

超声影像组学在乳腺癌腋窝淋巴结术前评估中的研究进展

Research progress of ultrasound radiomics in the preoperative evaluation of axillary lymph nodes of breast cancer

黄大艳^{1,2}, 罗俊^{2△}, 贯成³

HUANG Da-yan, LUO Jun, GUAN Cheng

1. 电子科技大学, 四川 成都 610050; 2. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)超声科, 四川 成都 610072;

3. 成都中医药大学医学与生命科学学院, 四川 成都 610032

【摘要】 乳腺癌腋窝淋巴结的术前精准评估对患者的手术方案及预后具有重要意义, 已陆续有学者开展基于超声影像组学模型来术前评估乳腺癌患者腋窝淋巴结状况的相关研究。本文基于当前乳腺癌患者腋窝淋巴结外科管理的临床问题, 对超声影像组学在乳腺癌腋窝淋巴结中的研究进展进行简要总结, 并探讨当前面临的挑战和未来发展方向。

【关键词】 乳腺癌; 腋窝淋巴结; 超声影像组学; 人工智能

【中图分类号】 R445.1; R373.9

【文献标志码】 B

【文章编号】 1672-6170(2025)00-0205-05

乳腺癌已经成为全世界女性发病率最高的恶性肿瘤^[1], 腋窝淋巴结(axillary lymph nodes, ALN)状况与手术方案的选择、患者的远期预后高度相关, 腋窝淋巴结转移(axillary lymph node metastasis, ALNM)患者与阴性患者相比, 其5年总生存率最高可下降40%^[2~4]。为了提供个体化和有效的治疗方案, 能够早期高度准确地分期至关重要。前哨淋巴结活检(sentinel lymph node biopsy, SLNB)是临床评估腋窝淋巴结为cN0的早期乳腺癌患者腋窝分期的标准程序^[5~7], 但其仍为有创操作。SOUND试验^[8]纳入研究的患者中, 仅13.7%的患者通过

SLNB发现腋窝淋巴结存在转移, 且其中微转移的比例为37.1%, 而随着术后辅助治疗的进展和跟进, 对这类微转移的患者, 其远期预后并不会降低, 还有近85%的腋窝解剖显示没有转移, 因此构成了无效的手术。且一系列临床试验^[9~12]表明, 与不进行腋窝手术相比, 腋窝淋巴结清扫(axillary lymph node dissection, ALND)并没有改善预后, 证实了ALN切除本身没有治疗效果, 主要是作为一种分期程序进行的。如果对ALN状况有更可靠的术前评估, 不必要的腋窝分期手术是否可以豁免逐渐被学者关注。乳腺超声检查因其无辐射、经济、便捷和

[28] Ulucoban H, Dirol H, Ozdemir T. The Effect of Vitamin D Deficiency in Chronic Obstructive Pulmonary Disease[J]. Turkish Thoracic Journal, 2021, 22(3): 242-246.

[29] Haeri NS, Perera S, Greenspan SL. The association of vitamin D with bone microarchitecture, muscle strength, and mobility performance in older women in long-term care[J]. Bone, 2023, 176: 116867.

[30] Rafiq R, Aleva FE, Schrupf JA, et al. Vitamin D supplementation in chronic obstructive pulmonary disease patients with low serum vitamin D: a randomized controlled trial[J]. The American journal of clinical nutrition, 2022, 116(2), 491-499.

[31] Piscoer I, Janssen R, Franssen FME, et al. The Pleiotropic Role of Vitamin K in Multimorbidity of Chronic Obstructive Pulmonary Disease[J]. Journal of Clinical Medicine, 2023, 12(4): 1261.

[32] Ahmadi A, Eftekhari MH, Mazloom Z, et al. Fortified whey beverage for improving muscle mass in chronic obstructive pulmonary disease: a single-blind, randomized clinical trial[J]. Respiratory Research, 2020, 21(1): 216.

[33] Wu PY, Huang KS, Chen KM, et al. Exercise, Nutrition, and Combined Exercise and Nutrition in Older Adults with Sarcopenia: A Systematic Review and Network Meta-analysis[J]. Maturitas, 2021, 145: 38-48.

[34] Howard EE, Margolis LM, Berryman CE, et al. Testosterone supplementation upregulates androgen receptor expression and translational capacity during severe energy deficit[J]. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism, 2020, 319(4): E678-E688.

[35] Tian X, Lou S, Shi R. From mitochondria to sarcopenia: role of 17β-estradiol and testosterone[J]. Frontiers in Endocrinology, 2023, 14: 1156583.

[36] Priego T, Martín AI, González-Hedström D, et al. Role of hormones in sarcopenia[J]. Vitamins and Hormones, 2021, 115: 535-570.

[37] Rooks D, Swan T, Goswami B, et al. Bimagrumab vs Optimized Standard of Care for Treatment of Sarcopenia in Community-Dwelling Older Adults: A Randomized Clinical Trial[J]. JAMA Network Open, 2020, 3(10): e2020836.

[38] Tao F, Zhou Y, Wang M, et al. Metformin alleviates chronic obstructive pulmonary disease and cigarette smoke extract-induced glucocorticoid resistance by activating the nuclear factor E2-related factor 2/heme oxygenase-1 signaling pathway[J]. The Korean Journal of Physiology & Pharmacology, 2022, 26(2): 95-111.

(收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-09-20)

(本文编辑: 林 赞)

对 ALNM 的判定指标较多等优势,成为目前对乳腺癌患者的 ALN 状况进行术前评估及行图像引导进行淋巴结干预的首选影像学方法^[13]。

1 传统超声影像学在乳腺癌 ALN 术前评估中的应用

超声影像学的发展及新技术的应用使得其在乳腺癌患者的相关评估中得到广泛应用,相关研究^[14, 15]表明,灰度超声、彩色多普勒血流显像模式联合弹性成像及超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)评估在乳腺疾病中具有一定诊断价值,术前超声评估乳腺癌 ALN 状况得到广泛的临床认可。超声弹性成像作为一种新的成像模式,是以软组织的弹性大小为参量反映生物组织的弹性信息,以此进一步反映组织病变特征,而乳腺癌肿瘤灶的硬度是预测患者 ALNM 的因素之一,其硬度越高,转移可能性越大^[16]。肿瘤血供是乳腺癌评估的一个重要指标,CEUS 因其能对肿瘤内部血流灌注进行定性及定量分析,在一定程度上弥补了灰度超声的不足,在评估患者的 ALNM 时具有重要的临床意义和应用前景。但超声对乳腺癌患者 ALN 的评估比较依赖于操作者的水平,其敏感性和特异性分别为 33%~86.2%、40.5%~96.2%^[17]。基于人工智能的超声影像组学有可能因其稳定及可重复的优势而提升这种成像模式的诊断能力。

2 基于人工智能的超声影像组学概述

超声影像组学通常是指从超声影像学图像中高通量提取定量、理想化可再现的信息,并对提取的信息进行精准量化分析,在疾病诊断、疗效预测和远期预后评估等方面为临床提供重要参考^[18, 19]。但传统影像组学有其不足之处:程序自动化和标准化程度低、耗时费力的手动勾画及特征提取步骤繁琐等,这些局限性限制了该技术的临床转化。

为了弥补传统影像组学方法的不足,研究人员提出了基于人工智能的影像组学方法,人工智能可直接将医学图像输入到网络中进行建模,通过对网络各层的计算,提取突出特征,自动学习有助于图像识别和分类的关键信息,揭示具有潜在预后相关性的肿瘤内异质性方面,从而实现高效预测输出^[20]。人工智能由于其快速、准确和可重复的优势,已被广泛应用于图像诊断和预测领域^[21]。基于人工智能的医学数据集在其他肿瘤的临床管理中

也显示出巨大的潜力^[22~25]。

3 术前预测乳腺癌 ALNM 的超声影像组学研究

国内外相关学者致力于开发研究一种术前准确评估 ALN 状况的方法,其中最受关注的当为影像组学结合人工智能无创化评估乳腺癌患者 ALN 的相关研究,部分研究取得重大突破,基于人工智能的超声影像组学也许可为乳腺癌患者提供一种非侵入性的 ALN 术前评估方式,指导临床制定个体化诊疗方案,避免过度治疗,对早期乳腺癌患者:无转移患者可避免任何腋窝手术,低负荷(≤ 2 个)转移患者可有条件地接受 SLNB,高负荷(≥ 3 个)转移患者可省略 SLNB,直接行 ALND^[26, 27]。

3.1 以乳腺癌原发灶为研究对象预测 ALNM 鉴于乳腺癌原发灶的形态特征与患者 ALNM 之间存在高度相关性^[28],通过患者术前原发灶的影像学信息,联合人工智能术前精准预测 ALNM 情况。既往研究^[29~34]开发基于乳腺癌原发灶的超声图像信息的影像组学模型预测患者的 ALNM 状况,为术前精准评估提供有效工具。

3.1.1 基于灰度超声预测 ALNM Zhou 等^[29]基于两家医院共 834 例患者的 1055 张乳腺癌原发灶的灰度超声图像,构建三种卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)模型预测 ALN 是否有转移,结果发现 Inception V3 模型性能最佳,且优于放射科医生,在测试集 A 中的 AUC 为 0.89。该研究提供了一种非侵入性、高效和准确的早期诊断方法,突出了基于原发性乳腺癌超声图像改善淋巴结转移预测的深度学习算法的潜力,为深度学习在乳腺癌管理中的应用提供了有价值的见解,并为未来的临床应用奠定了基础。在肿瘤内部可提取的数据信息基础上, Sun 等^[30]首次尝试通过乳腺超声图像的瘤内和瘤周区域的 CNN 模型来预测乳腺癌的 ALN 状态,为临床提供了新的视角和方法。由于部分患者的腋窝阳性淋巴结能在新辅助化疗(neoadjuvant chemotherapy, NAC)后转为阴性,如果在 NAC 后能准确评估这部分患者的 ALN 状况,可使其豁免不必要的腋窝分期手术。Gu 等^[31]回顾性纳入两家医院共 484 例完成新辅助化疗的乳腺癌患者,基于 NAC 前和 NAC 后的超声图像开发两个深度学习影像组学(deep learning radiomics, DLR)模型,个性化地预测 NAC 后肿瘤病理完全应答和 ALN 状态。研究通过 DLR 模型完全交互融合不同时间点的两个超声图像的信息,确保了高预测性能,以避免无效或过度的治疗而不影响生存,最大限度减少治疗并发症,并改善与癌症相关的预后,以更好地指导临床腋窝管理。

【基金项目】四川省卫生健康委员会普及应用项目(编号:21PJ072);四川省科技厅重点研发项目(编号:2023YFS0263)

△通讯作者

3.1.2 基于超声视频信息预测 ALNM 除了基于有限的静态超声图像信息分析,动态超声视频也能为预测患者的 ALNM 提供有效信息。Li 等^[32]基于三家医院共 320 例患者的 320 个乳腺癌原发灶的动态超声视频,构建 3 种 CNN 模型以提高预测乳腺癌患者 ALNM 的准确性,结果发现 TIN 模型表现最佳,优于超声静态图像深度学习模型,在测试集中的 AUC 为 0.914。研究使用了梯度类激活映射技术来增强模型的可解释性。该研究证实基于超声视频图像的深度学习模型在预测早期乳腺癌患者 ALNM 方面是可行的,并且具有可靠的可解释性。

3.1.3 基于多模态超声预测 ALNM 在乳腺癌患者传统的腋窝管理中,对于前哨淋巴结(sentinel lymph node, SLN)阴性的患者可以豁免 ALND,并由此得以在生活质量上获益。有系列研究^[10~12]已经证实在保证术后辅助治疗的同时,可以豁免腋窝转移低负荷患者的 ALND,基于此,术前如果能识别出这部分患者可以使其豁免不必要的腋窝分期手术。Zheng 等^[33]基于一家医院共 584 例乳腺癌患者原发灶的灰度超声和剪切波弹性成像图像联合临床参数,构建 DLR 模型以术前预测 ALN 的受累程度,研究表明临床参数与 DLR 相结合在区分 ALNM 及转移负荷方面表现出较高的诊断性能,可能为外科腋窝管理提供指导,有望应用于 ALNM 的临床诊断。李文肖等^[34]回顾性收集了 119 个乳腺癌原发病灶的灰度超声特征及 CEUS 特征,建立 Logistic 回归预测模型,探讨灰度超声联合 CEUS 预测乳腺癌 ALNM 的价值。通过建立单因素及多因素回归 Logistic 回归预测模型,发现肿瘤最大径线 >2 cm,增强后有灌注缺损及增强后范围增大是乳腺癌 ALN 发生转移的独立危险因素,且联合上述三种指标预测 ALNM 价值较高,并通过统计学方法验证了模型的有效性,为临床提供了有价值的参考,基于灰度超声及 CEUS 双模态影像组学模型,具有较好的预测 ALNM 的能力,有助于临床医师制定精准化、个体化的治疗方案。

综上所述,基于肿瘤原发灶的超声影像组学在术前评估乳腺癌患者的 ALN 研究中具有巨大的潜力,从基于单一模态图像,到包括瘤内及瘤周区域的有效预测信息,或基于动态超声视频及多时间点的超声图像,再到多模态超声图像联合临床信息,更加全面地为患者的术前评估提供有效预测因子,有助于临床医生确定病情阶段、选择最佳治疗策略和实施个性化医疗。

3.2 以腋窝淋巴结为研究对象预测 ALNM

3.2.1 基于灰度超声预测腋窝淋巴结转移 如前

所述,部分乳腺癌患者在完成 NAC 后,ALN 可实现病理完全缓解(pathologic complete response, pCR),但对于这部分患者的 ALN 状态目前尚无统一的术前评估模型。Zheng 等^[35]基于两家医院共 1220 例乳腺癌患者的 ALN 超声图像,构建并验证患者在接受 NAC 后腋窝淋巴结的 pCR 列线图模型,多因素 logistic 回归分析显示,肿瘤分级、临床淋巴结反应、NAC 方案、肿瘤 pCR、淋巴血管侵袭、肿瘤生物学亚型是 ypN0 的显著独立预测因子,模型在独立测试队列中的 AUC 值为 0.84,显示出良好的预测性能,模型可以用于鉴别 NAC 后腋窝 pCR 概率较高的患者,并可用于提高靶向腋窝清扫的检测效率。

3.2.2 基于多模态超声预测 ALNM 索静峰等^[36]回顾性分析 158 例乳腺癌患者的 161 个 ALNs,利用 SVM 进行淋巴结转移与否的二分类,提取的 35 个影像组学特征在分类性能上达到了较高的水平。这表明弹性成像与灰度超声双模态影像组学定量特征在分类性能上表现良好,有望应用于 ALNM 的临床诊断。这一方法的应用可能会改善乳腺癌患者的治疗策略,减少不必要的手术和并发症,对于早期乳腺癌患者的治疗具有重要意义。

3.3 以乳腺癌原发灶及腋窝淋巴结为研究对象预测 ALNM 虽然目前基于乳腺癌原发灶的超声影像组学在预测 ALNM 的相关研究中取得了不错的进展,但有研究^[37]显示,将 ALN 的判断结果纳入最终预测模型,可达到更优的性能。研究^[38~40]证实了以乳腺癌原发灶及 ALN 为研究对象的超声影像组学模型可有效预测乳腺癌患者的术前 ALNM 状况。

3.3.1 基于灰度超声预测 ALNM NCCN 小组建议,对于 SLN 阳性,但残留非前哨淋巴结(NSLN)转移低风险的患者,可以避免完全性 ALND。如果能有效识别出这类患者,就可以在不影响生存的情况下适当减少过度治疗。Guo 等^[38]纳入两家医院共 937 例符合条件的乳腺癌患者,基于乳腺原发灶及 ALN 的灰度超声图像,开发一种基于超声图像的深度学习影像组学模型(DLRU),用于预测 SLN 和 NSLN 的转移风险。发现 DLRU 在识别 SLN 和 NSLN 转移的患者方面表现出较好性能,在测试集中敏感性均达到 98.4%,并且能够将无转移的患者准确划分为低风险组和高风险组,具有较高的阴性预测值。此外,与目前的临床管理相比,DLRU 适当地将整个研究队列中 51% 的过度治疗患者分配到低风险组,可能避免了这部分患者的过度治疗。DLRU 的表现表明,它作为一种简单的术前工具,也许能促进乳腺癌患者的个体化腋窝管理,有助于避免对某些患者进行过度治疗。Liu 等^[39]在深度学习

影像组学提取的乳腺原发灶及 ALN 灰度超声特征的基础上,加入了独立的临床病理参数,开发并验证了一种基于深度学习的影像组学列线图(DLRN),用于术前评估新诊断的单灶性乳腺癌患者的 ALNM 状态。模型在外部验证队列中均展现了良好的性能,其 AUC 值分别为 0.914、0.929 和 0.952,证实 DLRN 有潜力指导乳腺癌患者的适当腋窝管理,为非侵入性识别淋巴结转移和指导临床决策提供了潜在的方法,避免患者的腋窝过度治疗。

3.3.2 基于多模态超声预测 ALNM 多模态影像能为构建预测模型提供更全面的信息,且能提高模型准确性及更好的实现个性化特征评估。Zhang 等^[40]回顾性分析了 120 例乳腺癌患者,评估灰度超声、超声弹性成像及经皮 CEUS 以及这三种超声模式联合使用在预测乳腺癌患者腋窝淋巴结转移风险中的临床价值。三种超声模式的联合使用在区分转移性和非转移性 ALNs 方面表现更优,均优于单独使用单一模式预测转移性淋巴结。这种联合策略可能帮助医生确定最合适的 ALN 手术方法以及乳腺癌 IDC 的预后,为临床决策提供了有价值的参考。

4 小结与展望

目前的研究表明基于乳腺癌患者术前的肿瘤原发灶或 ALN 的灰度超声及多模态超声影像学联合临床病理信息及分子分型等,超声影像组学模型可以较全面、无创和有效预测早期乳腺癌患者的 ALNM 及转移负荷,并评估患者的远期预后,通过模型的有效术前评估,也许可以使部分满足条件的患者豁免不必要的腋窝分期手术。考虑到乳腺癌的高发病率,如果将这些研究成果应用于临床,指导临床进行个体化的多学科决策,基于可靠数据以确定哪些患者可能在不影响术后治疗计划的情况下省略腋窝手术,将这些数据纳入未来的指导方针可能会大幅降低医疗保健成本。

值得注意的是,目前的人工智能超声影像组学主要是单一模式、回顾性研究,忽视了更广泛的临床背景及真实世界的复杂性,人工智能模型真正走向临床需要大数据多模式的融合,以提取和整合不同模式之间的互补信息,促进更优的临床决策,为模型应用于临床奠定坚实的基础。且目前的研究没有前瞻性地验证满足条件的患者豁免腋窝手术的远期预后,而这是人工智能模型真正应用于临床不可缺少的关键点。由于缺乏图像获取、有效特征提取及特征分析等标准和数据共享系统,影像组学方法在临床实践中的应用仍存在一定困难;基于人工智能生成大模型过程中的“黑匣子”问题,在临

床实践中面临着模型可解释性的挑战;人工智能预测模型应用于临床面临相关法规和伦理道德问题等。在此基础上,未来需要有基于多中心、大样本的前瞻性研究来进一步构建精准、完善的评估体系,以确保技术可得到持续改进和优化,标准化控制影像组学流程及纳入新的逻辑框架来提高模型可解释性,克服重重困难和挑战让模型走出实验室,真正应用于临床,联合临床决策支持系统,为乳腺癌患者提供术前精准腋窝淋巴结分期,以实现更高效的诊疗一体化服务。

【参考文献】

- [1] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA: a Cancer Journal for Clinicians, 2024, 74(3): 229-263.
- [2] Danko ME, Bennett KM, Zhai J, et al. Improved staging in node-positive breast cancer patients using lymph node ratio: results in 1,788 patients with long-term follow-up [J]. J Am Coll Surg, 2010, 210(5): 797-805.
- [3] Li Z, Kitajima K, Hirata K, et al. Preliminary study of AI-assisted diagnosis using FDG-PET/CT for axillary lymph node metastasis in patients with breast cancer [J]. EJNMMI Research, 2021, 11: 1-10.
- [4] Chung HL, Le-Petross HT, Leung JW. Imaging updates to breast cancer lymph node management [J]. Radiographics, 2021, 41(5): 1283-1299.
- [5] Kim T, Giuliano AE, Lyman GH. Lymphatic mapping and sentinel lymph node biopsy in early-stage breast carcinoma: a metaanalysis [J]. Cancer, 2006, 106(1): 4-16.
- [6] Krag DN, Anderson SJ, Julian TB, et al. Technical outcomes of sentinel-lymph-node resection and conventional axillary-lymph-node dissection in patients with clinically node-negative breast cancer: results from the NSABP B-32 randomised phase III trial [J]. Lancet Oncol, 2007, 8(10): 881-888.
- [7] Heerdt AS. Lymphatic mapping and sentinel lymph node biopsy for breast cancer [J]. JAMA Oncology, 2018, 4(3): 431-431.
- [8] Gentilini OD, Botteri E, Sangalli C, et al. Sentinel lymph node biopsy vs no axillary surgery in patients with small breast cancer and negative results on ultrasonography of axillary lymph nodes: the SOUND randomized clinical trial [J]. JAMA Oncology, 2023, 9(11): 1557-1564.
- [9] Agresti R, Martelli G, Sandri M, et al. Axillary lymph node dissection versus no dissection in patients with T1N0 breast cancer: a randomized clinical trial (INT09/98) [J]. Cancer, 2014, 120(6): 885-893.
- [10] Giuliano AE, Ballman KV, McCall L, et al. Effect of axillary dissection vs no axillary dissection on 10-year overall survival among women with invasive breast cancer and sentinel node metastasis: the ACOSOG Z0011 (Alliance) randomized clinical trial [J]. JAMA, 2017, 318(10): 918-926.
- [11] Bartels SA, Donker M, Poncet C, et al. Radiotherapy or surgery of

- the axilla after a positive sentinel node in breast cancer; 10-year results of the randomized controlled EORTC 10981-22023 AMAROS trial [J]. *J Clin Oncol*, 2023, 41(12): 2159-2165.
- [12] de Boniface J, Filtenborg Tvedskov T, Rydén L, et al. Omitting axillary dissection in breast cancer with sentinel-node metastases [J]. *N Engl J Med*, 2024, 390(13): 1163-1175.
- [13] Marino MA, Avendano D, Zapata P, et al. Lymph Node Imaging in Patients with Primary Breast Cancer: Concurrent Diagnostic Tools [J]. *The Oncologist*, 2020, 25(2): e231-e242.
- [14] Lee SH, Chung J, Choi HY, et al. Evaluation of screening US-detected breast masses by combined use of elastography and color Doppler US with B-mode US in women with dense breasts: a multicenter prospective study [J]. *Radiology*, 2017, 285(2): 660-669.
- [15] Gao LY, Gu Y, Xu W, et al. Can combined screening of ultrasound and elastography improve breast cancer identification compared with MRI in women with dense breasts-a multicenter prospective study [J]. *Journal of Cancer*, 2020, 11(13): 3903.
- [16] Kilic F, Velidedeoglu M, Ozturk T, et al. Ex vivo assessment of sentinel lymph nodes in breast cancer using shear wave elastography [J]. *J Ultrasound Med*, 2016, 35(2): 271-277.
- [17] Chen C, Qin Y, Chen H, et al. A meta-analysis of the diagnostic performance of machine learning-based MRI in the prediction of axillary lymph node metastasis in breast cancer patients [J]. *Insights into Imaging*, 2021, 12(1): 156.
- [18] Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics [J]. *Journal of Nuclear Medicine*, 2020, 61(4): 488-495.
- [19] Lambin P, Leijenaar RT, Deist TM, et al. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine [J]. *J Ultrasound Med*, 2017, 14(12): 749-762.
- [20] Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, et al. A survey on deep learning in medical image analysis [J]. *Medical Image Analysis*, 2017, 42: 60-88.
- [21] Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, et al. Artificial intelligence in radiology [J]. *Nature Reviews Cancer*, 2018, 18(8): 500-510.
- [22] Chen RJ, Lu MY, Williamson DF, et al. Pan-cancer integrative histology-genomic analysis via multimodal deep learning [J]. *Cancer Cell*, 2022, 40(8): 865-878.
- [23] Zeng Q, Klein C, Caruso S, et al. Artificial intelligence predicts immune and inflammatory gene signatures directly from hepatocellular carcinoma histology [J]. *Journal of Hepatology*, 2022, 77(1): 116-127.
- [24] Fu S, Lai H, Li Q, et al. Multi-task deep learning network to predict future macrovascular invasion in hepatocellular carcinoma [J]. *EClinical Medicine*, 2021, 42: 101201.
- [25] Prelaj A, Miskovic V, Zanitti M, et al. Artificial intelligence for predictive biomarker discovery in immuno-oncology: a systematic review [J]. *Annals of Oncology*, 2023, 35(1): 29-65.
- [26] Krag DN, Anderson SJ, Julian TB, et al. Sentinel-lymph-node resection compared with conventional axillary-lymph-node dissection in clinically node-negative patients with breast cancer: overall survival findings from the NSABP B-32 randomised phase 3 trial [J]. *The Lancet Oncology*, 2010, 11(10): 927-933.
- [27] de Boniface J, Frisell J, Andersson Y, et al. Survival and axillary recurrence following sentinel node-positive breast cancer without completion axillary lymph node dissection: the randomized controlled SENOMAC trial [J]. *BMC Cancer*, 2017, 17: 1-7.
- [28] Fung AD, Collins JA, Campassi C, et al. Performance characteristics of ultrasound-guided fine-needle aspiration of axillary lymph nodes for metastatic breast cancer employing rapid on site evaluation of adequacy: analysis of 136 cases and review of the literature [J]. *Cancer Cytopathology*, 2014, 122(4): 282-291.
- [29] Zhou LQ, Wu XL, Huang SY, et al. Lymph node metastasis prediction from primary breast cancer US images using deep learning [J]. *Radiology*, 2020, 294(1): 19-28.
- [30] Sun Q, Lin X, Zhao Y, et al. Deep learning vs. radiomics for predicting axillary lymph node metastasis of breast cancer using ultrasound images: don't forget the peritumoral region [J]. *Frontiers in Oncology*, 2020, 10: 53.
- [31] Gu J, Tong T, Xu D, et al. Deep learning radiomics of ultrasonography for comprehensively predicting tumor and axillary lymph node status after neoadjuvant chemotherapy in breast cancer patients: A multicenter study [J]. *Cancer*, 2023, 129(3): 356-366.
- [32] Li WB, Du ZC, Liu YJ, et al. Prediction of axillary lymph node metastasis in early breast cancer patients with ultrasonic videos based deep learning [J]. *Frontiers in Oncology*, 2023, 13: 1219838.
- [33] Zheng X, Yao Z, Huang Y, et al. Deep learning radiomics can predict axillary lymph node status in early-stage breast cancer [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1236.
- [34] 李文肖, 刘燕, 曹春莉, 等. 常规超声联合超声造影预测乳腺癌腋窝淋巴结转移的价值 [J]. *实用医学杂志*, 2022, 38(18): 2272-2278.
- [35] Zheng Q, Yan H, He Y, et al. An ultrasound-based nomogram for predicting axillary node pathologic complete response after neoadjuvant chemotherapy in breast cancer: Modeling and external validation [J]. *Cancer*, 2024, 130(S8): 1513-1523.
- [36] 索静峰, 张麒, 常婉英, 等. 依托弹性与 B 型双模态超声影像组学的腋窝淋巴结转移评价 [J]. *中国医疗器械杂志*, 2017, 41(5): 313-316.
- [37] Fong W, Tan L, Tan C, et al. Predicting the risk of axillary lymph node metastasis in early breast cancer patients based on ultrasonographic-clinicopathologic features and the use of nomograms: a prospective single-center observational study [J]. *European Radiology*, 2022, 32(12): 8200-8212.
- [38] Guo X, Liu Z, Sun C, et al. Deep learning radiomics of ultrasonography: Identifying the risk of axillary non-sentinel lymph node involvement in primary breast cancer [J]. *EBio Medicine*, 2020, 60: 103018.
- [39] Liu H, Zou L, Xu N, et al. Deep learning radiomics based prediction of axillary lymph node metastasis in breast cancer [J]. *NPJ Breast Cancer*, 2024, 10(1): 22.
- [40] Zhang Q, Agyekum EA, Zhu L, et al. Clinical value of three combined Ultrasonography modalities in predicting the risk of metastasis to axillary lymph nodes in breast invasive ductal carcinoma [J]. *Frontiers in Oncology*, 2021, 11: 715097.

(收稿日期:2024-11-15;修回日期:2025-02-10)

(本文编辑:侯晓林)