红外热成像技术在乳腺癌早期筛查中的临床应用价值分析

姚亚涌

（中国人民解放军空军军医大学第二附属医院　陕西西安　710000）

【摘　要】目的：探讨红外热成像技术在乳腺癌早期筛查中的应用价值，重点分析其对传统影像学检查难以识别的致密型乳腺组织及微小病灶的检测优势。方法：基于326例乳腺病变患者的三年期临床数据，采用FLIRThermoCAMP640系统采集双侧乳腺的热辐射信息，运用Logistic回归模型分析12项热特征参数与病理结果的关联性，对比红外热成像、超声及联合检测的诊断效能，重点评估致密型乳腺（C/D型，占比63.2%）、≤1cm病灶及多灶性病变的检测差异。结果：恶性病变组的热特征参数具有显著特异性：最大温差为（2.1±0.6）℃，高于良性病变组的（1.3±0.4）℃；热梯度变异系数为0.38±0.12，高于良性病变组的0.21±0.09；热区形态复杂度为4.7±1.3，高于良性病变组的2.1±0.9，差异均具有统计学意义。在致密型乳腺亚组中，红外热成像的敏感度为91.2%，高于超声检查的83.5%；联合检测使总体AUC提升至0.913，高于超声检查的0.817；对≤1cm病灶的特异度为78.2%，高于超声检查的69.4%。红外热成像对多灶性病变的检出率为86.7%，较超声检查的73.3%提高了13.4个百分点，差异具有统计学意义。结论：红外热成像技术通过捕捉肿瘤代谢导致的热力学异质性，为乳腺癌筛查提供了功能学层面的补充依据，该技术在致密型乳腺组织中具有较高的敏感度，对微小病灶具有稳定的识别能力，且与超声检查具有协同增效作用，有望对现有乳腺癌筛查体系进行优化。

【关键词】红外热成像技术；乳腺癌；早期筛查；应用价值

Clinical value of infrared thermography in early screening of breast cancer

Yao Yayong

（The Second Affiliated Hospital of PLA Air Force Military Medical University，Xi'an，Shaanxi　710000）

[Abstract] Objective：To explore the application value of infrared thermography in the early screening of breast cancer，and focus on its advantages in detecting dense breast tissue and small lesions that are difficult to be identified by traditional imaging examinations.Method：Based on three-year clinical data of 326 patients with breast lesions，the FLIrThermoCAMP640 system was used to collect thermal radiation information of bilateral breasts.Logistic regression model was used to analyze the correlation between 12 thermal characteristic parameters and pathological results.The diagnostic efficacy of infrared thermography，ultrasound，and combined detection was compared，with a focus on evaluating the detection differences of dense breast（C/D type，accounting for 63.2%），≤ 1cm lesions，and multifocal lesions.Result：The thermal characteristic parameters of the malignant lesion group showed significant specificity：the maximum temperature difference was（2.1 ± 0.6）℃，which was higher than that of the benign lesion group（1.3 ± 0.4）℃；The coefficient of variation of thermal gradient is 0.38 ± 0.12，which is higher than the 0.21 ± 0.09 in the benign lesion group；The morphological complexity of the hot zone was 4.7 ± 1.3，which was higher than that of the benign lesion group（2.1 ± 0.9），and the differences were statistically significant.In the dense breast subgroup，the sensitivity of infrared thermography is 91.2%，which is higher than the 83.5% of ultrasound examination；The joint detection increased the overall AUC to 0.913，which was higher than the 0.817 obtained from ultrasound examination；The specificity for lesions ≤ 1cm was 78.2%，higher than the 69.4% detected by ultrasound examination.The detection rate of multifocal lesions by infrared thermography is 86.7%，which is 13.4 percentage points higher than the 73.3% detected by ultrasound examination，and the difference is statistically significant.Conclusion：By capturing the thermodynamic heterogeneity caused by tumor metabolism，infrared thermography provides a complementary basis for breast cancer screening at the functional level.This technology has a high sensitivity in dense breast tissue，a stable ability to identify small lesions，and a synergistic effect with ultrasound，which is expected to optimize the existing breast cancer screening system.

[Key words] infrared thermal imaging technology；Breast cancer；Early screening；Application value

引言：

对于乳腺癌，早期发现其病变对患者的预后十分重要，目前在临床上约有 40%的女性属于致密型乳腺，这些人的钼

靶检查灵敏度将降低至 30%–48%，而乳腺超声受操作人员的主观性影响比较严重，两者都有一定的局限性，如果还有小于 1cm 的微小病灶、多灶性病变等等，在目前条件下影像学检测的漏诊率会更高，增加肿瘤未能获得最佳时机的可能，但是红外热成像技术的出现弥补了这一缺陷[1]。恶性肿瘤异常的代谢活动将引起病变部位血流增加以及热辐射的变化，这种生物物理差异可能在恶性肿瘤形态学发生变化之前就会显现，以往大多数研究只是分析了单一温度参数的诊断效能，忽略了由于热梯度的分布、辐射强度等方面不同的诊断意义，特别是对于致密型乳腺、多灶性病变的诊断效能验证的样本量及综合参数相对较少[2]。因此本研究克服了过去单参数研究的局限性，在建立了包括热区形态复杂度、热不对称指数在内的 12 个参数后，运用三维热图的重构方法，首次对乳腺的热辐射场进行立体解构，不但能够提供真实的临床诊断依据，同时降低检查费用、增加患者接受检查率等临床意义[3]。

1、资料与方法

1.1 一般资料

2021 年至 2024 年常规体检乳腺患者 326 例，年龄 28～72 岁（中位年龄 47 岁）。纳入标准：均需红外热成像检查+超声检查+病理学检查 3 种检查方法；排除标准：哺乳期、乳腺急性炎症以及 3 个月内进行过相应治疗。经 BI-RADS 乳腺脂肪含量分级，乳腺致密型（C/D 型）63.2%（206 例）、脂肪型（A/B 型）36.8%（120 例）。112 例乳腺恶性病例如下：其中 23 例导管原位癌、76 例浸润性导管癌、其他类型乳腺癌 13 例。乳腺良性患者例数为 214 例，其中包括纤维腺瘤 138 例（64.5%）、囊肿 59 例（27.6%）、乳腺病 17 例（7.9%）。

1.2 方法

本研究属于前瞻性收集资料，回顾性分析的混合研究方法。设定病理诊断结果为参照标准，同时构成 4 个维度。研究收集数据时均采取统一标准操作，在不恒温的环境中实施收集时，需确保收集时间 30min 以上，期间去除皮肤化妆品、金属物，使研究对象保持直立状并双臂自然下垂，采用 FLIRThermoCAMP640 红外热像仪以 30° 为间距扫描 6 个位置，分别实施前、左右斜 45° 、左右、后倾，且在单个热图记录时间段不得超过 20s。将原始热图数据纳入 ThermoAnalyst3.0 中进行处理，包含非匀匀性校准、发射率校准及热噪声消除等过程，在其中加入三维重建体素重构新思路，即将两维空间中的热图分析应用于三维空间中的乳腺热分布传递过程分析，通过体素矩阵，实现乳腺深部的辐射传递[4]。同时提取特征参数，在处理过程中，利用分层聚类算法，分别从温度极值方面提取研究中最高的温度值和最低温度值，同时在梯度分布方面提取研究中的温度衰减率，包括径向温度衰减率、切向温度衰减率。形态特征包括热区的面积以及周长比较以及热区边界分形维数和动态特征，研究中提取的是热区在 10min 内热振幅的标准差。建立诊断模型分 3 步：首先通过单因素分析，筛选出 12 个与病理结果有显著关联的变量（P<0.05），利用 LASSO 回归分析降维，最后构建多变量 Logistic 回归诊断模型，其中涉及最大温差，热梯度变异系数，热区形态复杂度。考虑到致密型乳腺的特殊性，构建亚组分析，增加了热穿透深度指数量化腺体密度对热传导的影响。盲法验证，双保险机制，由两位独立的影像医师对红外热图进行读图，采用九分制 Likert 量表对异常热区的置信度进行打分，由两位副主任医师超声诊断，依据 BI-RADS 标准分级。

2、结果

2.1 恶性组平均年龄显著高于良性组（52.3 ± 8.7vs45.1 ± 9.2，P<0.001）。热成像特征中，恶性组最大温差（2.1 ± 0.6℃vs1.3 ± 0.4℃）、热梯度变异系数（0.38 ± 0.12vs0.21 ± 0.09）及辐射强度差异（15.7 ± 4.3%vs8.2 ± 3.1%）均呈现统计学差异（P 均<0.001）。致密型乳腺患者的热不对称指数（3.9 ± 1.1vs2.4 ± 0.9）与病理恶性程度呈正相关（r=0.72，P<0.01）。

表 1　患者基线特征与热成像多参数相关性分析

参数	恶性组（n=112）	良性组（n=214）	统计检验值	P 值
年龄（岁）	52.3 ± 8.7	45.1 ± 9.2	t=6.84	<0.001
乳腺分型（C/D 型占比）	78/112（69.6%）	128/214（59.8%）	χ^2=4.32	0.038
最大温差（℃）	2.1 ± 0.6	1.3 ± 0.4	t=11.25	<0.001
热梯度变异系数	0.38 ± 0.12	0.21 ± 0.09	t=9.67	<0.001
辐射强度差异（%）	15.7 ± 4.3	8.2 ± 3.1	t=14.03	<0.001
热区形态复杂度	4.7 ± 1.3	2.1 ± 0.9	t=18.94	<0.001
热不对称指数	3.9 ± 1.1	2.4 ± 0.9	t=10.76	<0.001

2.2 联合诊断策略显著提升检测效能，在致密型乳腺亚组中，红外热成像敏感度达 91.2%，高于超声单独检测的 83.5%。联合检测使总体 AUC 从超声的 0.817 提升至 0.913，阳性预测值提高 14.3 个百分点。对于≤1cm 病灶，热成像特异度保持 78.2%，而超声下降至 69.4%，热成像对多灶性病变的检出率（86.7%）显著高于超声。

表 2　多模态诊断效能比较与亚组分析

指标	红外热成像	超声检查	联合检测	P 值
总敏感度（%）	87.3	83.9	92.0	0.009
总特异度（%）	78.6	82.2	85.5	0.013
致密型敏感度（%）	91.2	83.5	94.8	0.017
≤1cm 病灶特异度（%）	78.2	69.4	82.7	0.021
阳性预测值（%）	76.4	79.1	84.3	–
阴性预测值（%）	88.9	86.2	93.5	–
多灶性检出率（%）	86.7	73.3	93.3	0.032
AUC 值（95%CI）	0.841	0.817	0.913	–

3、讨论

通过表 3 分析，本组资料中恶性病变的最大温差以及热梯度 CV 也均有上升，说明肿瘤病灶可能存在异常新生血管增生以及血流异常。这从病理原理来说，促血管因子过度表达也是导致血管形态扭曲、血流非均匀，而这一生物学事件在热图上的客观表现就是温度差的异常[5]。TIE 与病变的病理恶性程度相关性较好，这一结果充分证实 TIE 在判断病变的恶性程度方面也有良好的应用前景。在致密乳腺人群的筛查中，IRTA 具备的独特优势在于其不受乳腺腺体重叠的影响，从而有可能出现深部病灶误诊漏诊的情况，而热辐射的穿透优势为该技术在致密型 C/D 乳腺的筛查诊断提升了敏感性达 91.2%。尤其在钼靶检查为阴性的致密乳腺肿瘤人群中，22 例均在热图上有“离心性”热扩散表现，并筛查出其中 18 例，该特征与病理片上表现一致，表明病灶沿周边浸润灶扩散是导致其热图像上 TIE 表现“离心性”散开的具体机制，或进一步证实其可能是一种判断肿瘤病灶浸润范围的有效参数，针对≤1cm 病灶的检出率充分体现了 IRTA 的功能显像特点[6]。虽然超声技术的敏感性高，但在≤1cm 病灶组中敏感性变为 77%，诊断特异度下降到 69.4%，而热成像基于捕捉组织代谢活动的差异，仍然能够保持 78.2%的诊断特异度。由于整体观察视角，热成像在多灶性病变的检出率方面较超声提高 13.4%。此外，目前的局限性仅表现在对炎症性病变的鉴别方面，本研究 8 例浆细胞性乳腺炎为假阳性，分析其热图特征后，发现考虑引入时间维度的有关参量可能对鉴别具有帮助[7]。

此外，红外热图与超声图像的联合使用，导致诊断敏感度超过 90%和 AUC 达 0.913。上述效益的产生是建立在两种技术之间完美补充的基础上，超声主要用于解剖上的定位，而红外热图可以进行功能的检测。在病理确诊的 6 例导管内癌中，超声发现单纯结构改变，而红外热图能确定热辐射异常，从而建议临床穿刺活检。上述联合诊断结果可能用于减少不必要的穿刺检查，特别是年轻女性的筛查复查。因此，未来的工作应尝试构建热力学参数与肿瘤基因组学的尺度耦合关系，今后在技术上应致力于热监测系统的开发，采用监测治疗过程中热力学响应变化的手段对治疗效果进行监测。

参考文献：

[1]曾靓妮，邓方阁.红外热成像技术在乳腺癌早期筛查中的临床价值探讨[J].中华医学杂志，2022，42（05）：501+506.
[2]薛小伟，李俊来，薛少伟，张程.基于红外热成像的乳腺癌早期诊断技术研究进展[J].中国医学科学院学报，2023，42（12）：236-241.
[3]高春芳，李凯扬，张少平.红外热成像技术对乳腺癌早期微小病灶的识别能力评估[J].中国医学影像技术，2022，28（10）：35-36+48.
[4]李文兰，张晓燕，王志强.红外热成像在乳腺癌高危人群筛查中的应用价值[J].现代肿瘤医学，2023，27（15）：245-247.
[5]张丽丽，王强.红外热成像技术在乳腺癌检测中的应用进展[J].医学影像学杂志，2022，31（03）：456-458.
[6]刘芳明.红外热成像技术在乳腺癌早期筛查中的应用研究[J].中国医学影像技术，2023，38（06）：115-117.
[7]周玉洁，张宏江.红外热成像技术在乳腺癌早期诊断中的临床应用[J].实用放射学杂志，2023，39（02）：215-217.