



· 论 著 ·

基于二维超声图像的深度学习模型术前预测乳腺癌脉管浸润：一项人机对比研究

来金玉, 钟李长, 师琳, 马方, 李维梅, 谷丽萍

上海交通大学医学院附属第六人民医院超声医学科, 上海 200233

[摘要] **目的:** 评估基于二维超声图像的深度学习模型术前预测乳腺癌脉管浸润 (lymphovascular invasion, LVI) 的可行性, 并比较其与超声科医师的传统判读结果, 以期作为作出个体化治疗决策和实施精准医疗提供新的影像学依据。**方法:** 回顾并纳入2020年1月—2023年12月在上海交通大学医学院附属第六人民医院接受乳腺病灶手术且病理学检查确诊为乳腺癌的患者。患者病灶灰阶图像经过标准化处理后, 通过基于卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 的深度学习模型提取超声图像特征, 以预测LVI。计算准确度、灵敏度、特异度和曲线下面积 (area under curve, AUC) 以评估模型性能, 并与不同年资的超声科医师的读片结果进行比较, 同时分析深度学习模型对超声科医师辅助诊断的效能。**结果:** 共纳入232例患者, 共计232个病灶。将数据按8:2比例随机分为训练集 (185例) 和验证集 (47例)。232例乳腺癌患者中, 102例 (43.97%) 经术后病理学检查证实存在LVI。深度学习模型 (支持向量机) 在训练集和验证集的AUC分别为0.917 (95% CI 0.877~0.956) 和0.863 (95% CI 0.750~0.975), 在验证集中模型的准确度、灵敏度和特异度分别为83.0%、85.7%和80.8%。相比之下, 具有5~10年和10~15年经验的超声科医师在验证集的AUC分别为0.623和0.709, 显著低于深度学习模型 ($P<0.05$)。在深度学习模型的辅助下, 具有10~15年经验的超声科医师读片的AUC提高至0.914, 准确度、灵敏度和特异度分别提升至91.5%、90.5%和92.3%。**结论:** 基于二维超声图像的深度学习模型在乳腺癌LVI的术前预测中表现出更高的准确性与可靠性。该模型显著优于超声科医师的传统诊断方法, 在临床辅助诊断中展现出应用潜力, 有助于提升术前评估LVI的精准度, 支持患者个体化治疗方案的制订。

[关键词] 乳腺癌; 超声; 脉管浸润; 深度学习

中图分类号: R737.9; R445.1 文献标志码: A

DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2025.03.001

基金项目: 浦东新区科技发展基金事业单位民生科研专项医疗卫生项目 (PKJ2023-Y52)。

利益冲突: 作者声明无利益冲突。

伦理批件: 2024-KY-117K。

知情同意: 豁免。

引用本文: 来金玉, 钟李长, 师琳, 等. 基于二维超声图像的深度学习模型术前预测乳腺癌脉管浸润: 一项人机对比研究 [J]. 肿瘤影像学, 2025, 34(3): 201-207.

Funding: Pudong New Area Science and Technology Development Fund – Public Institution Livelihood Research Special Project Medical and Health Project (PKJ2023-Y52).

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: 2024-KY-117K.

Informed consent: exemption.

Cite this article: LAI J, ZHONG L, SHI L, et al. Deep learning model based on two-dimensional ultrasound images for preoperative prediction of breast cancer lymphovascular invasion: a human-machine comparison study [J]. Oncoradiology, 2025, 34(3): 201-207.

Deep learning model based on two-dimensional ultrasound images for preoperative prediction of breast cancer lymphovascular invasion: a human-machine comparison study LAI Jinyu, ZHONG Lichang, SHI Lin, MA Fang, LI Weimei, GU Liping

(Department of Ultrasound in Medicine, Sixth People's Hospital Affiliated to Medical College of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200233, China)

Correspondence to: ZHONG Lichang E-mail: tjzhonglichang@163.com

[Abstract] **Objective:** To assess the feasibility and accuracy of a deep learning model based on two-dimensional ultrasound images for preoperative prediction of lymphovascular invasion (LVI) in breast cancer, and compare its results with traditional interpretations by ultrasound physicians, providing novel imaging insights to support personalized treatment decisions and precision medicine. **Methods:** A retrospective analysis was conducted on patients diagnosed with breast cancer through postoperative pathology, who underwent breast surgery in Sixth People's Hospital Affiliated to Medical College of Shanghai Jiao Tong University between January 2020 and December 2023. Standardized grayscale ultrasound images of lesions were processed, and features were extracted using a convolutional neural network (CNN)-based deep learning model to predict LVI. The model's performance was

evaluated using accuracy, sensitivity, specificity, and the area under the receiver operating characteristic curve (AUC). Comparisons were made with the diagnostic performance of ultrasound physicians with varying levels of experience, and the impact of the deep learning model on improving physician diagnostics was analyzed. **Results:** A total of 232 patients were included, with a total of 232 lesions. The dataset was divided into a training set (185 cases) and a validation set (47 cases) in an 8 : 2 ratio. Among the 232 patients, 102 cases (43.97%) were confirmed to have LVI by postoperative pathology. The deep learning model (support vector machine) achieved AUCs of 0.917 (95% CI 0.877-0.956) and 0.863 (95% CI 0.750-0.975) in the training and validation sets, respectively. For the validation set, the accuracy, sensitivity, and specificity were 83.0%, 85.7%, and 80.8%, respectively. In comparison, ultrasound physicians with 5-10 years and 10-15 years of experience achieved AUCs of 0.623 and 0.709, respectively, which were significantly lower than the deep learning model ($P < 0.05$). When assisted by the deep learning model, the AUC for the physician with 10-15 years of experience increased to 0.914, with corresponding improvements in accuracy (91.5%), sensitivity (90.5%), and specificity (92.3%). **Conclusion:** The deep learning model based on two-dimensional ultrasound images demonstrated superior accuracy and reliability in the preoperative prediction of LVI in breast cancer. It significantly outperformed traditional diagnostic approaches by ultrasound physicians and showed potential as a clinical auxiliary tool to improve the precision of preoperative assessments of LVI, supporting personalized patient treatment planning.

[**Key words**] Breast cancer; Ultrasound; Lymphovascular invasion; Deep learning

乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤之一^[1], 早期诊断和准确的术前评估对于乳腺癌患者制订有效的治疗方案至关重要。脉管浸润 (lymphovascular invasion, LVI) 是指肿瘤细胞存在于淋巴管或血管中, 是多种癌症 (包括乳腺癌、肺癌和胃癌等) 的关键预后因素^[2], LVI的存在通常与较高的转移风险和较差的预后相关^[3-4]。

评估LVI状态的方法包括磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 检查, 基因亚型、血清标志物和腋窝淋巴结状态检测^[5-7]。既往对乳腺癌LVI的评估方法存在有创、结果延迟性等不足。超声作为一种无创、经济且便捷的影像学工具, 被广泛应用于乳腺癌的筛查和诊断^[8]。然而, 二维超声图像的解读高度依赖于医师的经验和技术水平, 存在一定的主观性和可变性。

随着人工智能的发展, 基于深度学习的图像分析方法在医学影像领域展现出巨大的潜力。多项研究^[2-3, 9]表明, 深度学习算法在图像分类、特征提取和预测分析方面的表现优于传统方法, 尤其在乳腺癌的自动化诊断和患者预后评估中取得了显著成果。然而, 目前关于基于二维超声图像的深度学习模型在预测乳腺癌LVI方面的研究仍然有限, 且缺乏系统的人机对比分析^[10-11]。

本研究旨在开发和验证一种基于二维超声图像的深度学习模型, 用于术前预测乳腺癌LVI,

并与传统的人工评估方法进行对比分析。通过整合先进的深度学习技术, 以期提高术前预测乳腺癌LVI状态的准确性和可靠性, 从而为乳腺癌患者的个体化治疗提供无创性的评估方法。

1 资料和方法

1.1 研究对象

回顾并纳入2020年1月—2023年12月于上海交通大学医学院附属第六人民医院接受乳腺超声检查并确诊为乳腺癌的女性患者。纳入标准: ① 年龄在18岁以上; ② 病理学检查确诊为乳腺癌; ③ 术前行二维超声检查并保存完整的影像学资料; ④ 术后病理学报告中包含LVI的评估结果。排除标准: ① 影像学资料不完整或质量不佳; ② 患者在治疗前接受过任何形式的乳腺癌治疗 (如化疗、放疗); ③ 合并其他恶性肿瘤。本研究遵循《赫尔辛基宣言》相关伦理规范, 已获得所在机构伦理委员会的批准 (2024-KY-117K)。

1.2 超声图像获取与数据预处理

患者的二维乳腺超声图像均由5名经验丰富的超声科医师使用荷兰Philips公司的超声诊断仪 (型号: EPIQ5, EPIQ7, iU22) 获取。图像采集标准化, 包括固定的扫描参数 (频率、增益、深度等) 以减少设备间的变异性。由2名资深的乳腺超声专家独立对所有病灶超声图像进行标注。意见不一致时, 通过与第3名专家讨论确定

最终标注结果，以确保标注的准确性和一致性。

为了提高模型的泛化能力，采用数据增强技术对训练集进行处理，包括随机旋转、平移、缩放、翻转以及添加噪声等方法，以增强模型对图像变异的适应能力。

1.3 深度学习模型开发与验证

本研究采用卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) ResNet-50模型作为基础架构，为了适应本研究的二分类任务 (LVI阳性与阴性)，对最后的全连接层进行了修改。

模型训练使用PyTorch深度学习框架，并在NVIDIA RTX 3090 GPU上进行。采用交叉熵损失 (cross-entropy loss) 和Adam优化器，初始学习率设为 1×10^{-4} ，并在训练过程中根据验证集的表现动态调整学习率。训练过程中，使用早停 (early stopping) 策略以防止过拟合，设定当验证集损失在连续30个迭代内不再下降时停止训练。特征选择过程采用Spearman秩相关检验和最小绝对收缩和选择算子 (least absolute shrinkage and selection operator, LASSO) 回归方法，筛选出最相关的特征用于机器学习模型支持向量机 (support vector machine, SVM) 构建。

1.4 人工评估

选取相同的验证集，分别由具有5~10年、10~15年乳腺超声诊断经验的超声科医师独立评估LVI情况。对于评估结果存在分歧的患者，通过与另一名具有15年以上临床经验的超声专家讨论达成一致意见。人工评估的结果将作为基准，与深度学习模型的预测结果进行对比分析。

1.5 统计学处理

采用R软件和SPSS 26.0进行数据统计分析，以病理学检查结果作为金标准。对计量数据进行正态性和方差齐性检验，对于符合正态分布的数据，采用独立样本 t 检验；对于非正态分布的连续变量，使用Mann-Whitney U 检验；分类变量则通过 χ^2 检验进行比较。此外，采用SVM构建预测模型，并绘制受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线以评估模型性能，计算模型的准确度、灵敏度、特异度、精确度、F1值及曲线下面积 (area under curve, AUC)。

$P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者的一般资料

本研究共纳入232例乳腺癌患者，年龄19~86岁，平均年龄 (45.28 ± 15.50) 岁。其中，LVI阳性患者102例 (43.97%)，平均年龄 (45.24 ± 15.68) 岁；LVI阴性患者130例 (56.03%)，平均年龄 (45.32 ± 15.42) 岁 (图1)。将232例浸润性乳腺癌数据按8:2随机分为训练集 (185例)、验证集 (47例)。

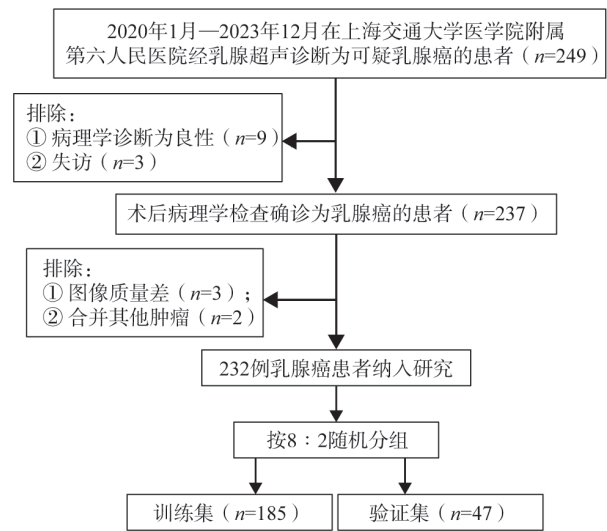


图1 研究对象纳入流程图

Fig.1 Flowchart of study participant enrollment and exclusion

2.2 深度学习模型诊断表现

本研究利用基于预训练CNN ResNet-50从每个肿瘤的超声图像中提取了2 048个深度学习特征，随后通过Spearman秩相关检验和LASSO回归方法进行特征筛选，最终选取17个非零LASSO系数的深度学习特征用于SVM模型构建。结果显示，ResNet-50在训练集和验证集中的AUC分别为0.917 (95% CI 0.877~0.956) 和0.863 (95% CI 0.750~0.975)。其在训练集中的准确度、灵敏度及特异度分别为84.3%、90.1%及79.8%，在验证集中，准确度、灵敏度及特异度分别为83.0%、85.7%及80.8% (图2A, 表1)。

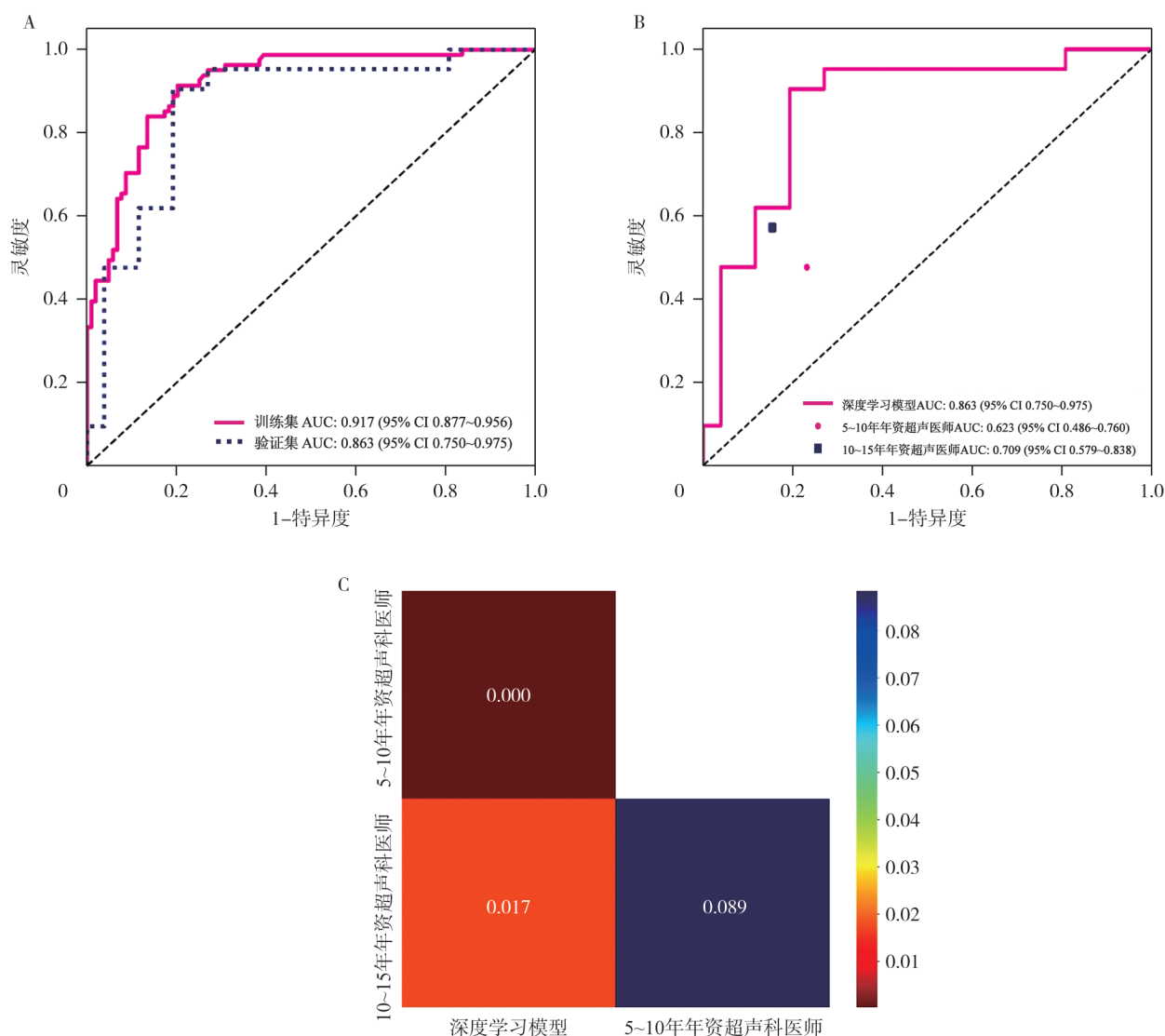


图2 深度学习模型、超声科医师在鉴别乳腺癌LVI中的诊断表现

Fig.2 Diagnostic performance of deep learning model and ultrasound physicians in differentiating LVI in breast cancer

A: 深度学习模型诊断表现; B: 深度学习模型与超声科医师诊断表现对比; C: 深度学习模型与超声科医师诊断表现DeLong检验。

表1 深度学习、超声科医师及深度学习辅助下超声科医师的诊断表现

组别	AUC (95% CI)	准确度/%	灵敏度/%	特异度/%
深度学习训练集	0.917 (95% CI 0.877-0.956)	84.3	90.1	79.8
深度学习验证集	0.863 (95% CI 0.750-0.975)	83.0	85.7	80.8
5~10年超声科医师	0.623 (95% CI 0.486-0.760)	63.8	47.6	76.9
10~15年超声科医师	0.709 (95% CI 0.579-0.838)	72.3	57.1	74.9
深度学习辅助超声科医师	0.914 (95% CI 0.831-0.997)	91.5	90.5	92.3

2.3 超声科医师诊断表现

在鉴别乳腺癌LVI阳性与阴性方面, 2名超声科医师的诊断表现如下: 5~10年乳腺超声诊断经验的医师在验证集的AUC为0.623 (95% CI 0.486~0.760), 准确度、灵敏度及特异度分别为63.8%、47.6%及76.9%; 10~15年乳腺超声诊断经验的医师在验证集的AUC为0.709 (95% CI 0.579~0.838), 准确度、灵敏度及特异度分别为72.3%、57.1%及74.9% (图2B, 表1)。DeLong检验显示, 5~10年、10~15年乳腺超声诊断经验的超声科医师的诊断表现 (AUC) 显著低于深度学习模型 ($Z=3.068, P<0.001; Z=2.280, P=0.017$, 图2C)。

2.4 深度学习模型辅助下超声科医师诊断表现

同时, 我们应用深度学习模型辅助另1名具有10~15年乳腺超声诊断经验的医师鉴别验证集乳腺癌LVI的阳性与阴性, 其AUC为0.914 (95% CI 0.831~0.997), 准确度、灵敏度及特异度分别为91.5%、90.5%及92.3%。其诊断表现均得到较大提高 ($P<0.05$), AUC较5~10年、10~15年乳腺超声诊断经验医师分别提高了0.291、0.205; 准确度分别提高了27.7%、19.2%; 灵敏度分别提高了42.9%、33.4%; 特异度分别提高了15.4%、17.4% (图3)。

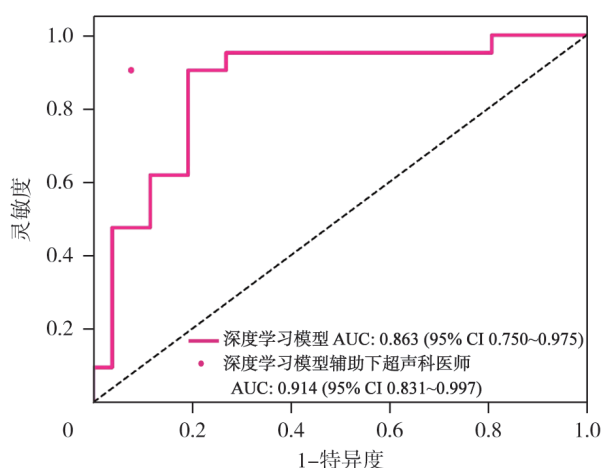


图3 深度学习辅助下超声科医师的诊断表现

Fig.3 Diagnostic performance of ultrasound physicians with deep learning assistance

3 讨论

本研究基于二维超声图像, 利用深度学习模型对乳腺癌LVI进行术前预测, 并与超声科医师的人工诊断结果进行了对比。结果显示, 深度学习模型在预测LVI方面具有较好的诊断效能 (AUC为0.863), 并在一定程度上优于有经验的超声科医师。研究表明, 人工智能技术在乳腺癌病理学风险评估中具有潜在应用价值。

近年来, 影像组学作为备受关注的机器学习技术, 具备深度挖掘医学图像特征信息并进行定量分析的能力, 已成为肿瘤诊断和预后评估中的重要工具^[12-15]。基于超声、乳腺X线摄影或MRI构建的瘤内影像组学模型, 在预测乳腺癌LVI状态方面呈现出显著效果^[11, 16-18], 另有研究^[4, 19]表明, MRI肿瘤周围区域的影像组学特征对预测乳腺癌LVI具有显著作用。此外, 整合瘤内和瘤周区域影像组学特征构建的联合模型, 可显著提升乳腺癌LVI预测的准确度与可靠性^[4]。然而, 相较于深度学习, 影像组学在小规模数据集或单中心研究中往往表现出较高的准确度和灵敏度, 但在不同设备、操作者或多中心数据中, 模型的稳定性和通用性可能受到影响^[20]。同时, 影像组学对感兴趣区 (region of interest, ROI) 的明确性和高质量要求较高, 若病灶边界模糊或存在噪点、声影等问题, 特征提取容易失真。

为解决上述问题, 近年来计算机辅助诊断 (computer-aided diagnosis, CAD) 技术在医学影像领域发展迅速, 深度学习在多种疾病的检测与分级任务中取得了显著进展^[21]。其中, 以CNN为代表的方法, 通过大规模数据训练, 可自动提取具有较强判别力的图像特征, 避免了影像组学中ROI手动选择的主观性和不足之处^[22]。深度学习通过对大量超声图像数据进行特征提取和模式识别, 能够学习到常规人工判读无法轻易察觉的细微差异^[23], 从而在肿瘤性质判别、病理学分型以及患者预后预测等方面获得较为理

想的结果^[24]。Feng等^[25]基于MRI构建的深度学习模型在预测乳腺癌LVI状态方面表现出色, AUC达到0.852; 而Liang等^[2]的研究显示, 基于MRI构建的深度学习模型在预测淋巴结阴性浸润性乳腺癌LVI状态时AUC高达0.896。本研究基于二维超声图像构建的预测乳腺癌LVI状态的深度学习模型AUC为0.863, 与前述研究结果相仿。

与超声科医师人工读片结果相比, 本研究的深度学习模型在预测LVI这一特定任务中展示出较好的分类性能, 模型较具有5~10年、10~15年乳腺超声诊断经验的超声科医师AUC分别提高了0.240、0.154; 准确度分别提高了19.2%、10.7%; 灵敏度分别提高了38.1%、28.6%。这可能与深度学习能够从海量数据中提取多维度的图像特征有关, 使得模型在识别肿瘤微观特征和潜在侵袭性方面更为敏感^[26]。而我们应用深度学习模型辅助另1名具有10~15年乳腺超声诊断经验的医师鉴别乳腺癌LVI的状态, 其AUC较5~10年、10~15年乳腺超声诊断经验超声科医师分别提高了0.291、0.205; 准确度分别提高了27.7%、19.2%; 灵敏度分别提高了42.9%、33.4%; 特异度分别提高了15.4%、17.4%, 这些结果进一步验证了深度学习对乳腺癌LVI的状态分析的潜在价值。值得一提的是, 医师在病灶定位、综合临床信息分析等方面仍然具有不可替代的优势。因此, “人机协作”而非单纯替代的工作模式, 更有可能在临床实践中实现最佳诊断效能。

本研究也存在一定的局限性。首先, 研究样本量相对有限, 模型的泛化能力尚需在更大规模、多中心的数据中加以验证。其次, 二维超声图像依赖于操作者的经验与设备的性能, 图像质量差异可能会影响模型的特征提取与识别。此外, 在模型构建过程中, 尚需更多的多学科协作与临床资料融合, 以便于进一步提高预测的精确性与实用性。因此, 未来研究应致力于多中心、大样本的前瞻性研究验证, 通过标准化的图像采集流程和高质量的标注, 提高深度学习模型的稳定性与可靠性, 最终实现精准医学在乳腺癌诊断与治疗中的推广与应用。

综上所述, 本研究基于二维超声图像的深度学习

模型在术前预测乳腺癌LVI方面展现出较高的诊断效能, 并且在与超声科医师传统诊断对比中表现出一定优势。

第一作者:

来金玉 (ORCID: 0009-0007-8882-2832), 学士, 医师。

通信作者:

钟李长 (ORCID: 0000-0002-6701-7419), 硕士, 副主任医师, E-mail: tjzhonglichang@163.com。

作者贡献说明:

来金玉: 采集与分析数据, 提出、设计论文基本框架, 撰写论文; 钟李长: 提出研究方向, 论文设计、起草、修订、审核、修订, 获得项目支持; 师琳、马方、李维梅、谷丽萍: 参与数据采集及分析。

[参 考 文 献]

- [1] PHD H S, LISA A NEWMAN MD M, et al. Breast cancer statistics 2024 [J]. *CA A Cancer J Clin*, 2024, 74(6): 477-495.
- [2] LIANG R, LI F F, YAO J Y, et al. Predictive value of MRI-based deep learning model for lymphovascular invasion status in node-negative invasive breast cancer [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 16204.
- [3] YANG X Q, FAN X H, LIN S Y, et al. Assessment of lymphovascular invasion in breast cancer using a combined MRI morphological features, radiomics, and deep learning approach based on dynamic contrast-enhanced MRI [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024, 59(6): 2238-2249.
- [4] JIANG W Y, MENG R Q, CHENG Y, et al. Intra- and peritumoral based radiomics for assessment of lymphovascular invasion in invasive breast cancer [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024, 59(2): 613-625.
- [5] MA Q Q, LU X R, CHEN Q T, et al. Multiphases DCE-MRI radiomics nomogram for preoperative prediction of lymphovascular invasion in invasive breast cancer [J]. *Acad Radiol*, 2024, 31(12): 4743-4758.
- [6] GONZALEZ J, BAHMAD H F, OCEJO S, et al. The usefulness of elastin staining to detect vascular invasion in cancer [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(20): 15264.
- [7] GE W, FAN X H, ZENG Y, et al. Exploring habitats-based spatial distributions: improving predictions of lymphovascular invasion in invasive breast cancer [J]. *Acad Radiol*, 2024, 31(11): 4317-4328.
- [8] 师琳, 钟李长, 马方, 等. 瘤周超声影像组学对乳腺结节良恶性的鉴别诊断价值 [J]. *肿瘤影像学*, 2023, 32(6): 485-491.
- SHI L, ZHONG L C, MA F, et al. The value of ultrasound-based peri-tumoral radiomics in differential diagnosis of benign and malignant breast nodules [J]. *Oncoradiology*, 2023, 32(6): 485-491.
- [9] LI X F, DESSI M, MARCUS D, et al. Prediction of deep

- myometrial infiltration, clinical risk category, histological type, and lymphovascular space invasion in women with endometrial cancer based on clinical and T2-weighted MRI radiomic features [J]. *Cancers (Basel)*, 2023, 15(8): 2209.
- [10] ZHANG D, ZHOU W, LU W W, et al. Ultrasound-based deep learning radiomics nomogram for the assessment of lymphovascular invasion in invasive breast cancer: a multicenter study [J]. *Acad Radiol*, 2024, 31(10): 3917–3928.
- [11] DU Y, CAI M J, ZHA H L, et al. Ultrasound radiomics-based nomogram to predict lymphovascular invasion in invasive breast cancer: a multicenter, retrospective study [J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(1): 136–148.
- [12] XU M L, YANG H M, YANG Q, et al. Radiomics nomogram based on digital breast tomosynthesis: preoperative evaluation of axillary lymph node metastasis in breast carcinoma [J]. *J Cancer Res Clin Oncol*, 2023, 149(11): 9317–9328.
- [13] SHI S M, SINGH A, MA J Q, et al. Development and validation of a multi-parametric MRI deep-learning model for preoperative lymphovascular invasion evaluation in rectal cancer [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2025, 15(1): 427–439.
- [14] LIU W, LI L, DENG J, et al. A comprehensive approach for evaluating lymphovascular invasion in invasive breast cancer: Leveraging multimodal MRI findings, radiomics, and deep learning analysis of intra- and peritumoral regions [J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2024, 116: 102415.
- [15] ZHENG H, JIAN L, LI L, et al. Prior clinico-radiological features informed multi-modal MR images convolution neural network: a novel deep learning framework for prediction of lymphovascular invasion in breast cancer [J]. *Cancer Med*, 2024, 13(3): e6932.
- [16] KAYADIBI Y, KOCAK B, UCAR N, et al. MRI radiomics of breast cancer: machine learning-based prediction of lymphovascular invasion status [J]. *Acad Radiol*, 2022, 29(Suppl 1): S126–S134.
- [17] XU M L, YANG H M, SUN J, et al. Development of an intratumoral and peritumoral radiomics nomogram using digital breast tomosynthesis for preoperative assessment of lymphovascular invasion in invasive breast cancer [J]. *Acad Radiol*, 2024, 31(5): 1748–1761.
- [18] WANG D Q, LIU M S, ZHUANG Z J, et al. Radiomics analysis on digital breast tomosynthesis: preoperative evaluation of lymphovascular invasion status in invasive breast cancer [J]. *Acad Radiol*, 2022, 29(12): 1773–1782.
- [19] 王浩天, 赵敏, 范雪姣, 等. 磁共振成像影像组学特征对乳腺癌淋巴管浸润的预测价值 [J]. *中华放射学杂志*, 2022, 56(9): 982–988.
- WANG H T, ZHAO M, FAN X J, et al. The value of MRI radiomics features for prediction of lymphovascular invasion in invasive breast cancer [J]. *Chin J Radiol*, 2022, 56(9): 982–988.
- [20] LIU W C, CHEN W B, XIA J, et al. Lymph node metastasis prediction and biological pathway associations underlying DCE-MRI deep learning radiomics in invasive breast cancer [J]. *BMC Med Imaging*, 2024, 24(1): 91.
- [21] WANG H R, JIN Q Y, LI S M, et al. A comprehensive survey on deep active learning in medical image analysis [J]. *Med Image Anal*, 2024, 95: 103201.
- [22] CHEN J Y, LIU Y H, WEI S W, et al. A survey on deep learning in medical image registration: new technologies, uncertainty, evaluation metrics, and beyond [J]. *Med Image Anal*, 2025, 100: 103385.
- [23] ATASEVER S, AZGINOGLU N, TERZI D S, et al. A comprehensive survey of deep learning research on medical image analysis with focus on transfer learning [J]. *Clin Imaging*, 2023, 94: 18–41.
- [24] YANG X Q, WANG X F, ZUO Z C, et al. Radiomics-based analysis of dynamic contrast-enhanced magnetic resonance image: a prediction nomogram for lymphovascular invasion in breast cancer [J]. *Magn Reson Imaging*, 2024, 112: 89–99.
- [25] FENG B, LIU Z S, LIU Y, et al. Predicting lymphovascular invasion in clinically node-negative breast cancer detected by abbreviated magnetic resonance imaging: TRAnsfer learning vs radiomics [J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 890659.
- [26] BYRA M, JAROSIK P, DOBRUCH-SOBCZAK K, et al. Joint segmentation and classification of breast masses based on ultrasound radio-frequency data and convolutional neural networks [J]. *Ultrasonics*, 2022, 121: 106682.

(收稿日期: 2025-02-05 修回日期: 2025-03-26)