD in diabetic foot ($P < 0.05$), and there was no interaction between diabetic foot infection and the relationship between DFU wound relative temperature and LEAD in diabetic foot ($P > 0.05$). The area under the curve (AUC) for predicting LEAD using DFU wound relative temperature was 0.923, with the cut-off temperature being 5.4 °C. The AUCs for predicting lower limb arterial atherosclerotic plaques, lumen stenosis, and lumen occlusion were 0.720, 0.657, and 0.554, respectively, with the cut-off temperatures being 5.6, 6.3, and 4.6 °C, respectively. **Conclusion** DFU wound surface relative temperature of infrared thermography can effectively diagnose LEAD in diabetic foot.

[Key words] infrared thermography; diabetic foot; lower extremity arterial disease; wound surface relative temperature; diagnostic value

糖尿病是全球最常见的慢性代谢性疾病之一,近年来发病率持续攀升^[1-2]。糖尿病足是糖尿病严重的并发症之一,通常由下肢远端神经病变和血管病变引起^[3-4],其中下肢动脉病变(lower extremity arterial disease, LEAD)是导致糖尿病足患者足部缺血、溃疡(diabetic foot ulcer, DFU)甚至截肢的重要因素^[5-8]。研究表明,合并 LEAD 的 DFU 患者截肢风险更高,50% 患者生存期不足 5 年^[9]。因此早期识别 LEAD 对改善预后至关重要。目前 LEAD 临床诊断依赖多普勒超声、CT 血管造影等影像学检查^[10-11],但这些方法存在一定局限性,如高成本、操作复杂、侵入性。踝肱指数(ankle brachial index, ABI)测量虽无创、经济,但在糖尿病患者中易受动脉钙化干扰而导致假性正常值,降低了其诊断灵敏度和准确度,增加漏诊风险^[12]。

红外热成像技术作为一种新兴影像诊断技术,具有无创、非侵入、实时和高灵敏度的特点^[13],通过捕捉人体表面红外热辐射反映皮肤温度变化,从而间接评估局部血流状况,在糖尿病足的监测中展现出巨大潜力^[14-15]。研究表明,红外热成像可有效监测糖尿病患者足部温度变化,并发现潜在血管病变^[16],该技术已被应用于 DFU 的早期诊断^[17],这为糖尿病足 LEAD 筛查提供了可能性,尤其是在传统方法未能有效发现早期血流障碍时。然而,目前缺少该技术在糖尿病足 LEAD 诊断中的相关研究。因此,本研究旨在探讨红外热成像在糖尿病足 LEAD 诊断中的应用价值,为临床使用提供科学依据,并为优化糖尿病足 LEAD 的诊断策略提供新方向,现报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2023 年 3 月至 2024 年 12 月本院收治的

160 例糖尿病足患者为研究对象。纳入标准:(1)经检查确诊为糖尿病足^[18];(2)年龄 ≥ 18 岁;(3)经相关影像学检查明确诊断为 LEAD;(4)具有完整红外热成像检测记录。排除标准:(1)存在其他明显影响皮肤温度的疾病(如严重感染、急性炎症、皮肤病、肢体烧伤等);(2)合并严重的其他下肢血管疾病(如动脉瘤、静脉曲张等);(3)近期接受过下肢手术或创伤;(4)数据记录不完整。根据彩色多普勒超声诊断结果分为 LEAD 组($n=120$)和未病变组($n=40$)。本研究经本院医学伦理委员会批准[审批号:临床研究伦审(YS2022)第(258)号],患者均知情同意。

1.2 方法

1.2.1 资料收集

收集基本人口学信息及临床病史,包括性别、年龄、BMI、吸烟史、饮酒史、糖尿病病史、合并症(包括高血压、冠心病、脑血管疾病、糖尿病肾病、糖尿病周围神经病变)、静息痛、Wagner 分级、国际糖尿病足工作组(international working group on the diabetic foot, IWGDF)/感染病学会(infectious diseases society of America, IDSA)分级、DFU 部位、DFU 病程、DFU 面积、DFU 创面温度、DFU 创面相对温差、ABI,以及空腹血糖(fasting blood-glucose, FBG)、糖化血红蛋白(glycated hemoglobin, HbA1c)、血红蛋白(hemoglobin, Hb)、中性粒细胞百分比、WBC、总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、高密度脂蛋白-胆固醇(high density lipoprotein-cholesterol, HDL-C)、低密度脂蛋白-胆固醇(low density lipoprotein-cholesterol, LDL-C)、血清白蛋白(albumin, ALB)、红细胞沉降率(erythrocyte sedimentation rate, ESR)、C 反应蛋白(C reactive protein, CRP)、尿酸和血肌酐水平等实验室检查指标。

1.2.2 红外热成像图像采集

采用美国 Teledyne FLIR 公司生产的 FILR ONE Pro 手机外接探头红外热成像仪,由经过严格培训的专职人员采集受检者的红外皮温。环境温度控制在 25℃,隔绝室内外通风,无阳光直射。患者检查前 15 min 静卧休息,暴露检查部位以充分散热。测量患者入院时的 DFU 创面温度及健康侧同部位皮肤温度,每次检测至少重复 3 次,每次间隔 1 min,取平均值并记录温差。为减少拍摄过程中干扰因素对热成像结果的影响,本研究采用相对温差 ΔT 来描述 DFU 创面温度的变化情况, $\Delta T=|$ 健康侧同部位皮肤温度 $-$ DFU 创面温度 $|$ 。

1.2.3 结局指标

采用彩色多普勒超声扫描患者股动脉直至足背动脉,观察下肢动脉管腔内彩色血流是否处于充盈状态,同时观察血管壁和管腔,并记录双下肢血流频谱形态及股动脉、腘动脉和足背动脉的血流峰值流速(peak systolic velocity,PSV)和搏动指数(pulsatility index,PI)。记录患者 LEAD 症状,包括下肢动脉硬化斑块、管腔狭窄和管腔闭塞^[19]。判定标准:血流量正常,管腔未见狭窄斑块,管壁厚度 <1 mm 判定为正常;血流速度 <150 cm/s,判定为管腔狭窄;颈动脉内膜中层厚度 >1.5 ,存在强回声,判定为斑块硬化;血

流信号不充盈,血液流动完全停止,判定为管腔闭塞^[20]。

1.2.4 糖尿病足感染的亚组分析

为控制感染对皮肤温度的混杂效应,根据依据 IWGDF 和 IDSA 2023 年更新的指南标准^[21]将患者分为感染组与非感染组,采用多因素 logistic 回归分析 DFU 创面相对温差对 LEAD 的影响。

1.3 统计学处理

采用 SPSS27.0 和 R4.4.1 软件进行数据分析,计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,比较采用 t 检验;计数资料以例数或百分比表示,比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法;Spearman 分析相关性,逐步 logistic 回归分析危险因素并通过交互作用检验评估效应修饰作用,受试者工作特征(receiver operating characteristic,ROC)曲线和曲线下面积(area under curve,AUC)分析诊断效能,以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 两组一般资料比较

两组不同 DFU 创面温度、健康侧同部位皮肤温度、DFU 创面相对温差、ABI、CRP、尿酸和股动脉、腘动脉、足背动脉 PSV、PI 水平及下肢动脉硬化斑块、下肢动脉管腔狭窄比例比较,差异有统计学意义($P<0.05$),见表 1。

表 1 两组一般资料比较

项目	LEAD 组($n=120$)	未病变组($n=40$)	t/χ^2	P
性别[$n(\%)$]			1.475	0.225
男	69(57.50)	28(70.00)		
女	51(42.50)	12(30.00)		
年龄($\bar{x}\pm s$,岁)	68.98 $\pm$ 9.32	71.42 $\pm$ 9.28	1.440	0.155
BMI($\bar{x}\pm s$,kg/m ²)	24.69 $\pm$ 2.25	25.07 $\pm$ 2.15	0.963	0.339
吸烟史[$n(\%)$]	51(42.50)	13(32.50)	0.868	0.351
饮酒史[$n(\%)$]	76(63.33)	27(67.50)	0.820	0.775
糖尿病病史($\bar{x}\pm s$,年)	15.50 $\pm$ 7.22	15.53 $\pm$ 7.03	0.019	0.985
合并症[$n(\%)$]				
高血压	79(65.83)	24(60.00)	0.227	0.634
冠心病	33(27.50)	9(22.50)	0.172	0.678
脑血管疾病	20(16.67)	8(20.00)	0.058	0.810
糖尿病肾病	18(15.00)	3(7.50)	0.895	0.344
糖尿病周围神经病变	92(76.67)	29(72.50)	0.102	0.750
静息痛[$n(\%)$]	17(14.17)	2(5.00)	1.613	0.161
Wagner 分级[$n(\%)$]				0.531
1 级	20(16.67)	5(12.50)		
2 级	79(65.83)	31(77.50)		
3 级	16(13.33)	4(10.00)		
4 级	5(4.17)	0		
IWGDF/IDSA 分级[$n(\%)$]				0.365
1 级	20(16.67)	5(12.50)		
2 级	68(56.67)	29(72.50)		

续表 1 两组一般资料比较

项目	LEAD 组(<i>n</i> =120)	未病变组(<i>n</i> =40)	<i>t</i> / χ^2	<i>P</i>
3 级	30(25.00)	6(15.00)		
4 级	2(1.67)	0		
DFU 病程($\bar{x}\pm s$,d)	47.84±28.40	48.90±23.57	0.233	0.816
DFU 部位[<i>n</i> (%)]			6.197	0.473
足趾	71(59.17)	30(75.00)		
足底	29(24.17)	13(32.50)		
足背	55(45.83)	12(30.00)		
足跟	11(9.17)	2(5.00)		
DFU 患侧[<i>n</i> (%)]			0.001	0.999
左	50(41.67)	16(40.00)		
右	70(58.33)	24(60.00)		
DFU 面积($\bar{x}\pm s$,cm ²)	20.69±7.28	20.63±7.43	−0.047	0.963
DFU 创面温度($\bar{x}\pm s$,℃)	23.83±1.48	33.42±0.50	61.292	<0.001
健康侧同部位皮肤温度($\bar{x}\pm s$,℃)	30.84±1.71	28.98±0.81	−9.185	<0.001
DFU 创面相对温差($\bar{x}\pm s$,℃)	7.00±1.60	4.44±0.82	−13.146	<0.001
ABI($\bar{x}\pm s$)	0.89±0.13	0.94±0.12	2.403	0.019
FBG($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	8.35±2.53	7.92±2.16	−1.048	0.298
HbA1c($\bar{x}\pm s$,%)	9.84±1.97	10.15±1.44	1.068	0.289
Hb($\bar{x}\pm s$,g/L)	112.44±9.05	113.15±9.73	0.405	0.686
中性粒细胞百分比($\bar{x}\pm s$,%)	70.09±9.23	69.74±8.60	−0.220	0.826
WBC($\bar{x}\pm s$,×10 ⁹ /L)	11.08±2.77	10.79±2.19	−0.666	0.507
TC($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	4.52±0.75	4.45±0.64	−0.558	0.578
TG($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	1.53±0.62	1.53±0.55	0.053	0.958
HDL-C($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	1.56±0.44	1.68±0.43	1.600	0.114
LDL-C($\bar{x}\pm s$,mmol/L)	2.21±0.80	2.05±0.54	−1.482	0.141
ALB($\bar{x}\pm s$,g/L)	38.22±3.82	38.26±3.77	0.065	0.948
ESR($\bar{x}\pm s$,mm/h)	35.98±7.05	34.55±7.45	−1.068	0.290
CRP($\bar{x}\pm s$,mg/L)	14.16±3.97	12.82±2.94	−2.273	0.025
尿酸($\bar{x}\pm s$,μmol/L)	305.65±43.94	289.38±36.91	−2.298	0.024
血肌酐($\bar{x}\pm s$,μmol/L)	83.78±12.23	81.67±14.05	−0.848	0.400
股动脉 PSV($\bar{x}\pm s$)	74.76±33.65	135.72±14.81	15.784	<0.001
腘动脉 PSV($\bar{x}\pm s$)	42.87±19.22	80.40±12.35	14.295	<0.001
足背动脉 PSV($\bar{x}\pm s$)	19.46±8.87	43.03±5.44	19.955	<0.001
股动脉 PI($\bar{x}\pm s$)	6.88±1.29	4.71±0.86	−12.006	<0.001
腘动脉 PI($\bar{x}\pm s$)	8.13±1.64	5.51±1.04	−11.729	<0.001
足背动脉 PI($\bar{x}\pm s$)	10.51±2.21	7.64±1.12	−10.710	<0.001
下肢动脉硬化斑块[<i>n</i> (%)]	93(77.50)	0	70.880	<0.001
下肢动脉管腔狭窄[<i>n</i> (%)]	59(49.17)	0	29.079	<0.001
下肢动脉管腔闭塞[<i>n</i> (%)]	10(8.33)	0	2.276	0.067

2.2 DFU 创面相对温差与下肢动脉 PSV 及 PI 的相关性分析

Spearman 分析结果显示,DFU 创面相对温差与股动脉、腘动脉和足背动脉的 PSV 呈负相关,与 PI 呈

正相关(*P*<0.05),见表 2。

2.3 糖尿病足 LEAD 的单因素 logistic 回归分析

单因素 logistic 回归分析结果显示,DFU 创面相对温差、ABI、尿酸,以及股动脉、腘动脉和足背动脉的

PSV 及 PI 是 LEAD 的影响因素($P<0.05$),见表 3。

表 2 DFU 创面相对温差与下肢动脉 PSV、PI 的 相关性分析		
项目	<i>r</i>	<i>P</i>
股动脉 PSV	−0.453	<0.001
腘动脉 PSV	−0.403	<0.001
足背动脉 PSV	−0.411	<0.001
股动脉 PI	0.424	<0.001
腘动脉 PI	0.317	<0.001
足背动脉 PI	0.327	<0.001

表 3 糖尿病足 LEAD 的单因素 logistic 回归分析				
项目	回归 系数	标准 误差	<i>OR</i> (95% <i>CI</i>)	<i>P</i>
性别	−0.545	0.391	0.580(0.269~1.249)	0.164
年龄	−0.029	0.020	0.971(0.934~1.011)	0.154
BMI	−0.080	0.085	0.923(0.782~1.090)	0.346
吸烟史	0.429	0.385	1.535(0.722~3.263)	0.265
饮酒史	0.184	0.387	1.202(0.563~2.568)	0.634
糖尿病病史	0.001	0.026	1.000(0.951~1.051)	0.985
合并症				
高血压	0.250	0.376	1.285(0.615~2.683)	0.505
冠心病	0.267	0.430	1.307(0.562~3.037)	0.534
脑血管疾病	−0.223	0.465	0.800(0.322~1.990)	0.631
糖尿病肾病	0.778	0.652	2.176(−0.606~7.819)	0.233
糖尿病周围神经病变	0.220	0.415	1.246(0.553~2.809)	0.595
静息痛	1.143	0.771	3.136(0.692~14.219)	0.138
Wagner 分级	−0.451	0.543	1.209(0.679~2.152)	0.406
IWGDF/IDSA 分级	0.219	0.284	1.245(0.713~2.174)	0.441
DFU 病程	−0.001	0.007	0.999(0.986~1.012)	0.831
DFU 部位	0.105	1.185	0.974(0.933~1.016)	0.929
DFU 患侧	−0.069	0.372	0.933(0.450~1.935)	0.853
DFU 面积	0.001	0.025	1.001(0.953~1.052)	0.962
DFU 创面相对温差	1.696	0.308	5.451(2.983~9.963)	<0.001
ABI	−3.112	1.388	0.045(0.003~0.677)	0.025
FBG	0.073	0.076	1.076(0.928~1.249)	0.333
HbA1c	−0.091	0.099	0.913(0.752~1.109)	0.360
Hb	−0.008	0.020	0.992(0.954~1.031)	0.673
中性粒细胞百分比	0.004	0.020	1.004(0.965~1.045)	0.831
WBC	0.042	0.070	1.043(0.908~1.197)	0.552
TC	0.134	0.258	1.143(0.689~1.896)	0.604
TG	−0.015	0.305	0.985(0.542~1.790)	0.960
HDL-C	−0.664	0.422	0.515(0.225~1.177)	0.116
LDL-C	0.305	0.250	1.357(0.832~2.214)	0.222
ALB	−0.003	0.048	0.997(0.907~1.096)	0.948
ESR	0.029	0.026	1.029(0.978~1.083)	0.273
CRP	0.102	0.053	1.107(0.998~1.229)	0.054
尿酸	0.010	0.005	1.010(1.001~1.019)	0.039

续表 3 糖尿病足 LEAD 的单因素 logistic 回归分析				
项目	回归 系数	标准 误差	<i>OR</i> (95% <i>CI</i>)	<i>P</i>
血肌酐	0.013	0.014	1.013(0.985~1.042)	0.363
股动脉 PSV	−0.172	0.043	0.842(0.774~0.916)	<0.001
腘动脉 PSV	−0.176	0.033	0.839(0.786~0.895)	<0.001
足背动脉 PSV	−0.622	0.160	0.537(0.392~0.735)	<0.001
股动脉 PI	1.755	0.294	5.782(3.247~10.297)	<0.001
腘动脉 PI	1.519	0.273	4.568(2.677~7.795)	<0.001
足背动脉 PI	0.990	0.180	2.691(1.891~3.830)	<0.001

2.4 糖尿病足 LEAD 的多因素 logistic 回归分析

由于股动脉、腘动脉和足背动脉的 PSV 及 PI 之间存在较强的多重共线性(方差膨胀系数>10),因此将这些变量从多因素 logistic 回归分析中剔除。经多重因素校正后,结果显示 DFU 创面相对温差、尿酸是糖尿病足 LEAD 的影响因素($P<0.05$),见表 4。

表 4 糖尿病足 LEAD 的多因素 logistic 回归分析				
项目	回归 系数	标准 误差	<i>OR</i> (95% <i>CI</i>)	<i>P</i>
ABI	−2.659	2.084	0.070(0.001~4.163)	0.202
DFU 创面相对温差	1.898	0.364	6.674(3.270~13.620)	<0.001
尿酸	0.021	0.008	1.021(1.005~1.037)	0.012

2.5 糖尿病足感染的亚组分析

亚组分析结果表明,DFU 创面相对温差是糖尿病足 LEAD 的影响因素($P<0.05$),糖尿病足感染对于 DFU 创面相对温差与糖尿病足 LEAD 的关系无影响($P>0.05$),见表 5。

表 5 糖尿病足感染的亚组分析				
项目	回归 系数	标准 误差	<i>OR</i> (95% <i>CI</i>)	<i>P</i>
感染组 ^a				
ABI	−3.676	2.405	0.025(0.001~2.820)	0.126
DFU 创面相对温差	1.898	0.364	8.112(3.457~19.032)	<0.001
尿酸	0.021	0.008	1.017(0.998~1.036)	0.086
非感染组 ^b				

^a:交互作用 $P=0.783$;^b:非感染组人数较少,逻辑回归无法收敛。

2.6 DFU 创面相对温差对糖尿病足 LEAD 及相关病变的诊断效能

以 DFU 创面相对温差作为诊断指标进行 ROC 曲线分析,结果显示 DFU 创面相对温差在预测 LEAD 时的 AUC 为 0.923,cut-off 值为 5.4℃;预测下肢动脉硬化斑块、管腔狭窄和管腔闭塞时的 AUC 分别为 0.720、0.657、0.554,cut-off 值分别为 5.6、6.3、4.6℃,见表 6。

表 6 ROC 曲线分析结果					
项目	AUC	灵敏度	特异度	Youden 指数	cut-off 值 (℃)
LEAD	0.923	0.842	0.900	0.742	5.4
下肢动脉硬化斑块	0.720	0.763	0.642	0.405	5.6
下肢动脉管腔狭窄	0.657	0.661	0.634	0.295	6.3
下肢动脉管腔闭塞	0.554	1.000	0.193	0.193	4.6

3 讨 论

本研究探讨了红外热成像技术在糖尿病足 LEAD 诊断中的应用价值,结果显示红外热成像的 DFU 创面相对温差是糖尿病足 LEAD 的重要影响因素,在其早期筛查中具有较高诊断价值。LEAD 引起的动脉狭窄和闭塞减少了远端组织的血流灌注,导致局部代谢产热减少,进而降低 DFU 创面温度^[22]。同时,糖尿病患者的慢性高血糖状态会加速动脉粥样硬化的进程,加剧局部血流障碍^[23-24]。炎症介质的释放会导致毛细血管代偿性扩张,使温度升高。在这种情况下,尽管因血流减少导致创面温度降低,但健康侧可能通过代偿性反应升高温度,最终使创面相对温差的差异值更高。本研究观察到 LEAD 组 DFU 创面相对温差较未病变组明显升高。此外,相关性分析显示,DFU 创面相对温差与股动脉、腘动脉和足背动脉的 PSV 呈负相关,而与 PI 呈正相关($P<0.05$)。PSV 降低反映了动脉狭窄或闭塞引起的血流减缓,PI 升高反映了动脉粥样硬化或血管狭窄^[25-26],提示 DFU 创面相对温差不仅可以反映局部血流灌注的异常,还与 LEAD 相关血管病变的严重程度密切相关。

本研究发现,DFU 创面相对温差和尿酸水平是糖尿病足 LEAD 的独立影响因素($P<0.05$)。尿酸作为代谢性疾病的标志物,近年来在心血管病和动脉硬化中的作用备受关注^[27]。研究表明,糖尿病足患者常伴有尿酸代谢异常^[28-29],尿酸水平升高可能通过促炎作用加速下肢动脉粥样硬化的发生、发展^[30-31]。ROC 曲线分析进一步证实了 DFU 创面相对温差在 LEAD 诊断中具有较高价值,AUC 达 0.923,能够有效区分糖尿病足 LEAD 病变患者和未病变患者,其 cut-off 值为 5.4℃。值得注意的是,虽然 ABI 是传统的 LEAD 筛查工具,但在本研究中未显示出独立性。相比之下,红外热成像的皮肤温度监测在疾病识别中表现出一定优势。亚组分析表明,DFU 创面相对温差作为糖尿病足 LEAD 的独立影响因素对不同感染状态的患者依然具有诊断价值,且感染状态并未对两者之间的关系产生明显影响,提示红外热成像通过监测 DFU 创面相对温差在糖尿病足 LEAD 的筛查中具有广泛的应用前景,能够在感染与非感染的糖尿病足患者中同样发挥预测价值。

综上所述,红外热成像的 DFU 创面相对温差对

糖尿病足 LEAD 具有较高的诊断价值,为 LEAD 早期筛查提供了新的诊断方法,具有良好的临床应用前景。但本研究也存在一定局限性:创面相对温差的测量可能受到患者本身情况、设备精度和环境因素的影响,尽管本研究在标准化环境下尽量减少了外部干扰,并排除了可能存在影响皮肤温度的疾病,但这些因素在实际操作中仍可能存在挑战。此外,本研究未将红外热成像与其他传统诊断工具进行比较,这一点将在今后的研究中深入探讨。

参考文献

[1] MAGLIANO DJ,BOYKO EJ,IDF Diabetes Atlas 10th edition scientific committee. IDF diabetes atlas[M]. 10th ed. Brussels: International Diabetes Federation,2021.

[2] COLLABORATORS G D. Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. Lancet,2023,402(10397): 203-234.

[3] DING X,YUAN Y,XU H,et al. Analysis of risk factors for in-hospital death in elderly patients with TEXAS stage 3 and 4 diabetic foot ulcers after tibial transverse translation:a case-control study[J]. Orthop Surg,2023,15(12): 3272-3278.

[4] GUO L,XIAO X. Guideline for the management of diabetes mellitus in the elderly in China (2024 Edition)[J]. Aging Med,2024,7(1):5-51.

[5] 许景灿,王娅平,陈燕,等. 基于多中心的中国糖尿病足患者临床资料分析[J]. 中南大学学报(医学版),2019,44(8):898-904.

[6] GONG W,SHEN S,SHI X. Secular trends in the epidemiologic patterns of peripheral artery disease and risk factors in China from 1990 to 2019:findings from the global burden of disease study 2019[J]. Front Cardiovasc Med,2022,9: 973592.

[7] PEJKOVA S,MANEVSKA N,TUSHEVA S, et al. Methods for tissue perfusion assessment after Dellon decompression of tarsal tunnels in diabetic neuropathy: key to effective management-a narrative review [J]. Quant Imaging Med Surg,2025,15(1):1012-1022.

[8] 朱迪,陈依,杨彩哲,等. 糖尿病足截趾的影响因素分析及预测模型构建[J]. 中华医学杂志, 2025,105(1):63-71.

[9] 何爱萍,丁心怡,黄佳利,等. 糖尿病足溃疡合并下肢动脉病变的临床特点及相关危险因素[J]. 南方医科大学学报,2022,42(4):604-609.

[10] SARDAR S W,NAM J,KIM T E,et al. Identification of novel biomarkers for early diagnosis of atherosclerosis using high-resolution metabolomics[J]. *Metabolites*,2023,13(11):1160.

[11] ZHANG S,WU Y,GUO Y,et al. Application opportunity of doppler ultrasound combined with CT angiography in diabetic lower extremity arterial disease and the analysis of the risk factors[J]. *Front Endocrinol*,2023,14:1257241.

[12] ABOUHAMDA A,ALTURKSTANI M,JAN Y. Lower sensitivity of ankle-brachial index measurements among people suffering with diabetes-associated vascular disorders:a systematic review[J]. *SAGE Open Med*,2019,7:2050312119835038.

[13] JARAMILLO-QUINTANAR D,GOMEZ-REYES J K,MORALES-HERNANDEZ L A,et al. Automatic segmentation of facial regions of interest and stress detection using machine learning[J]. *Sensors*,2023,24(1):152.

[14] DJAJAKUSUMAH T M,CANDRAWINATA V S,HO J P,et al. The predictive value of infrared thermal imaging (IRT) for peripheral artery disease:a systematic review[J]. *Medicine*,2023,102(43):e35639.

[15] LEÑERO-BARDALLO J A,SERRANO C,ACHA B,et al. Thermography for the differential diagnosis of vascular malformations[J]. *Clin Exp Dermatol*,2021,46(2):314-318.

[16] SERANTONI V,JOURDAN F,LOUCHE H,et al. Definition of thermal indicators for the study of thermoregulation alterations in the foot of people living within diabetic peripheral neuropathy:a proof of concept[J]. *J Therm Biol*,2023,118:103729.

[17] WU L,HUANG R,HE X,et al. Advances in machine learning-aided thermal imaging for early detection of diabetic foot ulcers:a review[J]. *Biosensors*,2024,14(12):614.

[18] 中国医疗保健国际交流促进会外周血管医学分会,首都医科大学下肢动脉硬化闭塞症临床诊疗与研究中心,北京华炎血管疾病诊疗产业技术创新战略联盟. 中国糖尿病足诊治指南[J]. 中国临床医生杂志,2024,52(11):1287-1296.

[19] 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)[J]. 中华糖尿病杂志,2021,13(4):315-409.

[20] 区晓青,陈祎,区丽然,等. 多普勒超声对老年 2 型糖尿病患者下肢血管病变的诊断准确性探讨[J]. 智慧健康,2024,10(14):1-3.

[21] SENNEVILLE É,ALBALAWI Z,VAN ASTEN S A,et al. IWGDF/IDSA guidelines on the diagnosis and treatment of diabetes-related foot infections (IWGDF/IDSA 2023)[J]. *Clin Infect Dis*,2023,2:ciad527.

[22] ZEMAITIS M R,BOLL J M,DREYER M A. Peripheral arterial disease[M]. Treasure Island (FL):StatPearls Publishing,2025.

[23] HUANG L,PAN Y,ZHOU K,et al. Correlation between glycemic variability and diabetic complications:a narrative review[J]. *Int J Gen Med*,2023,16:3083-3094.

[24] STRATTON M S,FARINA F M,ELIA L. Epigenetics and vascular diseases[J]. *J Mol Cell Cardiol*,2019,133:148-163.

[25] 黄建亮,王晓翔,杜晓露. 丁苯酞对进展性脑梗死患者颅内平均血流速度及搏动指数的改善作用[J]. 重庆医学,2022,51(1):106-109.

[26] 卢璐. 颈动脉血管超声检查在缺血性脑卒中早期诊断中的应用价值[J]. 实用医学影像杂志,2019,20(5):527-529.

[27] GU N,LIU Z,WANG Z,et al. Association between serum uric acid levels and neoatherosclerosis[J]. *Int Heart J*,2024,65(1):4-12.

[28] XIONG Q,LIU J,XU Y. Effects of uric acid on diabetes mellitus and its chronic complications[J]. *Int J Endocrinol*,2019,2019:9691345.

[29] SUN S,CHEN L,CHEN D,et al. Prevalence and associated factors of hyperuricemia among Chinese patients with diabetes:a cross-sectional study[J]. *Ther Adv Endocrinol Metab*,2023,14:20420188231198620.

[30] HAN F,YU C,HU F,et al. Association between serum uric acid levels and peripheral artery disease in Chinese adults with hypertension[J]. *Front Endocrinol*,2023,14:1197628.

[31] WOJTASIŃSKA A,FRAK W,LISIŃSKA W,et al. Novel insights into the molecular mechanisms of atherosclerosis[J]. *Int J Mol Sci*,2023,24(17):13434.