

影像组学在头颈部肿瘤精准诊疗中的应用现状 与未来展望*

冯梅^{1,2} 尹清萍¹ 李璐² 范铭²

(1. 四川省第三人民医院, 四川 成都 610100; 2. 四川省肿瘤医院研究所·肿瘤精准放疗四川省重点实验室·四川省肿瘤临床医学研究中心·四川省癌症防治中心·电子科技大学附属肿瘤医院放疗科, 四川 成都 610041)

【摘要】 头颈部肿瘤(HNC)具有解剖结构复杂、病理类型多样、治疗方式多元化等特点,传统临床分期难以满足精准诊疗需求,亟需多维度的信息整合以优化诊疗策略。影像组学(Radiomics)可以整合不同成像模式(如结构、功能及分子影像)提供更多内在生物学信息,进一步转化为高维定量特征并链接到预后、疗效及毒性反应等临床结局,助力 HNC 的精确诊断、分期、个体化决策和毒性反应管理。本文梳理了影像组学在头颈部肿瘤中的最新研究进展,旨在探讨其临床价值、技术挑战及未来发展方向。

【关键词】 头颈部肿瘤;影像组学;精准治疗;毒性管理

【中图分类号】 R739.91 **【文献标志码】** A **DOI:**10.3969/j.issn.1672-3511.2025.09.002

Current applications and future perspectives of radiomics in the precision medicine of head and neck tumors

FENG Mei^{1,2}, YIN Qingping¹, LI Lu², FAN Ming²

(1. The Third People's Hospital of Sichuan Province, Chengdu 610100, China;

2. Sichuan Cancer Hospital, Sichuan Key Laboratory of Precision Radiotherapy, Sichuan Provincial Clinical Research Center for Cancer, Sichuan Cancer Prevention and Treatment Center, Department of Radiotherapy, Affiliated Cancer Hospital of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, China)

【Abstract】 Head and neck cancer (HNC) is characterized by complex anatomy, diverse pathological types, and heterogeneous treatment modalities. Conventional clinical staging falls short in meeting the demands of precision medicine, creating an urgent need for multi-dimensional information integration to optimize diagnostic and therapeutic strategies. Radiomics, by integrating various imaging modalities (such as structural, functional, and molecular imaging), can extract intrinsic biological information and convert it into high-dimensional quantitative features. These features can be linked to clinical outcomes such as prognosis, treatment response, and toxicity, thereby facilitating precise diagnosis, accurate staging, individualized decision-making, and toxicity management in HNC. This article reviews recent advances in radiomics research for head and neck tumors, discusses its clinical value, technical challenges, and future directions.

【Key words】 Head and neck neoplasms; Radiomics; Precision medicine; Toxicity management

头颈部肿瘤(Head and neck cancer, HNC)作为全球第六大常见恶性肿瘤,其发病率与死亡率依然呈逐年上升趋势。据国际癌症研究机构 GLOBOCAN 2025 年数据^[1],全球新增头颈肿瘤患者超过 70 万例,

基金项目:四川省卫生健康委员会医学科技项目(24LCYJPT09);成都市科学技术局技术创新研发项目(2024-YF05-02377-SN)

执行编委简介:冯梅,教授/研究员,博士,博士研究生导师,四川省第三人民医院党委书记。美国威斯康星医学院和意大利 CNAO 中心高级访问学者,首届国家优秀青年医师,全国卫生健康系统先进工作者,四川省学术技术带头人,四川省海外高层次留学人才,四川省卫健委学术技术带头人,四川省卫生计生委有突出贡献中青年专家。四川省放射治疗质量控制中心专家委员会委员。尤其擅长各种常见肿瘤及复杂、疑难的头颈部肿瘤、颅内肿瘤、鼻咽癌的精准确放疗以及免疫、靶向、化疗等综合治疗。主持参与多项国家和省级科研项目,获得四川省科技进步二等奖、四川省医学科技一等奖等,牵头和参与制定国内外肿瘤诊疗指南共识 10 余部。

引用本文:冯梅,尹清萍,李璐,等.影像组学在头颈部肿瘤精准诊疗中的应用现状与未来展望[J].西部医学,2025,37(9):1254-1257. DOI:10.3969/j.issn.1672-3511.2025.09.002

死亡人数逾 35 万。在我国,形势同样严峻;2025 年,国家癌症中心数据也显示,我国每年新发头颈癌患者超过 13 万例,死亡近 7 万例。近十年来,发病率持续上升 25%,五年生存率仅 50%~60%^[2],对我国居民的健康构成了重大威胁。头颈部肿瘤因其涵盖口腔、口咽、下咽和喉等多个解剖亚部位,具有结构复杂和高度异质性的特点,且病理类型多样,其中头颈部鳞状细胞癌(Head and neck squamous cell carcinoma, HNSCC)最为常见^[3]。由于早期症状的非特异性,多数 HNSCC 患者在确诊时已处于中晚期,需要接受手术、放疗、化疗、靶向和免疫等综合治疗。但不同解剖部位的头颈部鳞癌患者 5 年生存率存在显著差异,如喉癌生存率为 60%,而下咽癌仅 25%^[4]。即使是相同部位、相同分期患者预后也存在差异,依赖传统 TNM 分期系统已无法满足“精准医学”对肿瘤个体化诊疗的要求。此外,头颈部区域集中了呼吸、吞咽、发音等重要功能,使得治疗面临三重核心挑战:在实现肿瘤根治的同时,需要最大限度保留器官功,并有效管理治疗相关毒性。然而 HNC 在分子、细胞和组织层面存在较高异质性,传统的单一影像模式(如 CT、MRI 或 PET-CT)往往难以全面捕捉肿瘤特征,需要采用更先进的评估工具^[5]。影像组学可以通过常规医学影像中提取高维度量特征,捕获肿瘤生物学特征,助力头颈肿瘤的精准诊疗。

1 影像组学在头颈部肿瘤中的应用

肿瘤具有空间和时间上的异质性,侵入性活检难以全面反映肿瘤的整体特性,而医学影像因其非侵入性、可重复性以及获取肿瘤内部异质性的独特能力,在刻画肿瘤画像等方面展现出巨大潜力。多模态影像是一种结合多种成像技术的综合影像方法,通过整合不同类型的医学影像数据(如 CT 的解剖结构信息、MRI 的软组织分辨力、¹⁸F-FDG PET-CT 的功能代谢信息等)进行精确的空间配准和图像融合,由此生成的多维综合影像,能够提供更全面的肿瘤生物学特征视图,提高诊断准确性,制定更精准的治疗方案。近年来,随着 CT、MRI、功能 MRI(DWI、DCE-MRI、fMRI)和 PET-CT/MRI 等多模态影像及人工智能技术的发展,基于多模态图像的影像组学应运而生。影像组学(Radiomics)是将多模态影像数据转化为可挖掘的高维定量特征,并最终链接到临床终点(预后、疗效、毒性)的新兴技术。它可以实现从“看图像”到“读数据”的核心转变的。目前,多模态影像及影像组学已广泛运用于各种头颈部肿瘤的诊断、治疗及预后等研究中,助力个体化精准诊疗。

1.1 精准诊断与分期 头颈部肿瘤常常使用 CT、

MRI、PET/CT 等多模态影像进行诊断与分期,但仍面临一些困境,如对肿瘤侵犯边界、有无淋巴结的判断尚有困难。近年来,使用影像组学在头颈肿瘤中精准诊断分期的应用成为研究热点。准确的 T2/T3 分期对喉及下咽鳞状细胞癌(Laryngeal and hypopharyngeal squamous cell carcinoma, LHSCC)患者选择喉切除术或保喉治疗至关重要,但传统 CT 评估存在偏倚。Liu 等^[6]基于 118 例 LHSCC 患者的增强 CT 影像,开发了一种融合 851 个影像组学特征与形态学特征(甲状软骨侵犯)的预测模型。通过方差分析与逻辑回归算法构建的影像组学列线图,在训练集、验证集和测试集中分别达到 0.919、0.857 和 0.817 的 AUC 值,且校准曲线拟合良好($P>0.05$),为 LHSCC 的精准分期提供帮助。早期口腔、口咽癌患者有 20%~30%存在隐匿性的颈部淋巴结转移,难以通过常规的 CT、MRI 等检查发现。有研究基于 319 例口腔、口咽癌患者术前 MRI 影像数据开发了一种基于 MRI 和 Resnet50 深度学习模型的术前诊断方法,用于预测早期口腔癌和口咽癌的隐匿性淋巴结转移预测,模型在测试集、外部验证 AUC 高达 0.878 和 0.834,显著优于传统影像手段^[7]。除了更好的帮助判断肿瘤边界及有无转移,影像组学还可以无创的预测病理特征。韩国学者研发了一种基于 MRI 与 ¹⁸F-FDG PET/CT 的融合影像组学模型,用于预测口咽癌患者 HPV 感染状态,结果显示模型预测性能优异(AUC = 0.823)^[8]。这些研究充分表明,基于影像组学的智能化分析方法正逐步突破传统诊疗瓶颈,为头颈部肿瘤的精准诊断与分期提供强有力的量化工具。

1.2 预后预测及分层 如何对患者在治疗前预后精准分层、治疗中策略动态调整、治疗后随访密切有效已经成为头颈部鳞癌精准诊疗体系构建中迫切需要解决的关键问题。Shen 等^[9]基于多中心研究开发了一种甲状腺癌术前风险分层的分期模型,整合超声与 CT 影像组学特征,通过 SHAP 分析揭示,CT 图像特征和超声形态学特征是预测淋巴结转移的关键因子,使用该模型后乳头状甲状腺癌风险分层 AUC 达 0.91,较传统分期系统显著提升。Liu 等^[10]纳入 268 例初发转移性鼻咽癌(dmNPC)患者,构建基于临床、影像组学和病理组学的多模态预后模型。通过提取 MRI 影像组学特征和病理全切片的病理组学特征,结合临床指标建立模型。结果显示,临床-影像-病理(CRP)模型预测效能优于单一模型,根据 CRP 评分将患者分为低风险(CRP<1.16)和高风险组,低风险组生存显著优于高风险组($P<0.001$)。Cozzi 等^[11]基于 IV 期化疗前头颈部原发肿瘤的 CT 特征建立预后评

价模型,实现了 TNM 分期相同患者中高低风险人群的有效区分。Zhuo 等^[12]运用 MRI 影像特征结合支持向量机(SVM)算法对非转移性鼻咽癌进行预后分层,其结果比 TNM 分期更稳定。Feng 等^[13]收集 186 例单器官转移鼻咽癌患者治疗前的磁共振成像数据,在 T1WI、T2WI 和 CE-T1WI 上确定治疗前的总肿瘤体积(Gross tumor volume, GTV)和转移淋巴结(Gross tumor volume lymph nodes, GTVln),应用深度学习算法,根据原发肿瘤和淋巴结体积、磁共振影像特征与预后的相关性,建立疗效预测模型。Jia 等^[14]通过整合多时序 MRI 放射组学特征与临床因素,构建了一个基于图卷积网络(GCN)的深度学习模型(Model RC),用于预测局部晚期鼻咽癌的生存结局。这些预后模型进展标志着 HNC 管理正从“一刀切”模式转向生物学驱动的精准确分层下的个体化治疗。

1.3 毒性预测及管理 随着调强放射治疗(Intensity-modulated radiation therapy, IMRT)的广泛应用和放化疗策略的改进,头颈部肿瘤群体的生存预后得到显著改善,但治疗相关毒副作用仍然是不容忽视的问题。由于头颈部肿瘤危及器官较多且相对位置关系复杂,周围正常器官将不可避免地接受一定剂量的放疗剂量,导致功能损害。放疗导致的口干、听力损伤、脑坏死、颅神经损伤、骨坏死、软组织纤维化以及内分泌改变等后期损伤已严重影响其生活质量,重者甚至危及生命,因此如何早期预测毒性反应,进行精准管理是头颈部肿瘤的“减毒治疗”的关键。腮腺损伤是 HNSCC 患者出现放射性口干的重要原因,虽然动物学实验发现腮腺接受 3.2 Gy 时即可出现细胞水平的损伤,但此时常规影像学如 CT、MRI 等无法发现形态学变化。有研究采用磁共振弥散加权成像对鼻咽癌患者放疗过程中腮腺进行追踪,发现放疗 5 次后腮腺 ADC 值即可有显著升高,且与放疗后口干程度显著相关,而此时腮腺尚无体积变化^[15-16]。该研究提示功能磁共振可早期发现腮腺分泌功能的损伤,帮助优化放疗计划及自适应放疗介入。

放射性颞叶损伤(Radioactive temporal lobe injury, RTLI)是一种严重的晚期放疗毒性反应,目前对 RTLI 的预防主要基于放疗剂量限制,而如何早期预测 RTLI 的发生并进行个体化剂量限制是其中关键。近年来,多项研究聚焦 MRI 为基础的影像组学在预测 RTLI 中的应用。基于 230 例 NPC 患者的治疗前多参数 MRI 影像(包括 ADC、T2WI 及 CE-T1WI),开发了一种融合 5 064 个影像组学特征与临床特征的机器学习预测模型,通过 LASSO 回归及多分类器构建的

临床-影像组学列线图,在训练集和验证集中 AUC 分别高达 0.984 和 0.969,为 NPC 患者 RTLI 风险提供了一种无创、精准的预测工具,帮助个体化毒性管理^[17-18]。

这些发现为深入挖掘新型生物影像标志物以预测疗效和正常器官功能损伤奠定了重要基础。未来,如何基于影像组学信息早期无创副反应预测,实现个体化的“减毒”治疗策略调整,仍需通过临床试验进一步验证。

2 多模态在头颈部肿瘤运用中的挑战和展望

尽管前景广阔,影像组学模型在头颈部肿瘤的临床转化仍面临系统性挑战,包括:1. 特征可重复性与稳定性不足:数据异质性不仅来源于成像设备差异,还受到勾画者间一致性、图像重建参数配置及呼吸运动等因素影响,导致特征提取结果稳定性较差;2. 模型过拟合与泛化能力有限:高维特征与有限样本量之间的矛盾显著,模型易出现过拟合,需更加重视外部验证与标准化流程在推动临床转化中的关键作用;3. 生物学解释性较弱:当前影像组学模型多呈“黑箱”特性,如何将纹理、小波等抽象特征与肿瘤生物学本质(如缺氧状态、细胞密度及血管生成等)有效关联,仍是当前研究的重点与难点。

此外,当前大多数研究仍局限于单一影像组学模型。为满足对肿瘤特征更精准解读以及个体化诊疗的需求,未来应致力于将临床组学、基因组学、放射组学等多组学信息整合入模型构建中。最近,德国埃尔朗根-纽伦堡大学医院团队发布了一个囊括了 763 例头颈癌患者的临床信息、CT/MRI 影像、组织病理全切片图像及基因及转录组学等多维数据的数据集。这是头颈癌领域首个规模化多模态公开数据集,它提供了诊断、预后及生存分析所需的全链路数据^[19]。这不仅可用于验证新算法的稳健性,也可帮助研究人员探索更精细的分型与个性化治疗策略。

在医工结合的时代背景下,未来通过跨模态海量数据和信息的规范收集和处理运用,有望构建一个基于多组学数据的智慧诊疗平台,在治疗前、中、后持续优化诊疗决策,实现从精准诊断到精准管理的跨越,助力个体化精准诊疗体系的建立与应用。

【参考文献】

- [1] SIEGEL R L, KRATZER T B, GIAQUINTO A N, *et al.* Cancer statistics, 2025[J]. CA A Cancer J Clin, 2025, 75(1): 10-45.
- [2] XIA C F, DONG X S, LI H, *et al.* Cancer statistics in China and United States, 2022: profiles, trends, and determinants [J]. Chin Med J, 2022, 135(5): 584-590.

- [3] JOHNSON D E, BURTNES B, LEEMANS C R, *et al.* Head and neck squamous cell carcinoma[J]. *Nat Rev Dis Primers*, 2020, 6(1): 92.
- [4] PARSAEI M, SANJARI MOGHADDAM H, MAZAHERI P. The clinical utility of diffusion-weighted imaging in diagnosing and predicting treatment response of laryngeal and hypopharyngeal carcinoma: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur J Radiol*, 2024, 177: 111550.
- [5] WONG A J, KANWAR A, MOHAMED A S, *et al.* Radiomics in head and neck cancer: from exploration to application[J]. *Transl Cancer Res*, 2016, 5(4): 371-382.
- [6] LIU Q H, LIU S D, MAO Y, *et al.* Machine learning model to preoperatively predict T2/T3 staging of laryngeal and hypopharyngeal cancer based on the CT radiomic signature[J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(8): 5349-5359.
- [7] ZHU R Q, ZHANG Y, ZHANG J Y, *et al.* Development and validation of an explainable machine learning model for predicting occult lymph node metastasis in early-stage oral tongue squamous cell carcinoma: a multi-center study[J]. *Int J Surg*, 2025, 111(8): 5022-5035.
- [8] JO K H, KIM J, CHO H, *et al.* (18)F-FDG PET/CT parameters enhance MRI radiomics for predicting human Papilloma Virus status in oropharyngeal squamous cell carcinoma[J]. *Yonsei Med J*, 2023, 64(12): 738-744.
- [9] SHEN P C, YANG Z Y, SUN J J, *et al.* Explainable multimodal deep learning for predicting thyroid cancer lateral lymph node metastasis using ultrasound imaging[J]. *Nat Commun*, 2025, 16(1): 7052.
- [10] LIU Z Q, ZANG S B, OUYANG P Y, *et al.* Multimodal prognostic model for de novo metastatic nasopharyngeal carcinoma after first-line immunotherapy [J]. *Radiother Oncol*, 2025, 210: 111010.
- [11] COZZI L, FRANZESE C, FOGLIATA A, *et al.* Predicting survival and local control after radiochemotherapy in locally advanced head and neck cancer by means of computed tomography based radiomics[J]. *Strahlenther Und Onkol*, 2019, 195(9): 805-818.
- [12] ZHUO E H, ZHANG W J, LI H J, *et al.* Radiomics on multimodalities MR sequences can subtype patients with non-metastatic nasopharyngeal carcinoma (NPC) into distinct survival subgroups[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(10): 5590-5599.
- [13] FENG M, YANG C G, CHEN X J, *et al.* Computed tomography number changes observed during computed tomography-guided radiation therapy for head and neck cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2015, 91(5): 1041-1047.
- [14] KOU J, PENG J Y, LV W B, *et al.* A serial MRI-based deep learning model to predict survival in patients with locoregionally advanced nasopharyngeal carcinoma [J]. *Radiol Artif Intell*, 2025, 7(2): e230544.
- [15] FENG M, YIN Q P, REN J, *et al.* Dynamic three-dimensional ADC changes of parotid glands during radiotherapy predict the salivary secretory function in patients with head and neck squamous carcinoma[J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 651537.
- [16] WANG H, FAN M, YAN L, *et al.* Early prediction of parotid glands secretory function based on ADC variations during radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma: a phase II prospective study[J]. *Radiat Oncol*, 2025, 20(1): 117.
- [17] HUANG L X, YANG Z X, ZENG Z S, *et al.* MRI-based radiomics models for the early prediction of radiation-induced temporal lobe injury in nasopharyngeal carcinoma[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1135978.
- [18] WANG L, QIU T, ZHOU J W, *et al.* A pretreatment multiparametric MRI-based radiomics-clinical machine learning model for predicting radiation-induced temporal lobe injury in patients with nasopharyngeal carcinoma[J]. *Head Neck*, 2024, 46(9): 2132-2144.
- [19] DÖRRICH M, BALK M, HEUSINGER T, *et al.* A multimodal dataset for precision oncology in head and neck cancer[J]. *Nat Commun*, 2025, 16(1): 7163.

(收稿日期:2025-06-30;编辑:郭翠 张翰林)