

基于超声的人工智能在甲状腺癌诊疗中的应用现状与未来展望

李芳轩¹, 王 数^{2*}, 易天翔^{3*}

¹山东大学校医院影像科, 山东 济南

²大连大学附属中山医院急诊医学科, 辽宁 大连

³娄底市中心医院血液内科, 湖南 娄底

收稿日期: 2026年7月18日; 录用日期: 2026年8月11日; 发布日期: 2026年8月24日

摘 要

甲状腺癌是内分泌系统最常见的恶性肿瘤, 近年来发病率呈逐年上升趋势, 早期诊断和治疗对改善患者预后至关重要。超声检查在甲状腺癌的诊断、分期、危险分层及治疗中发挥着重要作用。然而, 超声图像的分析高度依赖于医生的能力和经验, 医生对图像的解读容易受到自身主观性和工作量大小的影响。人工智能是一门模拟和扩展人类智能的技术科学, 越来越多的AI产品被应用于甲状腺癌超声诊断领域。本文综述了基于超声的AI技术在甲状腺癌诊疗全过程中的研究进展, 探讨了目前AI技术的优势与不足, 并展望了其未来的发展方向。

关键词

甲状腺癌, 超声诊断, 人工智能, 综述

Application Status and Future Prospects of Ultrasound-Based Artificial Intelligence in the Diagnosis and Treatment of Thyroid Cancer

Fangxuan Li¹, Shuo Wang^{2*}, Tianxiang Yi^{3*}

¹Department of Radiology, Shandong University Hospital, Jinan Shandong

²Department of Emergency, The Affiliated Zhong Shan Hospital of Dalian University, Dalian Liaoning

³Department of Hematology, Loudi Central Hospital, Loudi Hunan

*通讯作者。

文章引用: 李芳轩, 王数, 易天翔. 基于超声的人工智能在甲状腺癌诊疗中的应用现状与未来展望[J]. 临床个性化医学, 2026, 5(4): 450-458. DOI: 10.12677/jcpm.2026.54270

Received: July 18, 2026; accepted: August 11, 2026; published: August 24, 2026

Abstract

Thyroid cancer is the most common malignant tumor of the endocrine system, and its incidence has been increasing year by year in recent years. Early diagnosis and treatment are essential to improve the prognosis of patients. Ultrasonography plays an important role in the diagnosis, staging, risk stratification and treatment of thyroid cancer. However, the analysis of ultrasound images is highly dependent on the ability and experience of doctors, whose interpretation of images is easily affected by their own subjectivity and workload. Artificial intelligence is a technical science that simulates and extends human intelligence. More and more AI products have been applied in the field of thyroid nodule ultrasound diagnosis. This article reviews the research progress of ultrasound-based AI technology in the diagnosis and treatment of thyroid cancer, discusses the advantages and disadvantages of current AI technology, and looks forward to its future development direction.

Keywords

Thyroid Cancer, Ultrasound Diagnosis, Artificial Intelligence, Review

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

甲状腺癌是全球增长最快的内分泌恶性肿瘤之一[1]。据统计,2022年亚洲的甲状腺癌病例及相关死亡人数分别占全球的72.7%和61.3%,其中中国是新增和死亡病例绝对数量最多的国家[2],因此甲状腺癌的精准诊疗就显得尤为重要。高频超声具有无创便捷,实时动态和高分辨率的优势,是评估甲状腺癌的首选方法,可用于肿瘤筛查、术前评估以及术后随访[3]。但超声检查依赖操作医师的主观经验,诊断的准确度易受医师年资高低和医疗资源水平的影响[4]。甲状腺成像报告和数据系统(Thyroid Imaging Reporting And Data System, TI-RADS)的发布提供了一套相对客观标准的语言模板和风险分层依据,但实际应用中仍存在诊断不统一、恶性率跨度过大,部分甲状腺癌缺乏典型的恶性声学特征等问题。细针穿刺活检(Fine Needle Aspiration Biopsy, FNAB)可在术前获得病理学信息,但其属于侵入性检查,也存在非诊断性结果偏高以及采样误差导致假阴性等的弊端[5][6]。为突破上述困境,研究者们将飞速发展的人工智能(Artificial Intelligence, AI)与甲状腺超声影像结合起来进行了各种尝试。从图像识别、临床决策到疗效评估,AI以前所未有的深度和广度融入了甲状腺癌的临床管理全链条。本文旨在总结基于超声影像的AI技术在甲状腺癌诊疗领域的应用进展,探讨其面临的机遇与挑战。

2. AI 概述

AI是应用计算机系统模拟人类认知过程的技术,通过将超声图像转换为可量化数据来构建医学诊断模型,为临床决策提供支持[7]。超声人工智能诊断系统常用的两种算法是传统机器学习(Machine Learning, ML)和深度学习(Deep Learning, DL)。通常不涉及神经网络的算法被归类为ML,例如决策树、梯度增强和支持向量机等[8]。ML包括监督学习和无监督学习,两者的核心区别在于数据是否有对应的标签,即标准答案。监督学习使用带标签数据训练,目标是建立输入到输出的映射,用于分类与回归;无监督学

习使用无标签数据,旨在发现数据的内在结构和联系,用于聚类与降维[9]。DL 由人工神经网络发展而来,模拟人脑神经结构的层级排列,逐步从输入数据中提取更高层次特征,并进行非线性映射。DL 的特点在于能够避免人工干预,实现诊断自动化,弥补了 ML 依赖医师专业领域知识以及图像信息丢失严重的不足[10]。

近年来的研究暂无本质区别于 ML 和 DL 的全新算法产生,创新点更多是“应用范式”和“架构组合”的变革,但仍有一些值得关注的亮点。构建准确模型通常需要大量训练数据支撑,但受某些病理类型发病率低和超声图像采集参数不固定等因素限制,收集足量的标准图像并不容易。Atri H 等人提出了一种利用改进的辅助分类生成对抗网络(Auxiliary Classifier Generative Adversarial Network, ACGAN)从有限数据生成合成图像的新方法。从 198 张甲状腺结节超声图中学习并生成高质量的合成图像,证实 ACGAN 能够在小样本条件下通过生成逼真合成图像来增强数据集[11]。Prochazka A 团队则是利用稳定扩散模型生成合成甲状腺结节图像,并将其嵌入真实超声背景中,用以补充数据集并训练分割模型,显著提升了不同的机构、设备以及操作员采集的甲状腺结节分割数据集的稳健性[12]。早期研究通常勾画结节本身作为感兴趣区,存在忽略周边组织信息的不足,但 Sujini G N 团队的研究表明视觉变换器(Vision Transformer, ViT)可以通过自注意机制实现对超声图像全局上下文信息的建模,相较于依赖局部感受野的 DL,其在捕捉结节与周边组织或淋巴结的空间关系上更具优势[13]。此外,在对超声原始图像的分析上,也从仅支持静态单帧图像的分析向利用动态视频建模延伸,例如 Ni C 等人基于动态视频建立了更符合真实扫查过程的 DL 模型,弥补了静态图像无法覆盖结节全部可疑特征的不足,其中表现最优的 LSTM 模型在外部测试集的受试者工作曲线下面积(Area under the receiver operating characteristic curve, AUC)达到了 0.896,超过两名有 5 年工作经验的超声医师[14]。

3. AI 在辅助甲状腺癌诊断中的应用

3.1. 辅助超声筛查

超声是甲状腺癌首选的检查手段,但传统超声检查尚有许多局限。一是高度依赖操作者的经验,低年资医师的诊断效能明显低于高年资医师[15]。二是我国医疗资源分布不均,不同级别医院之间甲状腺癌超声诊断符合率差异极大[16][17]。而且超声医师也面临着病例量激增、阅片时间压缩等问题,工作疲劳或将增加漏诊误诊的风险[17]。AI 作为一种便捷的数字化手段,可以快速完成自动识别,勾画病灶,超声特征提取及分析等工作,在辅助超声筛查方面具有极大的潜能。首先 AI 能弥补医师经验不足的能力已得到证实,Liu S 团队开发了一款人机协作风险评估模型,并使用来自多中心的 8397 张图像进行训练,最终其在外验证集的 AUC 达到了 0.882,与高年资医师的 0.892 无显著差异,且将低年资医师的 AUC 从 0.789 提升至 0.859 ($P < 0.0001$),灵敏度从 66.11% 提升至 80.00% [18]。临床普遍认为使用传统超声诊断直径小的结节准确率较低,但研究表明 AI 在诊断此类结节上却更具优势,例如 Kim J 等人开发的 AI-Thyroid 模型在直径小于 1.5 厘米的结节中灵敏度高达 98% [19],Guo F 团队也表明 AI-SONIC Thyroid 系统在诊断较小结节(直径 ≤ 25 毫米)方面表现出更高的灵敏度[20],这提示 AI 可能对小结节中更细微的声像学特征具有超越人眼的识别敏感度。同时,AI 的介入还大大节约了诊断时间,将医师纯人工诊断单个结节所需的 2.8~4.5 分钟优化至 AI 辅助下的平均 0.146 秒[20]。由此观之,AI 可以减少诊断的主观性,提高诊断同质化水平,有助于缩小不同经验医师间诊断能力的差距,尤其是在医疗资源匮乏地区很有应用潜力,其时间效率优势也能缓解超声医师的临床工作压力。

3.2. 辅助 TI-RADS 分类

自 2009 年 TI-RADS 框架首次被提出以来,各国纷纷制定了符合本国国情的甲状腺超声诊断分类规

范。TI-RADS 评估结节的纵横比、边界、内部结构、回声、强回声的形态这些超声学特征,通过积分法进行风险分级,再结合结节直径和位置给出相应的随访观察或 FNBA 的建议[21]。TI-RADS 分类虽力求标准化,但仍难以完全消除主观判读对结果的影响,对此研究者引入 AI 进行了尝试,结果表明 AI 辅助下的分类其诊断效能可与高年资医师媲美,且能提高不同医师分类诊断结果间的一致性[22]。还有 TI-RADS 4~5 类结节因其恶性率跨度较大而备受诟病,其影响临床决策的精准管理,且常常增加患者的心理压力。在一项纳入 2082 例超声图像的回顾性分析中,研究者使用 TI-RADS 进行深度学习,在独立测试集中,表现最优的 DL 模型在 4 类、5 类和 4~5 类结节中分别取得了 0.904、0.845 和 0.829 的 AUC [23]。张鑫茹等人的研究也证明基于 Vision-LSTM 模型的 AI 技术可显著提升 TI-RADS 4b 类甲状腺结节的诊断效率和准确性[24]。TI-RADS 虽用于指导 FNBA,但其风险评估效能有限,存在误判可能,为此研究者们进一步探讨了借助 AI 减少不必要 FNBA 的可能性。其中 Zhao C K 团队利用二维超声和剪切波弹性成像构建 ML 辅助的视觉诊断模型,相比单纯依靠 TI-RADS,该 ML 模型在测试数据集中将不必要的 FNAB 率从 37.7%降至 4.7% [25]。而邹颖等人则是进一步聚焦囊实性结节(Partially Cystic Thyroid Nodules, PCTN)进行研究, TI-RADS 通常将 PCTN 定为 2~3 类,但其仍有一定的恶性潜能,该团队筛选出实性成分大于 50%、实性成分与囊性成分呈偏心锐角、以及微钙化等这些恶性相关特征,构建迁移学习 AI 模型评估 PCTN 恶性概率,对于减少不必要的 FNAB 有一定帮助[26]。

3.3. 辅助良恶性鉴别

超声鉴别甲状腺结节良恶性仍存在医师水平参差不齐、特殊病理类型诊断难、甲状腺基础疾病背景干扰等诸多局限性,导致不同医师对图像的判读结果变异大。如何采用无创、高效、可重复的影像方法提升判读一致性与客观性,是优化临床管理的重点。AI 辅助诊断的主要优势在于能够量化超越人类感知的细微图像特征,从而支持实现更客观且可重复的风险分层,在良恶性鉴别方面表现出了较高的准确率[27][28]。Zhu J 等人开发了一套名为 BETNET 的深度卷积神经网络模型,能够准确定位并自动诊断超声图像中的甲状腺结节良恶性,在内部测试集中,其诊断准确率高达 91.33%,明显高于一名经验丰富的影像医生(85.67%),其应用于独立外院影像的 AUC 也达到了 0.970,展示了其在实际临床应用中的巨大潜能[29]。滤泡性甲状腺癌(Follicular Thyroid Carcinoma, FTC)是甲状腺癌中占比低的一种病理类型,因其最终诊断依赖于术后病理学检查判定存在对包膜或血管的侵犯,所以无论是超声还是 FNAB,都难以可靠地在术前鉴别其与滤泡性腺瘤等良性病变, AI 在辅助术前鉴别此类结节良恶性上提供了一些思路。SHEN H 等人纳入了来自中国 11 个中心的 3817 名确诊了滤泡型甲状腺肿瘤患者的超声数据,构建了一种名为 OverLoCK 的 DL 模型,该模型可实现先整体浏览再细致查看并结合上下文分析的功能,其显示恶性肿瘤的预测概率与实际概率之间高度吻合,决策曲线分析评估确认该模型具有临床价值[30]。而 YANG Z 团队开发的 DL 模型 FThyNet 在预测 FTC 方面的 AUC 达到了 0.890,在预测侵袭性 FTC 上更是高达 0.903,远高于超声医师,参数可视化分析发现这与高度侵袭性恶性肿瘤的边缘纹理复杂度最高有关[31], AI 比人眼更能捕捉此类纹理特征。此外,考虑到桥本氏甲状腺炎(Hashimoto's Thyroiditis, HT)导致的甲状腺腺体回声弥漫性改变会干扰结节良恶性判断,研究者也探索了在 HT 背景下适用的 AI 模型,例如 WU F 等人构建了联合影像组学和深度学习的 DLR 模型,能够有效区分 HT 中的良性结节和恶性结节,其在验证队列中的准确性和敏感性分别为 85.7%和 81.8% [32]。

4. AI 在甲状腺癌分期中的应用

4.1. 预测甲状腺癌腺外延伸

甲状腺外延伸(Extrathyroidal Extension, ETE)是决定甲状腺癌 T 分期的关键,术前精准预测 ETE 有助

于合理选择手术方式,无 ETE 患者可保留对侧腺叶,有利于保留甲状腺功能和降低喉返神经喉受损风险[33][34],但是目前传统超声检查对 ETE 的诊断能力不足,报告准确率波动大[35]。Wang X 等人分析传统超声图像,提取与 ETE 相关的影像组学特征,构建了包含影像组学特征、超声学诊断和临床风险因子的逻辑回归模型,在验证队列中的 AUC 达到了 0.824,体现了良好的临床应用价值[36]。Lu W J 团队又在 3D 超声图像方面进行了探索,构建了联合临床预测因子和 3D 超声影像组学的 ML 模型,其中最优的列线图模型预测 ETE 的 AUC 达到了 0.876,超过了超声医师的 0.650[34],这或许与 3D 图像比传统二维图像包含了更多立体空间关系有关。

4.2. 预测颈部淋巴结转移

甲状腺癌中最常见的病理类型是乳头状癌(Papillary Thyroid Carcinoma, PTC),约占甲状腺癌新发病例的 80% [37]。PTC 分化程度高,进展缓慢,但具有典型的亲淋巴性,常发生颈部淋巴结转移。颈部转移最常见于中央区淋巴结(约占 20%~60%),其次是颈侧区淋巴结[38]。颈部淋巴结转移是 PTC 局部复发和预后不良的重要高危因素[39]。超声检查依然是评估 PTC 颈部淋巴结转移的首选,手术清扫是根治颈部淋巴结转移的唯一途径,尽可能准确地术前预测淋巴结转移对于确定清扫区域和预防术后复发至关重要[40]。传统超声识别颈部淋巴结转移的特异性尚可,但灵敏度不足,不易发现隐匿性转移,迫切需要 AI 助力弥补人工检查的不足。一项纳入 706 例 PTC 患者的多中心前瞻性研究中,开发并验证了基于超声视频的深度学习模型 MMD-DL 在术前预测颈部淋巴结转移方面具有出色的性能。该模型在外部验证集中的 AUC 为 0.81,并且在 MMD-DL 辅助下,超声医师的诊断灵敏度从 62%提升至 65%($P < 0.001$) [41]。Peng X 团队针对 cT1N0M0 期的 PTC 患者进行研究,旨在开发一种结合超声和 DL 的 AI 辅助预测模型,以提升隐匿性颈部淋巴结转移的术前识别,从而更准确的风险分层。结果显示,多模态模型优于单模态,决策级融合模型 DLRad_LF_Avg 在外部测试集中的 AUC 达到 0.843,表明该模型可为治疗决策(如射频消融与外科手术)提供客观依据[42]。Yao S 等人则聚焦于甲状腺癌原发灶位置的研究,已知原发灶位置是中央区淋巴结转移的公认预测因素,但如何量化这种关系是一个难题。该研究基于微分同构比对与图形变换器构建 ACE-Net 模型,量化了结节的定位和形态信息,并绘制风险热图,直观展示了中央区淋巴结转移在甲状腺不同区域的风险分布。最终显示 ACE-Net 模型在 6 项外部多中心测试中表现优异(AUC = 0.826),其有效预测中央区淋巴结转移可减少 37.9%的不必要淋巴结清扫,为临床决策提供了宝贵的依据[43]。

5. AI 在甲状腺癌疗效预测中的应用

绝大多数分化型甲状腺癌的预后良好,例如 PTC 经规范手术和 ^{131}I 治疗后,其 10 年生存率可达到 90%左右[44],但一旦有局部复发或远处转移的发生,将会严重损害患者的生存率和生活质量[45],并给患者家庭带来沉重的经济负担。如何术前精准预测治疗反应并提供个体化治疗策略是临床亟待解决的卡点。研究普遍认为 BRAF 基因突变是反映 PTC 侵袭性强的分子表征,是 PTC 复发及预后不良的危险因素[46],使用 AI 评估 PTC 的 BRAF V600E 状态以辅助临床进行危险评估已被证实有一定的效果。2023 年的一项研究基于超声弹性成像的组学特征创建并验证了六种不同的机器学习算法,用于术前预测 PTC 患者的 BRAF V600E 突变,发现突变组与无突变组在结节回声、纵横比以及弹性参数方面存在显著差异,其中支持向量机模型的效果最佳[47]。Yu Y 团队通过将最佳架构网、超声组学特征和临床参数结合,开发了一个集成的 BrafSwinT 模型,其预测 PTC 中 BRAF V600E 状态的能力极佳,在外部测试集中展示了 0.869 的 AUC [48]。此外值得注意的是,现有的 AI 预测 PTC 疗效多是纳入术后临床病理结果构建模型,但 Li Q 团队利用术前超声图像建模证明了非侵入性评估术后疗效的可能,其开发的深度学习影像组学特征(Deep Learning Radiomics Index, DLRI)可独立预测无病生存率并指导后续抗炎治疗[49]。

6. 总结与展望

本文系统阐述了超声检查在甲状腺癌诊疗全流程中的重要性及固有局限性,以及 AI 技术的参与如何弥补了传统超声的不足并拓宽其应用舞台。总体来讲, AI 中和了传统超声主观性强和观察结果不一致的缺点,有助于提升超声医师的诊疗水平,补充相对客观的“第二意见”。但 AI 理论模型距离广泛应用于临床仍有一段距离,不同算法的性能会受研究群体、样本量、训练集特征和参数选择的影响,模型开发时常需要交叉验证和评估比较来选择最适合当前任务的模型,这导致无法得出一种普遍最优的算法,各个训练模型之间异质性大,这限制了其普遍适用性[50]。再就是 AI 模型有黑匣子的特性,包含大量的注释数据集,即复杂冗长又缺乏临床可解释性,如何兼顾 AI 模型识别细微表征的能力和应用时的可解释性是一个挑战。而且前瞻性的研究较少,难以评估 AI 在真实世界中的应用表现。在研究对象方面,髓样甲状腺癌和未分化甲状腺癌等罕见且侵袭性强的亚型对患者的生命安全威胁更大,但因病例数较少,相关研究开展尚不足,或许需要多中心的合作共研,或者利用算法革新增强数据集。在淋巴结转移预测方面,颈侧区淋巴结转移的危害比中央区转移更为严重,希望未来加强针对该区域的 AI 模型的开发。考虑到甲状腺结节声像图会随时间发生变化,比如大小改变,新发恶性征象,良性结节塌缩导致出现“恶性表现”等等,或许可以基于这些声像图变化来建立 AI 随访体系,自动对比本次检查与既往检查图片,协助给出进一步的治疗建议。

此外 AI 技术在甲状腺癌诊疗中应用还面临着许多非技术性障碍,在监管层面,医疗 AI 软件的审批框架尚不成熟,算法迭代与泛化验证尚无统一标准,审批周期或许滞后于技术发展;在数据与伦理层面,患者超声影像及基因组学等敏感信息在训练和云端共享中有泄露风险,如何明确数据所有权以及制定合理的脱敏流程尚无具体规范;在临床整合层面,现有 AI 系统多独立运行,与 PACS 等医院信息系统兼容性不足,与临床决策习惯仍需磨合;在经济评价层面,高昂的软硬件投入缺乏充分的卫生经济学证据支持, AI 介入真正能带来多少经济收益尚不明朗。这些障碍相互交织,亟需多学科协同建立系统性治理框架。

参考文献

- [1] Wang, L., Li, R., Zeng, X. and Zhang, H. (2026) Evaluation and Projection of the Global Burden of Thyroid Cancer from 1990 to 2035: An Analysis Based on the Global Burden of Disease Study. *Thyroid Research*, **19**, 10-25. <https://doi.org/10.1186/s13044-026-00288-5>
- [2] Fu, M., Peng, Z. and Wu, M. (2026) Thyroid Cancer in Asia: Incidence, Mortality in 2022, and Future Projections to 2050. *European Journal of Cancer Prevention*, **35**, 126-140. <https://doi.org/10.1097/cej.0000000000000983>
- [3] 苏艳军. 2025 版《中国肿瘤整合诊治指南(CACA)-甲状腺癌》系统解读[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(5): 867-878.
- [4] Kim, S.H., Park, C.S., Jung, S.L., Kang, B.J., Kim, J.Y., Choi, J.J., *et al.* (2010) Observer Variability and the Performance between Faculties and Residents: US Criteria for Benign and Malignant Thyroid Nodules. *Korean Journal of Radiology*, **11**, 149-155. <https://doi.org/10.3348/kjr.2010.11.2.149>
- [5] Idrees, T., Rashied, A.A. and Kim, B. (2025) Nondiagnostic Fine Needle Aspiration of Thyroid Nodules: Review of Predisposing Factors. *Endocrine Practice*, **31**, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.eprac.2024.09.015>
- [6] Vaghaiwalla, T.M., Henriksen, E.M., Chang, J., Saghira, C. and Lew, J.I. (2025) Reassessing False-Negative Rate and Size Cutoff for Papillary Thyroid Cancer with Fine-Needle Aspiration in Thyroid Nodules. *Surgery*, **186**, Article 109577. <https://doi.org/10.1016/j.surg.2025.109577>
- [7] He, L., Chen, F., Zhou, D., Zhang, Y., Li, Y., *et al.* (2022) A Comparison of the Performances of Artificial Intelligence System and Radiologists in the Ultrasound Diagnosis of Thyroid Nodules. *Current Medical Imaging Formerly Current Medical Imaging Reviews*, **18**, 1369-1377. <https://doi.org/10.2174/1573405618666220422132251>
- [8] Tang, X., Zhou, H., Liu, Y., Gao, S. and Zhou, Y. (2025) Diagnostic Performance of the Ultrasound -Based Artificial Intelligence Diagnostic System in Predicting Cervical Lymph Node Metastasis in Patients with Thyroid Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Science Progress*, **108**, 00368504251346906.

- <https://doi.org/10.1177/00368504251346906>
- [9] Bini, F., Pica, A., Azzimonti, L., Giusti, A., Ruinelli, L., Marinozzi, F., *et al.* (2021) Artificial Intelligence in Thyroid Field—A Comprehensive Review. *Cancers*, **13**, Article 4740. <https://doi.org/10.3390/cancers13194740>
- [10] 刘才广. 医学影像人工智能在甲状腺癌诊疗中的应用: 现状与展望[J]. 中国普通外科杂志, 2024, 33(11): 1874-1882.
- [11] Atri, H., Shadi, M. and Sargolzaei, M. (2023) Generating Synthetic Medical Images with Limited Data Using Auxiliary Classifier Generative Adversarial Network: A Study on Thyroid Ultrasound Images. *Journal of Ultrasound*, **27**, 105-121. <https://doi.org/10.1007/s40477-023-00837-w>
- [12] Prochazka, A. and Zeman, J. (2026) Domain Adaptation of Stable Diffusion for Ultrasound Inpainting: A Synthetic Data Approach for Enhanced Thyroid Nodule Segmentation. *Journal of Biomedical Informatics*, **173**, Article 104963. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2025.104963>
- [13] Sujini, G.N. and Balakrishna, S. (2025) Automated Thyroid Nodule Classification in Ultrasound Imaging Using a Hybrid Vision Transformer and Wasserstein GAN with Gradient Penalty. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 40786. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24651-y>
- [14] Ni, C., Feng, B., Yao, J., Zhou, X., Shen, J., Ou, D., *et al.* (2023) Value of Deep Learning Models Based on Ultrasonic Dynamic Videos for Distinguishing Thyroid Nodules. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article ID: 1066508. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.1066508>
- [15] Kang, S., Lee, E., Chung, C.W., Jang, H.N., Moon, J.H., Shin, Y., *et al.* (2021) A Beneficial Role of Computer-Aided Diagnosis System for Less Experienced Physicians in the Diagnosis of Thyroid Nodule on Ultrasound. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 20448. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99983-6>
- [16] 杨明, 许彩娜, 张宁, 等. 2023-2024 年度河北省甲状腺癌超声诊断符合率现状分析[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2025, 22(9): 846-849.
- [17] Gao, L., Li, J., Niu, Z., Cai, S., Lu, S., Xu, W., *et al.* (2024) How to Improve Diagnostic Accuracy of Thyroid Ultrasounds: A Multicenter Quality Study in China. *NEJM Catalyst*, vol. 5. <https://doi.org/10.1056/cat.24.0362>
- [18] Liu, S., Yang, Y., Cai, M., Xu, Z., He, S., Su, Q., *et al.* (2025) Human-Machine Collaborative Risk Assessment Model for Thyroid Nodules Based on Local Attention and Multi-Scale Feature Extraction: A Multi-Center Clinical Study. *Endocrine*, **89**, 772-780. <https://doi.org/10.1007/s12020-025-04278-9>
- [19] Kim, J., Lee, J., Ha, J., Kwon, O., Baek, K., Song, C.M., *et al.* (2026) Artificial Intelligence-Assisted Risk Stratification of Thyroid Nodules with Atypia of Undetermined Significance. *European Thyroid Journal*, **15**, ETJ250268. <https://doi.org/10.1530/etj-25-0268>
- [20] Guo, F., Chang, W., Zhao, J., Xu, L., Zheng, X. and Guo, J. (2023) Assessment of the Statistical Optimization Strategies and Clinical Evaluation of an Artificial Intelligence-Based Automated Diagnostic System for Thyroid Nodule Screening. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **13**, 695-706. <https://doi.org/10.21037/qims-22-85>
- [21] 中华医学会超声医学分会浅表器官和血管学组, 中国甲状腺与乳腺超声人工智能联盟. 2020 甲状腺结节超声恶性危险分层中国指南: C-TIRADS [J]. 中华超声影像学杂志, 2021, 30(3): 185-200.
- [22] Potipimpanon, P., Charakorn, N. and Hirunwiwatkul, P. (2022) A Comparison of Artificial Intelligence versus Radiologists in the Diagnosis of Thyroid Nodules Using Ultrasonography: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, **279**, 5363-5373. <https://doi.org/10.1007/s00405-022-07436-1>
- [23] Wu, G.G., Lv, W.Z., Yin, R., Xu, J., Yan, Y., Chen, R., *et al.* (2021) Deep Learning Based on ACR TI-RADS Can Improve the Differential Diagnosis of Thyroid Nodules. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article ID: 575166. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.575166>
- [24] 张鑫茹, 李扬, 孙萌, 等. Vision-LSTM 模型在甲状腺影像报告与数据系统 4b 类甲状腺结节超声影像诊断中的应用与评估[J]. 山东大学学报(医学版), 2025, 63(11): 68-74.
- [25] Zhao, C.K., Ren, T.T., Yin, Y.F., Shi, H., Wang, H., Zhou, B., *et al.* (2021) A Comparative Analysis of Two Machine Learning-Based Diagnostic Patterns with Thyroid Imaging Reporting and Data System for Thyroid Nodules: Diagnostic Performance and Unnecessary Biopsy Rate. *Thyroid*, **31**, 470-481. <https://doi.org/10.1089/thy.2020.0305>
- [26] 邹颖. 基于超声的迁移学习人工智能模型对甲状腺囊实性结节恶性概率的评估效能[J]. 实用医学杂志, 2025, 41(6): 889-895.
- [27] Gatta, E., Gatta, R., Morandi, R., Isoli, S., Corvaglia, S., Vetrugno, S., *et al.* (2026) Machine Learning for Diagnosis of Malignant Thyroid Nodules Based on Thyroid Ultrasound: Systematic Review and Meta-Analysis of Studies with External Datasets. *European Journal of Radiology Open*, **16**, Article 100716. <https://doi.org/10.1016/j.ejro.2025.100716>
- [28] Jin, Z., Zhu, Y., Zhang, S., Xie, F., Zhang, M., Zhang, Y., *et al.* (2020) Ultrasound Computer-Aided Diagnosis (CAD)

- Based on the Thyroid Imaging Reporting and Data System (TI-RADS) to Distinguish Benign from Malignant Thyroid Nodules and the Diagnostic Performance of Radiologists with Different Diagnostic Experience. *Medical Science Monitor*, **26**, e918452. <https://doi.org/10.12659/msm.918452>
- [29] Zhu, J., Zhang, S., Yu, R., Liu, Z., Gao, H., Yue, B., *et al.* (2021) An Efficient Deep Convolutional Neural Network Model for Visual Localization and Automatic Diagnosis of Thyroid Nodules on Ultrasound Images. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **11**, 1368-1380. <https://doi.org/10.21037/qims-20-538>
- [30] Shen, H., Pei, S., Huang, Y., Wu, S., Zhang, C., Liang, T., *et al.* (2025) Artificial Intelligence-Augmented Ultrasound Diagnosis of Follicular-Patterned Thyroid Neoplasms: A Multicenter Retrospective Study. *eClinicalMedicine*, **86**, Article 103351. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2025.103351>
- [31] Yang, Z., Yao, S., Heng, Y., Shen, P., Lv, T., Feng, S., *et al.* (2023) Automated Diagnosis and Management of Follicular Thyroid Nodules Based on the Devised Small-Dataset Interpretable Foreground Optimization Network Deep Learning: A Multicenter Diagnostic Study. *International Journal of Surgery*, **109**, 2732-2741. <https://doi.org/10.1097/js9.000000000000506>
- [32] Wu, F., Pan, T., Huang, X., Huang, K., Shi, J., Mao, L., *et al.* (2025) Revolutionizing Thyroid Nodule Diagnosis in Hashimoto's Thyroiditis: AI-Driven Radiomics and Deep Learning Model. *International Journal of Surgery*, **112**, 10157-10171. <https://doi.org/10.1097/js9.0000000000004546>
- [33] Song, R., Kim, H.S. and Kang, K.H. (2022) Minimal Extrathyroidal Extension Is Associated with Lymph Node Metastasis in Single Papillary Thyroid Microcarcinoma: A Retrospective Analysis of 814 Patients. *World Journal of Surgical Oncology*, **20**, 170-175. <https://doi.org/10.1186/s12957-022-02629-8>
- [34] Lu, W.J., Qiu, Y.R., Wu, Y.W., *et al.* (2022) Radiomics Based on Two-Dimensional and Three-Dimensional Ultrasound for Extrathyroidal Extension Feature Prediction in Papillary Thyroid Carcinoma. *Acta Endocrinologica (Bucharest)*, **18**, 407-416. <https://doi.org/10.4183/aeb.2022.407>
- [35] Chen, L., Chen, L., Liang, Z., Shao, Y., Sun, X. and Liu, J. (2022) Value of Contrast-Enhanced Ultrasound in the Pre-operative Evaluation of Papillary Thyroid Carcinoma Invasiveness. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article ID: 795302. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.795302>
- [36] Wang, X., Agyekum, E.A., Ren, Y., Zhang, J., Zhang, Q., Sun, H., *et al.* (2021) A Radiomic Nomogram for the Ultrasound-Based Evaluation of Extrathyroidal Extension in Papillary Thyroid Carcinoma. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article ID: 625646. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.625646>
- [37] Carnazza, M., Quaranto, D., DeSouza, N., Moscatello, A.L., Garber, D., Hemmerdinger, S., *et al.* (2025) The Current Understanding of the Molecular Pathogenesis of Papillary Thyroid Cancer. *International Journal of Molecular Sciences*, **26**, Article 4646. <https://doi.org/10.3390/ijms26104646>
- [38] Yang, Q., Cheng, W., Liang, Q. and Yan, L. (2025) Case Report: A Case of Micropapillary Thyroid Carcinoma with Level I Cervical Lymph Node Metastasis. *Frontiers in Oncology*, **15**, Article ID: 1650616. <https://doi.org/10.3389/fonc.2025.1650616>
- [39] Yu, K., Wu, X., Dai, L., Le, Q., Xie, Y., Wang, Y., *et al.* (2024) Risk Factors Associated with Lymph Node Metastasis in Papillary Thyroid Cancer: A Retrospective Analysis Based on 2,428 Cases. *Frontiers in Oncology*, **14**, Article ID: 1473858. <https://doi.org/10.3389/fonc.2024.1473858>
- [40] 甲状腺癌诊疗指南(2022 年版) [J]. 中国实用外科杂志, 2022, 42(12): 1343-1357+1363.
- [41] Zhang, M.B., Meng, Z.L., Mao, Y., Jiang, X., Xu, N., Xu, Q., *et al.* (2024) Cervical Lymph Node Metastasis Prediction from Papillary Thyroid Carcinoma US Videos: A Prospective Multicenter Study. *BMC Medicine*, **22**, 153-165. <https://doi.org/10.1186/s12916-024-03367-2>
- [42] Peng, X., Wu, P., Li, W., Ou-Yang, T., Tang, S.C., Zhou, S., *et al.* (2025) AI-Based Multimodal Prediction of Lymph Node Metastasis and Capsular Invasion in Ctn0m0 Papillary Thyroid Carcinoma. *Frontiers in Endocrinology*, **16**, Article ID: 1580885. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1580885>
- [43] Yao, S., Shen, P., Dai, F., Deng, L., Qiu, X., Zhao, Y., *et al.* (2024) Thyroid Cancer Central Lymph Node Metastasis Risk Stratification Based on Homogeneous Positioning Deep Learning. *Research*, **7**, Article ID: 0432. <https://doi.org/10.34133/research.0432>
- [44] 狄子臣, 武新宇, 汤敏敏, 等. 首次 131I 治疗后生化持续异常甲状腺乳头状癌患者结构性复发的影响因素[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2026, 40(5): 448-453.
- [45] Otsuki, N., Shimoda, H., Morita, N., Furukawa, T., Teshima, M., Shinomiya, H., *et al.* (2020) Salvage Surgery for Structural Local Recurrence of Papillary Thyroid Cancer: Recurrence Patterns and Surgical Outcome. *Endocrine Journal*, **67**, 949-956. <https://doi.org/10.1507/endocrj.ej20-0152>
- [46] 刘志艳, 赵一蔚. 远处转移性甲状腺乳头状癌分子病理特征[J]. 中国实用外科杂志, 2024, 44(6): 640-644.
- [47] Agyekum, E.A., Wang, Y., Xu, F., Akortia, D., Ren, Y., Chambers, K.H., *et al.* (2023) Predicting BRAFV600E

-
- Mutations in Papillary Thyroid Carcinoma Using Six Machine Learning Algorithms Based on Ultrasound Elastography. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 12604. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39747-6>
- [48] Yu, Y., Zhao, C., Guo, R., Zhang, Y., Li, X., Liu, N., *et al.* (2025) Deep Learning Model Based on Ultrasound Images Predicts BRAF V600E Mutation in Papillary Thyroid Carcinoma. *iScience*, **28**, Article 112482. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112482>
- [49] Li, Q., Zhang, W., Liao, T., Gao, Y., Zhang, Y., Jin, A., *et al.* (2025) An Artificial Intelligence-Driven Preoperative Radiomic Subtype for Predicting the Prognosis and Treatment Response of Patients with Papillary Thyroid Carcinoma. *Clinical Cancer Research*, **31**, 139-150. <https://doi.org/10.1158/1078-0432.ccr-24-2356>
- [50] Wang, X., Qi, Y., Zhang, X., Liu, F. and Li, J. (2025) Ultrasound-Based Artificial Intelligence for Predicting Cervical Lymph Node Metastasis in Papillary Thyroid Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Endocrinology*, **16**, Article ID: 1570811. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1570811>