

深度学习在宫颈癌诊疗中的研究进展

王倩¹, 王斌^{2*}

¹内蒙古民族大学第二临床医学院, 内蒙古 呼伦贝尔

²内蒙古林业总医院医学影像中心, 内蒙古 呼伦贝尔

收稿日期: 2026年2月28日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年3月31日

摘要

宫颈癌是全球女性健康的主要威胁之一, 其早期诊断和精准治疗是改善预后的关键。近年来, 深度学习技术凭借其强大的特征提取与模式识别能力在宫颈癌诊疗的多个关键环节展现出重要价值。本文综述了深度学习在宫颈癌筛查、病理诊断、影像分析、治疗规划及预后预测等方面的研究进展, 重点分析了卷积神经网络、Transformer及其混合模型在细胞学、组织病理学及多模态医学影像中的关键应用, 涵盖了从弱监督学习到多模态融合等多种技术策略。同时, 本文也探讨了当前模型面临的数据异质性、临床可解释性及前瞻性验证不足等核心挑战, 并对未来发展方向进行了展望, 通过算法优化与临床需求的深度融合, 深度学习正持续推动宫颈癌诊疗向自动化、个性化和精准化迈进。

关键词

深度学习, 宫颈癌, 图像分析, 预后预测, 放射治疗规划

Research Progress of Deep Learning in the Diagnosis and Treatment of Cervical Cancer

Qian Wang¹, Bin Wang^{2*}

¹The Second Clinical Medical College of Inner Mongolia Minzu University, Hulun Buir Inner Mongolia

²Medical Imaging Center, Inner Mongolia Forestry General Hospital, Hulun Buir Inner Mongolia

Received: February 28, 2026; accepted: March 23, 2026; published: March 31, 2026

Abstract

Cervical cancer is one of the major threats to women's health worldwide, and its early diagnosis and precise treatment are key to improving prognosis. In recent years, deep learning technology has

*通讯作者。

文章引用: 王倩, 王斌. 深度学习在宫颈癌诊疗中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 420-428.

DOI: 10.12677/acm.2026.1641264

demonstrated significant value in multiple key aspects of cervical cancer diagnosis and treatment due to its powerful feature extraction and pattern recognition capabilities. This article reviews the research progress of deep learning in cervical cancer screening, pathological diagnosis, image analysis, treatment planning, and prognosis prediction, with a focus on analyzing the key applications of Convolutional Neural Networks (CNN), Transformer, and their hybrid models in cytology, histopathology, and multimodal medical imaging, covering various technical strategies from weakly supervised learning to multimodal fusion. At the same time, this article also discusses the core challenges currently faced by models, such as data heterogeneity, clinical interpretability, and insufficient prospective validation, and looks forward to future development directions. Through the deep integration of algorithm optimization and clinical needs, deep learning is continuously advancing the diagnosis and treatment of cervical cancer towards automation, individualization, and precision.

Keywords

Deep Learning, Cervical Cancer, Image Analysis, Prognosis Prediction, Radiotherapy Planning

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

宫颈癌是全球女性第四大常见恶性肿瘤,其发病率和死亡率在资源匮乏地区尤甚[1]。传统筛查和诊断方法如巴氏涂片、HPV检测、阴道镜检查及病理学评估都高度依赖专科医生经验,普遍存在主观性强、效率偏低及医疗资源分配不均等问题[2]。近年来,深度学习作为人工智能的核心分支,凭借其强大的特征自动提取与复杂模式识别能力,实现病变的自动分析与识别[3]。在早期筛查与诊断中,针对细胞学或病理全切片图像(WSI)的深度学习系统表现突出。例如,深度卷积神经网络对细胞学图像的分析准确率可达97.5% [4],全片图像级筛查的准确率也超过91% [5],并能有效降低不必要的阴道镜转诊率[6]。在阴道镜影像分析中,深度学习模型对病变检测的准确率高达99.44% [7],分级准确率超过96% [8],而结合拉曼光谱技术还能实现组织类型的高精度区分[9]。在治疗环节,深度学习主要应用于放射治疗的自动靶区勾画和预测剂量,基于MRI和CT的自动分割方法能够快速、准确地完成任务(Dice相似系数可达0.85),极大地减轻了物理师或放疗医生的负担[10] [11]。剂量预测模型则能为个性化治疗计划的制定提供实时、高效的决策支持[12] [13]。在预后评估与个性化治疗方面,通过整合病理图像、临床信息及分子数据,深度学习模型能够有效预测患者生存期(C-index达0.83)和免疫治疗疗效(AUC值达0.935)。综上所述,深度学习技术正在深刻变革宫颈癌的诊疗模式,推动其向自动化、个性化和精准化方向发展[14]-[16]。本文旨在系统综述深度学习在宫颈癌筛查、诊断、分子分型、治疗规划及预后预测等关键环节的最新研究进展,在此基础上,梳理不同深度学习模型在提升筛查敏感性、诊断特异性及预后预测精度等临床核心问题上的策略与局限,进而审视从算法性能到临床效用评估过程中存在的障碍与可行路径,以期为该领域的进一步研究提供参考。

2. 深度学习在宫颈癌筛查与细胞学诊断中的应用

宫颈癌的早期筛查与诊断,主要依靠细胞学检查(如巴氏涂片、液基细胞学)和阴道镜检查。深度学习在这两个方面都取得了一系列进展,其应用策略也从最初直接使用通用模型,发展到针对医学图像特点进行专门的定制化设计。

在宫颈细胞学图像分析方面,深度学习已能有效处理从单个细胞到全切片图像的不同层次分析任务。例如, Sompawong 等[5]的研究表明实例分割网络 Mask R-CNN 可精准定位并分割巴氏涂片中的单个细胞核,即使在含有白细胞等杂质的复杂背景下,全片图像筛查仍能实现 91.7%的准确率、敏感性与特异性,展现了较好的鲁棒性。面对包含海量数据的全切片图像,高效的分析流程至关重要, Chauhan 等[17]模型的深度特征在公开数据集 SIPakMeD 的五分类任务中取得了 97.45%的准确率。多项证据表明深度学习模型对液基细胞学全切片图像的分类效能(ROC AUC 可达 0.89~0.96)已接近专家水平[18],这一性能在国内研究中亦得到验证,李雪等[19]开展的一项基于千例样本的实证研究表明人工智能系统辅助宫颈液基薄层细胞学检查能够实现 100%的灵敏度与 90.68%的特异性,有效减少漏诊并减轻医生工作量,展现了明确的临床辅助价值。此外,集成学习策略(如融合多模型特征)的引入,可进一步强化模型判别能力,相关研究在高级别病变分类任务中取得了超过 99%的准确率[20][21]。综上所述,深度学习在宫颈细胞图像自动分析,特别是轻量化网络与高效处理流程的设计,已成为提升国内宫颈癌筛查可及性与准确性的重要方向,这也与武爱媛等[22]在综述中指出的 AI 技术正全面应用于宫颈病变筛查、诊断乃至预测的整体发展趋势相符。

在阴道镜图像分析领域,深度学习技术的发展更侧重于解决实际临床场景中的具体问题。首先,在病灶的自动识别方面,采用“先检测后分类”的策略有助于提升分析效率,例如, Elakkiya 等[23]设计了专为小病灶检测的 FSOD-GAN 网络,在包含近 2000 名患者的数据集上实现了对病灶区域 99%的自动检测与分类准确率。其次,针对特定的临床需求进行模型优化能有效提升诊断的临床适用性, Skerrett [24]等采用便携式阴道镜专注于高级别癌前病变与癌症的分类,通过采用类别平衡损失函数并融合绿光对比图像信息进行优化,最终在测试集中实现了 0.87 的 AUC、75%的敏感性和 88%的特异性。此外,通过特征融合等策略进行网络定制也是一条有效途径,例如, Hamdi 等[25]采用融合 ResNet50 与 VGG19 的特征并结合随机森林分类器的方法在图像分类任务中取得了 99%的准确率。这些针对医学图像特点(如小目标、特定纹理)的针对性优化,其性能通常优于直接套用预训练模型,体现了算法与临床问题紧密结合的价值。

3. 深度学习在组织病理学图像分析与分子分型中的进展

在宫颈癌的数字化病理诊断中,基于全切片图像(WSI)的深度学习技术已成为实现精准分类与亚型预测的重要工具,其主流方法普遍采用“补丁级预测 + WSI 级聚合”的弱监督学习框架,仅需 WSI 级别的诊断标签即可高效工作,这类模型能有效区分宫颈癌与子宫内膜癌亚型,其接受者操作特征曲线下面积(AUROC)分别高达 0.977 和 0.944 [26]。为提升性能,多种先进架构被开发,例如, Zhao 等[27]提出的无监督预训练两阶段方法可生成病变区域热图并进行 WSI 级预测,并在公开数据集上取得了 81.19%的准确率,而 Govindaraj 等[28]的混合模型在亚型分类上实现了 99.31%的准确率,这些模型不仅精度高,而且泛化能力良好。更重要的是此类技术能够直接预测分子分型与评估预后,更重要的是此类技术能够直接预测分子分型与评估预后,相关研究开发的模型能够从治疗前后的活检图像中提取具有预后意义的形态学特征,在分类放疗前后活检 WSI 时, WSI 级 AUROC 达 0.95,且其生成的概率图与患者总生存期显著相关,证明了图像特征的预后预测潜力[29],这些进展标志着病理诊断正从定性描述转向定量分析。然而,此类高性能模型的训练与泛化严重依赖高质量、标准化的病理数据,中国病理医师协会数字病理与人工智能病理学组等权威机构发布的专家共识[30]明确指出建立标准化的宫颈液基细胞学数字病理图像采集与质量控制流程是构建高质量数据集、推动相关人工智能辅助诊断产品研发的重要前提。

深度学习在宫颈癌诊疗中的另一关键应用是构建高精度生物标志物分类模型,并借助可解释性技术(XAI)建立图像特征与生物学行为之间的关联。为实现通过形态学图像间接评估生物标志物表达水平,研

研究者开发了集成多个先进卷积神经网络(CNN)的混合模型,例如,相关方法在 WSI 二分类任务中准确率可达 99.29% [19],或同等高性能[31]。然而,模型的“黑箱”特性限制了临床可信度,推动可解释性人工智能(XAI)与病理深度学习模型的深度融合已成为建立临床信任的关键技术方向,赵延玉等[32]在对可解释人工智能的系统综述中指出发展可解释性技术是破解模型信任瓶颈、实现可信人机协同决策的关键,例如在宫颈细胞学筛查中应用 Grad-CAM 可视化技术可以直观展示模型决策所依据细胞形态学特征,从而验证其决策的合理性[33],这种将预测与特定形态学区域相关联的能力,不仅提升了医生对人工智能的信任,也为深入研究生物标志物与肿瘤微环境的空间关系提供了新途径。通过结合高精度分类与直观可视化,深度学习正从辅助诊断工具,演变为能够揭示疾病生物学机制的研究平台。

4. 深度学习在多模态医学影像融合与检测中的作用

4.1. PET/CT 等多模态图像的融合分析与病灶检测

深度学习在宫颈癌诊疗中的应用已从单一模态分析扩展到多模态融合,其中基于氟代脱氧葡萄糖正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(FDG-PET/CT)的框架尤为突出,Ming 等[34]提出了包含图像配准、多模态融合和病灶检测的深度学习框架,其核心是采用自适应融合方法,能够有效整合 PET 的功能代谢信息与 CT 的精细解剖结构,生成信息互补性更强的融合图像,从而提升宫颈癌检测的临床诊断效率。实验数据表明,与传统的单一模态分析相比,这种多模态融合策略显著提升了病灶识别的准确性,相较于单模态 PET 图像,其在多种目标检测模型的识别准确率平均提升 6.06%;与其他先进融合方法相比,也平均提升 8.9%。

除了 PET/CT,多模态磁共振成像(MRI)在宫颈癌早期诊断中也显示出重要价值,Zhang 等[35]的研究显示采用交替方向算法优化的多模态 MRI 在图像重建清晰度和早期宫颈癌分期准确性方面均优于常规方法,其分期准确率达到 75%,而常规方法仅为 59.38%。在阴道镜图像分析领域,Fan 等[36]提出的阴道镜多模态融合卷积神经网络(CMF-CNN)通过融合醋酸白图像、碘染图像及患者临床基线资料,在宫颈病变分类中取得了 92.70%的准确率,优于主流单模态模型,这些进展表明,通过有效融合不同成像模式或信息源的互补数据,深度学习能够更全面、更精确地识别并表征病灶,为临床决策提供辅助工具。

多模态融合的终极目标是服务于精准诊疗,正如贾利叶等[37]在对人工智能在肺癌影像基因组学的研究综述中所指出的融合影像与基因等多维度信息是深化疾病认知、实现个体化精准治疗的必然发展方向与关键支撑。

4.2. 自动靶区与危及器官勾画

在宫颈癌放射治疗,特别是近距离治疗中,高危临床靶区(HR-CTV)和危及器官(OARs)如膀胱、直肠的精确勾画至关重要,而传统手动勾画耗时且存在明显的观察者间差异,为解决这一问题,深度学习的自动分割模型应运而生,其中结合了卷积神经网络(CNN)与 Transformer 的混合模型能够在 CT 图像上实现快速且精准的自动分割,相关模型在多中心数据集上的训练和验证结果也表明其模型分割轮廓与专家手动勾画的结果具有高度一致性,并取得了优异的 Dice 相似系数(DSC)。

剂量学评估是验证自动勾画临床可行性的关键步骤,初步的验证研究表明这些深度学习模型自动生成的轮廓所制定的放射治疗计划,其关键剂量学指标如膀胱和直肠的 D2cc (接受至少 2 Gy 照射的体积)以及 HR-CTV 的 D90 (覆盖 90%靶区体积的剂量),与专家手动轮廓制定的计划相比,通常无统计学上的显著差异,这意味着自动勾画在大幅度提升勾画效率的同时,还能保证治疗计划的剂量学质量,满足临床治疗的要求。

此外,深度学习在多模态影像预后预测方面也取得了一定进展,例如,Wu 等[38]利用治疗前的 ^{18}F -

FDG PET/CT 图像开发的深度学习模型用于早期预测局部晚期宫颈癌患者接受放化疗后发生远处转移的风险, 该模型在验证队列中的曲线下面积(AUC)达到 0.830。综上所述, 基于 CNN-Transformer 混合架构的深度学习模型为宫颈癌放疗中的自动靶区与器官勾画提供了高效且较为精准的解决方案, 其剂量学等效性已得到初步验证, 展现出向临床常规应用转化的前景。

5. 深度学习在治疗规划与预后预测中的模型构建

5.1. 放射治疗中的剂量预测与校准

在放射治疗中, 制定既能最大化肿瘤控制又能最小化周围正常组织损失的剂量分布, 是一项复杂且高度依赖医生经验的任务。深度学习, 特别是基于知识的计划(Knowledge-Based Planning, KBP)模型, 通过学习大量历史优质计划中患者解剖特征(如 CT 影像中的器官几何形状、体积)与理想剂量分布之间的复杂关系, 能够为新病例快速生成高质量的初始治疗计划[39]。然而, 当面对卵巢功能保护、骨髓抑制规避等特殊临床需求时, 因相关场景的训练数据稀缺, 模型的预测性能可能会显著下降[40], 为应对这一状况, 迁移学习通过利用在大型通用数据集上预训练模型的知识, 能够以较少的新数据和训练时间, 使模型适配于宫颈癌等数据相对稀缺的领域, 有效克服数据瓶颈[41], 这些校准技术的应用为生成个性化、自适应的放射治疗计划提供了方法学支持。

然而, 必须认识到当前主流的 KBP 及衍生模型所实现的“个性化”, 其核心逻辑仍主要基于患者的解剖结构特征, 这种“几何个性化”虽然能显著提升计划生成的效率与一致性, 但尚未触及“精准放疗”的更深内核——即基于肿瘤内部生物学异质性(如克隆亚型、缺氧状态、增殖活性等)的“生物个性化”。例如, 两个解剖结构相似的肿瘤, 可能因其分子分型不同而对放疗的敏感性和预后产生巨大差异, 因此, 未来的个性化规划必然需要超越解剖范畴, 整合 PET、MRI 等多模态影像所揭示的代谢、灌注及细胞密度等功能信息, 乃至基因组学, 从而为每位患者量身定制真正符合其肿瘤生物学特性的剂量分布。这一方向与精准肿瘤学“超越基因组学”、迈向多维度信息整合的演进趋势完全一致[42], 表明从“标准化流程”到“个体化生物学适配”也是深度学习模型的发展方向。

5.2. 整合多组学数据的预后预测与疗效评估: 迈向影像基因组学

预后预测是宫颈癌个体化治疗的前提。传统上, 研究者通过结合临床参数与影像特征来预测病理完全缓解(pCR)等终点, 而真正的突破在于整合基因组、转录组等多维度分子数据, 例如, 通过系统评估多组学特征, 研究能识别出如 miRNA 表达等提供独立预后信息的稳健生物标志物组合, 显著提升模型的区分能力(C-index 可达 0.754) [43]。再如通过检测前哨淋巴结中 HPV 肿瘤 DNA, 可在组织学阴性的患者中精准识别出高风险亚群, 实现分子水平的预后再分层[44]。这些研究表明, 多组学整合能更深刻地揭示肿瘤异质性, 构建远超传统临床-影像模型的精准预后预测系统。

在疗效评估与治疗反应预测方面, 多组学融合提供了动态监测和早期预测的新工具, 例如, 研究发现新辅助免疫治疗可改变肿瘤免疫微环境, 且这些变化与完全缓解相关, 提示其可作为预测疗效的生物标志物[45]。在机制层面, E-cadherin 的缺失可通过激活 ERK 信号通路促进宫颈癌进展, 并与不良生存相关, 为靶向治疗提供了潜在的干预靶点[46]。通过整合治疗前后的多模态影像与分子变化数据, 人工智能模型有望实现治疗早期的反应预测, 从而指导治疗强度的强化或降级。

影像基因组学旨在建立医学影像的宏观表型与基因组等微观分子特征之间的定量关联, 是实现无创性“数字活检”的关键。在宫颈癌中, MRI 影像组学特征已证实与特定基因组的改变显著相关[47]。例如, 基于无监督聚类, 研究者利用 MRI 影像组学特征将患者分为不同风险亚型, 并进一步关联到 CDK4/6 抑制剂、免疫治疗等潜在靶点, 使影像直接具备了指导精准治疗的潜力[47], 这标志着影像从传统的解剖

描述工具, 转变为解码肿瘤生物学行为和驱动个体化治疗决策的核心载体。尽管在数据异质性、算法鲁棒性及临床转化方面仍面临挑战[48][49], 但影像基因组学无疑正引领宫颈癌精准诊疗迈向一个整合宏观与微观信息的新时代。综上所述, 从筛查诊断、病理分析、影像融合到治疗规划与预后预测, 深度学习在宫颈癌诊疗全链条中形成了多样化的技术策略与应用模式, 为更清晰地横向比较深度学习在宫颈癌诊疗各关键领域的应用, 现将上述各环节的代表性研究、算法、性能及挑战汇总如下(见表 1)。

Table 1. Applications and representative studies of deep learning in key areas of cervical cancer diagnosis and treatment
表 1. 深度学习在宫颈癌诊疗关键领域的应用与代表性研究

应用领域	代表性算法/技术策略	数据集与规模	核心性能指标	主要局限性/挑战	参考文献
筛查与细胞学诊断	实例分割网络(如 Mask R-CNN)、集成学习、轻量化网络	公开数据集(如 SIPakMeD)、千例级临床样本	分类准确率 97.45%; 全片筛查敏感度 100%, 特异度 90.68%; 高级别病变分类准确率 > 99%	对复杂背景敏感; 依赖高质量标注数据; 需高效处理流程	[4] [5] [17]-[19] [20] [21]
阴道镜图像分析	小目标检测网络(如 FSOD-GAN)、多模型特征融合、便携式设备优化	近 2000 名患者数据集	检测与分类准确率 99%; 分类 AUC 0.87; 便携式分类准确率 > 96%	针对小病灶、特定图像纹理(如醋酸白、碘染)需专门优化	[7] [8] [23]-[25]
组织病理学分析	弱监督学习(补丁预测 + WSI 聚合)、无监督预训练、混合模型	多中心 WSI 数据集	亚型分类 AUROC 0.977; 亚型分类准确率 99.31%; 放疗前后活检分类 AUROC 0.95	模型为“黑箱”, 可解释性不足; 计算资源需求大; 依赖标准化高质量数据	[26]-[30]
多模态影像分析	多模态自适应融合(PET/CT)、CNN-Transformer 混合架构、多序列 MRI 融合	多模态影像(PET/CT, MRI)数据集	检测准确率提升 6%~9%; 分期准确率 75%; 自动分割 Dice 系数 > 0.85	多模态配准与信息有效融合是技术难点; 分割精度受图像质量影响	[10] [11] [34]-[36]
放疗规划	基于知识的计划(KBP)模型、迁移学习	历史优质计划数据库、多中心影像数据集	自动勾画剂量学指标与专家计划无显著差异; 可快速生成高质量初始计划	“几何个性化”为主, 缺乏对肿瘤生物学异质性的整合; 特殊临床场景数据稀缺	[12] [13] [39]-[41]
预后预测与疗效评估	多组学(影像、基因组、临床)整合、影像基因组学	治疗前后多组学患者队列	预测远处转移风险 AUC 0.830; 多组学预后模型 C-index 0.754	数据异质性强; 模型可解释性弱; 需前瞻性多中心验证	[38] [43]-[47]

6. 总结

深度学习在宫颈癌诊疗中的应用, 已从辅助工具逐渐深入到诊疗的重要环节。在技术方面, 通过算法优化与模型轻量化设计, 其性能在病灶识别与分类等任务上不断提升; 多模态数据的融合分析则为更精准的诊疗决策提供更全面的信息基础。在临床实践中, 深度学习有助于提升诊疗效率与一致性, 并在放疗靶区勾画、剂量预测等环节减轻人工负担, 展现出临床应用的实用价值。然而, 要实现全面、可靠的临床集成, 仍面临模型性能高度依赖高质量且标准化的标注数据、数据稀缺且不同来源数据的异质性以及模型决策过程缺乏可解释性等现实挑战。因此, 未来的发展重点应从单纯追求算法性能转向构建能够切实解决临床实际问题的鲁棒系统, 这需要建立标准化、多中心的数据集, 同时开发兼顾性能与可解释性的算法, 并依据严格的临床研究规范开展前瞻性效能验证, 唯有通过技术、数据与临床验证并重的

系统化路径才能推动深度学习真正融入日常诊疗实践。最新的研究进展综述亦系统阐述了人工智能在妇科恶性肿瘤诊疗中的应用场景、挑战与未来方向,为跨学科协作、推动 AI 技术稳健融入临床实践提供了重要参考[50],引领宫颈癌防治迈向智能化、精准化新时代。总之,推动深度学习与宫颈癌诊疗的深度融合,唯有遵循技术迭代、数据规范与临床验证并重的系统化路径,方能使其稳步融入日常临床工作,最终助力诊疗水平的提升。

基金项目

本文为内蒙古自治区公立医院科研联合基金科技项目“多模态 MRI 联合影像组学在早期宫颈癌诊断及分级中的研究价值”(2023GLLH0346)阶段性成果。

利益冲突说明

本文作者声明不存在任何利益冲突。

参考文献

- [1] Yadav, P., Gupta, A., Parveen, A. and Kumar, A. (2022) Advancement in Deep Learning Methods for Diagnosis and Prognosis of Cervical Cancer. *Current Genomics*, **23**, 234-245. <https://doi.org/10.2174/1389202923666220511155939>
- [2] Desai, K.T., Befano, B., Xue, Z., Kelly, H., Campos, N.G., Egemen, D., et al. (2021) The Development of “Automated Visual Evaluation” for Cervical Cancer Screening: The Promise and Challenges in Adapting Deep-Learning for Clinical Testing. *International Journal of Cancer*, **150**, 741-752. <https://doi.org/10.1002/ijc.33879>
- [3] Debelee, T.G., Kebede, S.R., Schwenker, F. and Shewarega, Z.M. (2020) Deep Learning in Selected Cancers’ Image Analysis—A Survey. *Journal of Imaging*, **6**, Article 121. <https://doi.org/10.3390/jimaging6110121>
- [4] Li, X., Du, M., Zuo, S., Zhou, M., Peng, Q., Chen, Z., et al. (2023) Deep Convolutional Neural Networks Using an Active Learning Strategy for Cervical Cancer Screening and Diagnosis. *Frontiers in Bioinformatics*, **3**, Article 1101667. <https://doi.org/10.3389/fbinf.2023.1101667>
- [5] Sompawong, N., Mopan, J., Pooprasert, P., Himakhun, W., Suwannarurk, K., Ngamvirojcharoen, J., et al. (2019) Automated Pap Smear Cervical Cancer Screening Using Deep Learning. 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, 23-27 July 2019, 7044-7048. <https://doi.org/10.1109/embc.2019.8856369>
- [6] Wentzensen, N., Lahrmann, B., Clarke, M.A., Kinney, W., Tokugawa, D., Poitras, N., et al. (2020) Accuracy and Efficiency of Deep-Learning-Based Automation of Dual Stain Cytology in Cervical Cancer Screening. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, **113**, 72-79. <https://doi.org/10.1093/jnci/djaa066>
- [7] Himabindu, D.D., Lydia, E.L., Rajesh, M.V., Ahmed, M.A. and Ishak, M.K. (2025) Leveraging Swin Transformer with Ensemble of Deep Learning Model for Cervical Cancer Screening Using Colposcopy Images. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 7900. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90415-3>
- [8] Yu, Y., Ma, J., Zhao, W., Li, Z. and Ding, S. (2021) MSCI: A Multistate Dataset for Colposcopy Image Classification of Cervical Cancer Screening. *International Journal of Medical Informatics*, **146**, Article ID: 104352. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2020.104352>
- [9] Kang, Z., Liu, J., Ma, C., Chen, C., Lv, X. and Chen, C. (2023) Early Screening of Cervical Cancer Based on Tissue Raman Spectroscopy Combined with Deep Learning Algorithms. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **42**, Article ID: 103557. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2023.103557>
- [10] Zabihollahy, F., Viswanathan, A.N., Schmidt, E.J. and Lee, J. (2022) Fully Automated Segmentation of Clinical Target Volume in Cervical Cancer from Magnetic Resonance Imaging with Convolutional Neural Network. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, **23**, e13725. <https://doi.org/10.1002/acm2.13725>
- [11] Liu, Z., Liu, X., Guan, H., Zhen, H., Sun, Y., Chen, Q., et al. (2020) Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Auto-Delineation of Clinical Target Volume and Organs at Risk in Cervical Cancer Radiotherapy. *Radiation Therapy and Oncology*, **153**, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.09.060>
- [12] Gautam, S., Osman, A.F.I., Richeson, D., Gholami, S., Manandhar, B., Alam, S., et al. (2024) Attention 3D UNET for Dose Distribution Prediction of High-Dose-Rate Brachytherapy of Cervical Cancer: Intracavitary Applicators. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, **26**, e14568. <https://doi.org/10.1002/acm2.14568>
- [13] Yang, B., Liu, Y., Chen, Z., Wang, Z., Zhou, Q. and Qiu, J. (2022) Tissues Margin-Based Analytical Anisotropic

- Algorithm Boosting Method via Deep Learning Attention Mechanism with Cervical Cancer. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, **18**, 953-959. <https://doi.org/10.1007/s11548-022-02801-1>
- [14] Zhang, K., Sun, K., Zhang, C., Ren, K., Li, C., Shen, L., *et al.* (2023) Using Deep Learning to Predict Survival Outcome in Non-Surgical Cervical Cancer Patients Based on Pathological Images. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, **149**, 6075-6083. <https://doi.org/10.1007/s00432-022-04446-8>
- [15] Du, T., Li, C., Grzegozek, M., Huang, X., Rahaman, M., Wang, X., *et al.* (2025) PET/CT Radiomics for Non-Invasive Prediction of Immunotherapy Efficacy in Cervical Cancer. *Journal of X-Ray Science and Technology*, **33**, 1081-1092. <https://doi.org/10.1177/08953996251367203>
- [16] Zhang, D., Zhao, L., Guo, B., Guo, A., Ding, J., Tong, D., *et al.* (2025) Integrated Machine Learning Algorithms-Enhanced Predication for Cervical Cancer from Mass Spectrometry-Based Proteomics Data. *Bioengineering*, **12**, Article 269. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12030269>
- [17] Chauhan, N.K., Singh, K., Kumar, A. and Kolambakar, S.B. (2023) HDFCN: A Robust Hybrid Deep Network Based on Feature Concatenation for Cervical Cancer Diagnosis on WSI Pap Smear Slides. *BioMed Research International*, **2023**, Article ID: 4214817. <https://doi.org/10.1155/2023/4214817>
- [18] Kanavati, F., Hirose, N., Ishii, T., Fukuda, A., Ichihara, S. and Tsuneki, M. (2022) A Deep Learning Model for Cervical Cancer Screening on Liquid-Based Cytology Specimens in Whole Slide Images. *Cancers*, **14**, Article 1159. <https://doi.org/10.3390/cancers14051159>
- [19] 李雪, 石中月, 杨志明, 等. 人工智能辅助分析在宫颈液基薄层细胞学检查中的应用价值[J]. 首都医科大学学报, 2020, 41(3): 360-363.
- [20] Alsalatie, M., Alquran, H., Mustafa, W.A., Zyout, A., Alqudah, A.M., Kaifi, R., *et al.* (2023) A New Weighted Deep Learning Feature Using Particle Swarm and Ant Lion Optimization for Cervical Cancer Diagnosis on Pap Smear Images. *Diagnostics*, **13**, Article 2762. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172762>
- [21] Alquran, H., Alsalatie, M., Mustafa, W.A., Abdi, R.A. and Ismail, A.R. (2022) Cervical Net: A Novel Cervical Cancer Classification Using Feature Fusion. *Bioengineering*, **9**, Article 578. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9100578>
- [22] 武爱媛, 热米拉·热扎克, 乔友林. 人工智能在宫颈病变诊断及治疗中的应用进展与挑战[J]. 中国全科医学, 2022, 25(18): 2215-2222, 2230.
- [23] Elakkiya, R., Subramaniaswamy, V., Vijayakumar, V. and Mahanti, A. (2022) Cervical Cancer Diagnostics Healthcare System Using Hybrid Object Detection Adversarial Networks. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, **26**, 1464-1471. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2021.3094311>
- [24] Skerrett, E., Miao, Z., Asiedu, M.N., Richards, M., Crouch, B., Sapiro, G., *et al.* (2022) Multicontrast Pocket Colposcopy Cervical Cancer Diagnostic Algorithm for Referral Populations. *BME Frontiers*, **2022**, Article ID: 9823184. <https://doi.org/10.34133/2022/9823184>
- [25] Hamdi, M., Senan, E.M., Awaji, B., Olayah, F., Jadhav, M.E. and Alalayah, K.M. (2023) Analysis of WSI Images by Hybrid Systems with Fusion Features for Early Diagnosis of Cervical Cancer. *Diagnostics*, **13**, Article 2538. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13152538>
- [26] Song, J., Im, S., Lee, S.H. and Jang, H. (2022) Deep Learning-Based Classification of Uterine Cervical and Endometrial Cancer Subtypes from Whole-Slide Histopathology Images. *Diagnostics*, **12**, Article 2623. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12112623>
- [27] Zhao, M., Ling, M., Wang, Z., Shi, J., Kan, H., An, H., *et al.* (2022) Whole Slide Image Multi-Classification of Cervical Epithelial Lesions Based on Unsupervised Pre-Training. 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Glasgow, 11-15 July 2022, 594-598. <https://doi.org/10.1109/embc48229.2022.9871149>
- [28] Govindaraj, P., Natarajan, S., Sampath, P., Suresh, A.T. and Amirtharajan, R. (2025) A Hybrid Compound Scaling Hypergraph Neural Network for Robust Cervical Cancer Subtype Classification Using Whole Slide Cytology Images. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 22201. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05891-4>
- [29] Goto, M., Futamura, Y., Makishima, H., Saito, T., Sakamoto, N., Iijima, T., *et al.* (2025) Development of a Deep Learning-Based Model to Evaluate Changes during Radiotherapy Using Cervical Cancer Digital Pathology. *Journal of Radiation Research*, **66**, 144-156. <https://doi.org/10.1093/jrr/rraf004>
- [30] 中国病理医师协会数字病理与人工智能病理学组, 中华医学会病理学分会数字病理与人工智能工作委员会, 中华医学会病理学分会细胞病理学组. 宫颈液基细胞学的数字病理图像采集与图像质量控制中国专家共识[J]. 中华病理学杂志, 2021, 50(4): 319-322.
- [31] Chauhan, N.K., Singh, K., Kumar, A., Mishra, A., Gupta, S.K., Mahajan, S., *et al.* (2025) A Hybrid Learning Network with Progressive Resizing and PCA for Diagnosis of Cervical Cancer on WSI Slides. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 12801. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97719-4>
- [32] 赵延玉, 赵晓永, 王磊, 等. 可解释人工智能研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(14): 1-14.

- [33] Kurita, Y., Meguro, S., Tsuyama, N., Kosugi, I., Enomoto, Y., Kawasaki, H., *et al.* (2023) Accurate Deep Learning Model Using Semi-Supervised Learning and Noisy Student for Cervical Cancer Screening in Low Magnification Images. *PLOS ONE*, **18**, e0285996. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285996>
- [34] Ming, Y., Dong, X., Zhao, J., Chen, Z., Wang, H. and Wu, N. (2022) Deep Learning-Based Multimodal Image Analysis for Cervical Cancer Detection. *Methods*, **205**, 46-52. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2022.05.004>
- [35] Zhang, Z., Zhang, C., Xiao, L. and Zhang, S. (2022) Diagnosis of Early Cervical Cancer with a Multimodal Magnetic Resonance Image under the Artificial Intelligence Algorithm. *Contrast Media & Molecular Imaging*, **2022**, Article ID: 6495309. <https://doi.org/10.1155/2022/6495309>
- [36] Fan, Y., Ma, H., Fu, Y., Liang, X., Yu, H. and Liu, Y. (2022) Colposcopic Multimodal Fusion for the Classification of Cervical Lesions. *Physics in Medicine & Biology*, **67**, Article ID: 135003. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac73d4>
- [37] 贾利叶, 任雪婷, 赵涓涓, 等. 人工智能在肺癌影像基因组学方面的研究与进展[J]. 太原理工大学学报, 2022, 53(4): 571-587.
- [38] Wu, K., Chen, S., Hsieh, T., Yen, K., Chang, C., Kuo, Y., *et al.* (2023) Early Prediction of Distant Metastasis in Patients with Uterine Cervical Cancer Treated with Definitive Chemoradiotherapy by Deep Learning Using Pretreatment [¹⁸F]fluorodeoxyglucose Positron Emission Tomography/Computed Tomography. *Nuclear Medicine Communications*, **45**, 196-202. <https://doi.org/10.1097/mnm.0000000000001799>
- [39] Fu, Q., Chen, X., Liu, Y., Zhang, J., Xu, Y., Yang, X., *et al.* (2024) Improvement of Accumulated Dose Distribution in Combined Cervical Cancer Radiotherapy with Deep Learning-Based Dose Prediction. *Frontiers in Oncology*, **14**, Article 1407016. <https://doi.org/10.3389/fonc.2024.1407016>
- [40] Guo, L., Zhang, S., Chen, H., Li, Y., Liu, Y., Liu, W., *et al.* (2025) Application of Artificial Intelligence in Assisting Treatment of Gynecologic Tumors: A Systematic Review. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, **8**, Article No. 23. <https://doi.org/10.1186/s42492-025-00201-1>
- [41] Cui, J., Xiao, J., Hou, Y., Wu, X., Zhou, J., Peng, X., *et al.* (2023) Unsupervised Domain Adaptive Dose Prediction via Cross-Attention Transformer and Target-Specific Knowledge Preservation. *International Journal of Neural Systems*, **33**, Article ID: 23500570. <https://doi.org/10.1142/s0129065723500570>
- [42] Pfohl, U., Pflaume, A., Regenbrecht, M., Finkler, S., Graf Adelmann, Q., Reinhard, C., *et al.* (2021) Precision Oncology Beyond Genomics: The Future Is Here—It Is Just Not Evenly Distributed. *Cells*, **10**, Article 928. <https://doi.org/10.3390/cells10040928>
- [43] Nguyen, R. and Vafae, F. (2025) Multi-Omics Prognostic Marker Discovery and Survival Modelling: A Case Study on Multi-Cancer Survival Analysis of Women's Specific Tumours. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 36706. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20572-y>
- [44] Montero-Macías, R., Veyer, D., Bruneau, T., Robillard, N., Le Frère-Belda, M., Rigolet, P., *et al.* (2023) TRANSLACOL Project: Nodal Human Papillomavirus Tumoral DNA Detection by ddPCR for Survival Prediction in Early Cervical Cancer Patients without Pelvic Lymph Node Invasion. *Journal of Clinical Virology*, **161**, Article ID: 105418. <https://doi.org/10.1016/j.jcv.2023.105418>
- [45] Ray-Coquard, I., Kaminsky-Forrett, M., Ohkuma, R., de Montfort, A., Joly, F., Treilleux, I., *et al.* (2026) Neoadjuvant Immune Checkpoint Blockade before Chemoradiation for Cervical Squamous Carcinoma (GINECO Window-of-Opportunity COLIBRI Study): A Phase II Trial. *Nature Communications*, **17**, Article No. 922. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67646-z>
- [46] Yun, H., Han, G.H., Wee, D.J., Chay, D., Chung, J., Kim, J., *et al.* (2025) Loss of E-Cadherin Activates EGFR-MEK/ERK Signaling, Promoting Cervical Cancer Progression. *Cancer Genomics—Proteomics*, **22**, 271-284. <https://doi.org/10.21873/cgp.20501>
- [47] Halle, M.K., Hodneland, E., Wagner-Larsen, K.S., Lura, N.G., Fasmer, K.E., Berg, H.F., *et al.* (2024) Radiomic Profiles Improve Prognostication and Reveal Targets for Therapy in Cervical Cancer. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 11339. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61271-4>
- [48] Luciano, N., Orlandella, F.M., Braile, M., Cavaliere, C., Aiello, M., Franzese, M., *et al.* (2024) Association of Radiomic Features with Genomic Signatures in Thyroid Cancer: A Systematic Review. *Journal of Translational Medicine*, **22**, Article No. 1088. <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05896-z>
- [49] Saini, S.K., Sharma, D.N., Chauhan, S., Srivastava, S., Gopishankar, N. and Subramani, V. (2025) Precision Prediction of Cervical Cancer Outcomes: A Machine Learning Approach to Recurrence and Survival Analysis. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, **21**, 538-546. https://doi.org/10.4103/jcrt.jcrt_2524_24
- [50] 唐玲玲, 李力. 大数据与人工智能在妇科恶性肿瘤中的研究与应用[J]. 中国实用妇科与产科杂志, 2019, 35(6): 720-723.