

CT影像组学模型预测肺腺癌EGFR基因突变的价值与研究进展

向俊桦¹, 邓 宏², 刘 强², 魏仁国^{2*}

¹吉首大学医学院, 湖南 吉首

²吉首大学第一附属医院(湘西土家族苗族自治州人民医院)影像中心, 湖南 吉首

收稿日期: 2026年7月14日; 录用日期: 2026年8月8日; 发布日期: 2026年8月18日

摘 要

肺癌是全球发病率和死亡率的最高恶性肿瘤之一, 主要的病理类型是非小细胞肺癌(Non-small cell lung cancer, NSCLC), 约占85%, 目前NSCLC中又以肺腺癌最为常见。表皮生长因子受体(Epidermal growth factor receptor, EGFR)与肺腺癌的发生、发展密切相关, 约50%肺腺癌患者存在EGFR基因突变。近年来随着靶向治疗和免疫治疗等新型疗法的快速发展, 临床上伴随EGFR突变的肺腺癌患者使用表皮生长因子受体酪氨酸激酶抑制剂(Epidermal growth factor receptor tyrosine kinase inhibitors, EGFR-TKIs)进行靶向治疗取得了明显成效, 且极大程度提高了晚期肺腺癌患者的存活时间, 因此基因检测显得尤为重要。以往基因检测常依赖于穿刺活检, 近年来随着影像组学的不断发展, 基于肺腺癌的影像学特征建立影像组学模型无创性地预测患者EGFR突变状态取得了较为满意的成果。本文就近5年影像组学模型预测肺腺癌EGFR基因突变的研究进展进行综述。

关键词

肺腺癌, 影像组学, EGFR基因突变, 体层摄影术, X线计算机

Value and Research Progress of CT-Based Radiomics Models in Predicting EGFR Genetic Mutations in Lung Adenocarcinoma

Junhua Xiang¹, Hong Deng², Qiang Liu², Renguo Wei^{2*}

¹School of Medicine, Jishou University, Jishou Hunan

²Imaging Center, The First Affiliated Hospital of Jishou University (People's Hospital of Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture), Jishou Hunan

*通讯作者。

文章引用: 向俊桦, 邓宏, 刘强, 魏仁国. CT影像组学模型预测肺腺癌EGFR基因突变的价值与研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(8): 1476-1482. DOI: 10.12677/acm.2026.1682925

Received: July 14, 2026; accepted: August 8, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

Lung cancer is one of the malignant tumors with the highest morbidity and mortality worldwide, and its major pathological type is non-small cell lung cancer (NSCLC), which accounts for approximately 85%. Currently, lung adenocarcinoma is the most common subtype of NSCLC. The epidermal growth factor receptor (EGFR) is closely associated with the occurrence and progression of lung adenocarcinoma, and approximately 50% of patients with lung adenocarcinoma harbor EGFR gene mutations. In recent years, with the rapid development of novel therapies such as targeted therapy and immunotherapy, clinically, patients with lung adenocarcinoma harboring EGFR mutations have achieved significant therapeutic outcomes with epidermal growth factor receptor tyrosine kinase inhibitors (EGFR-TKIs), and survival time has been substantially prolonged for patients with advanced lung adenocarcinoma. Therefore, gene testing is particularly important. Historically, genetic testing predominantly relied on core needle biopsy. In recent years, with the continuous advancement of radiomics, satisfactory results have been achieved in developing radiomics models based on imaging features of lung adenocarcinoma to noninvasively predict the EGFR mutation status of patients. This article reviews the research progress of radiomics models for predicting EGFR mutations in lung adenocarcinoma over the past five years.

Keywords

Lung Adenocarcinoma, Radiomics, EGFR Gene Mutation, Tomography, X-Ray Computer

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. 引言

目前肺癌是全球死亡率和发病率最高的恶性肿瘤之一[1]。其主要病理类型为非小细胞肺癌(Non-small cell lung cancer, NSCLC) [2]。据统计, NSCLC 约占肺癌患者总数的 85%, 且恶性程度较高[3], 目前肺腺癌已超过肺鳞癌成为 NSCLC 最常见的亚型[4]。表皮生长因子受体(Epidermal growth factor receptor, EGFR)与肺腺癌的发生、发展密切相关[5]。近年来靶向治疗和免疫治疗为代表的新型疗法快速发展, 临床上对于伴 EGFR 突变的肺腺癌患者使用表皮生长因子受体酪氨酸激酶抑制剂(Epidermal growth factor receptor tyrosine kinase inhibitor, EGFR-TKI)进行靶向治疗取得了明显成效, 极大程度改善了患者的无进展生存期, 且明显延长了晚期肺腺癌患者的存活时间。而基因突变状态的检测依赖于组织活检, 常为有创的取样方法, 同时检测耗时较长且费用较为昂贵[6]。近年来随着人工智能的不断发展, 基于 CT 成像的无创性、可重复性, 通过提取影像图像特征建立影像组学深度学习模型预测肺腺癌患者 EGFR 突变的价值愈加明显。本文旨在综述近 5 年 CT 影像组学模型预测肺腺癌患者 EGFR 突变的价值与相关研究进展, 评估其临床应用价值。

2. EGFR 基因突变相关特征研究

王斌等[7]将 132 例经病理活检证实肺腺癌患者突变组与野生组的 CT 特征进行回顾分析, 结果显示突变组支气管充气征出现概率更高, 且肿瘤最大径通常较小, 而野生组空洞、肺气肿出现概率更高。徐

春阳等[8]提取了 312 例经病理证实的 NSCLC 患者的 CT 纹理特征, 进行多因素逻辑回归分析, 表明峰度、能量、自相关、熵值是预测 NSCLC 患者 EGFR 突变重要 CT 纹理特征。Sacconi 等[9]对 68 例肺腺癌患者的 CT 特征进行多变量分析, 发现支气管充气征和局部浸润是 EGFR 基因突变的独立预测因素。Algharras 等[10]研究发现突变组肿瘤直径明显小于野生组, 且肺气肿可能是 EGFR 基因突变的保护因素。张国晋等[11]与李淑华等[12]研究结果表明女性、无吸烟史是 EGFR 基因突变的重要预测因素。传统影像学特征主要依赖放射科医生肉眼观察与主观判断, 肉眼识别的影像特征存在一定局限性, 是主观的、定性的, 难以量化肿瘤的异质性, 而影像组学能提取纹理特征、小波特征等定量指标, 更为客观反映肿瘤内部的异质性, 为 EGFR 突变预测提供更为客观、可重复的量化依据。

3. 影像组学技术流程

利用影像组学对肺腺癌患者进行 EGFR 突变预测具体技术流程包括图像的采集、感兴趣区域(ROI)分割、影像特征提取与筛选、模型构建与验证。

3.1. 图像的采集

CT 检查的关键参数包括管电压、管电流、螺距、层厚、重建算法等。

3.2. 感兴趣区域分割

ROI 分割包括手动分割、半自动分割和全自动分割, 这一步骤是确定图像分析区域的关键。以往以手动分割为主, 是由经验丰富的放射科诊断医生完成, 精准度较高, 但缺点是耗时、主观性强, 存在观察者间变异[13], 因此常需要 2 名或以上高年资医生参与, 产生分歧时需协商达成一致。近年来, 基于深度学习的自动分割技术得到了快速的发展, 高续[14]等研究将深度学习自动分割技术与影像组学相结合构建预测肺腺癌 EGFR 突变的模型, 在提升效率的同时保证了感兴趣区域分割的一致性, 结果显示基于深度学习自动分割技术构建的影像组学模型有较高的诊断效能, 甚至优于临床模型, 且训练组与验证组均具有较高的曲线下面积(AUC)。

3.3. 影像特征提取与筛选

从分割后的 ROI 中可提取定量特征与定性特征。定量特征: 病灶大小、CT 值、纹理特征及小波特征等。定性特征: 病灶部位、分叶征、毛刺征、血管集束征、胸膜凹陷征等。上述影像组学特征数量通常极为庞大, 可达上千个, 利用特征筛选方法后可以筛选出 $P < 0.05$ 的影像组学特征保留并用于模型构建。蓝波[15]使用最小绝对收缩和选择算子(Least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)、10 折交叉验证算法等从 1102 例影像组学特征中筛选出 10 个最佳影像组学特征用于模型构建。

3.4. 模型构建与验证

筛选出关键特征后, 进一步利用机器学习算法构建影像组学预测模型。常用的算法包括逻辑回归、随机森林、支持向量机、深度学习等。模型构建还需要将数据集按照一定比例(如 7:3)随机划分为训练集和验证集, 其中训练集用于模型构建, 验证集用于模型性能的评估。为了对模型的预测效能进行客观的评价, 常用的评价指标包括: 受试者工作曲线(ROC)、AUC、准确度、敏感度和特异度等。

4. 影像组学预测模型的研究进展

4.1. 传统机器学习模型

传统机器学习模型在 CT 影像组学预测肺腺癌 EGFR 突变的研究中被广泛应用, 此类模型先提取预

定义的 CT 特征、临床特征及影像组学特征, 经过筛选后输入分类器进行训练。一项针对 194 例肺腺癌患者的回顾性研究中, 采用逻辑回归、随机森林和支持向量机三种机器学习模型分别建立了 CT 特征模型、临床模型及联合特征模型, 结果表明联合模型在训练集和测试集中均表现出最佳的预测性能, 在训练集中支持向量机模型性能最佳, AUC 达到了 0.877, 而在测试集中逻辑回归模型表现优于支持向量机和随机森林模型, AUC 为 0.827 [16]。另一项研究将肿瘤标志物血清癌胚抗原(CEA)联合 CT 特征建立逻辑回归模型, AUC 为 0.818, 特异度为 71.8%, 敏感度为 80.3% [7]。

上述研究结果表明, 基于传统机器学习算法的 CT 影像组学模型能够较好地预测肺腺癌 EGFR 基因突变, 尤其逻辑回归模型具有较高的预测价值。

4.2. 深度学习模型

深度学习模型是近年兴起的一种方法, 它可以自动从原始图像中学习抽象特征, 无需人工干预, 一定程度上减少了主观因素的影响, 且可以避免传统影像组学模型特征提取、选择和模型构建等一系列复杂程序[17]。黄栌等有[17]使用 LASSO 回归方法筛选出 9 个最佳影像组学特征用于构建随机森林、支持向量机、影像组学评分三种影像组学模型, 并且输入 ResNet 深度学习网络中构建深度学习模型, 比较四种模型的预测性能, 结果显示深度学习模型的 AUC 为 0.916、敏感度为 0.879、特异度为 0.914, 显著高于另外三种传统影像组学模型。另一项研究结果表明在测试队列中深度模型 AUC 为 0.701, 而影像组学模型 AUC 仅为 0.685, 说明了深度学习模型可以挖掘图像的更深层次特征[18]。Zhao 等[19]结合卷积神经网络和 Transformer 的优点, 开发了一种新的网络架构 Denseformer, 直接学习三维全肺 CT 图像的空间位置信息, 实现了对 EGFR 基因突变状态的端到端预测。

4.3. 多参数融合模型

随着能谱 CT 成像技术的不断发展, 双能量 CT (DECT) 凭借其独特的双能成像及后处理技术可以对病变进行客观定量及多参数分析[20], 甚至对病变达到分子水平的分析。目前有部分学者将双能量 CT 的定量参数特征与 CT 特征、临床特征及影像组学特征相结合建立多参数融合模型。于蕾等[21]研究发现 EGFR 突变组动脉期碘浓度、标准化碘浓度、能谱曲线斜率及静脉期碘浓度高于 EGFR 野生组, 差异具有统计学意义。单独使用 DECT 定量参数模型预测 EGFR 突变时, AUC 为 0.746, 当联合临床特征、CT 特征后 AUC 达到了 0.819 [21]。冯丽萍等[22]融入了 MRI 参数, 对于肺腺癌脑转移灶及瘤周水肿进行表观扩散系数(ADC)测量, 并且与 DECT 定量参数成像联合建立逻辑回归模型预测肺腺癌脑转移患者 EGFR 基因突变, 结果显示 AUC 为 0.846, 敏感度为 80.0%, 特异度为 81.7%。以上研究证实了多参数融合模型预测 EGFR 基因突变具有较高的价值。

5. 影像组学模型在患者预后及疗效评估中的价值

在实现预测 EGFR 基因突变后, 下一个关键的临床问题是评估靶向治疗的反应, 近年来影像组学在这一领域同样展现出巨大的潜力。临床上血清 CEA 常用于肺癌的辅助诊断, 随访过程中也用于疗效、预后的评估以及对复发进行检测。Yang 等[23]研究发现血清 CEA 水平升高与 EGFR-TKI 更好的治疗反应相关。但有相关研究结果显示血清 CEA 水平与 EGFR-TKI 的疗效没有明显的相关性[24] [25]。既往研究[26]表明治疗前的影像组学特征对晚期 NSCLC 患者治疗反应和预后具有较高的预测价值。邹佳军等[27]研究采用 CT 纹理特征对接受 EGFR-TKI 靶向治疗的肺腺癌患者进行疗效评估, 结果显示灰度共生矩阵熵、分位数 0.975、灰度共生矩阵相关、逆差距、和平均五项特征参数在接受治疗前后有显著的差异, 对五项参数进行整合后 AUC 达到了 0.744。另一项研究从 322 名 NSCLC 患者治疗前的 CT 图像提取出 1946

个影像组学特征, 经过进一步筛选识别出 6 个独立预测特征并用于模型构建, AUC 为 0.746, 这表明治疗前的 CT 影像组学特征是有前景的预后标志物[28]。贺安晶[25]研究结果显示利用影像组学评分可以帮助患者实行风险分层, 有助于临床医生制定治疗决策, 对患者实施个性化管理。Li [29]等开展了一项两中心研究, 基于非增强 CT 图像特征建立 delta 影像组学模型在出现影像学进展前识别出了对 EGFR-TKI 早期获得耐药的肺腺癌患者, 在外部测试队列中其 AUC 达到了 0.661, 该项研究结果证实了影像组学模型早期识别耐药患者的准确性, 一定程度上可以改善早期耐药患者的临床结局。有研究指出使用增强 CT 图像提取影像组学特征可进一步提升模型预测性能, 因为能更清晰显示肿瘤内部血管分布, 进一步观察药物抑制肿瘤血管生成的抗肿瘤作用[30]。

以上研究结果显示影像组学模型在预测患者预后、评估疗效中的价值, 帮助临床医生对患者进行风险分层、早期识别耐药情况, 最终达到改善患者的临床结局的目的。

6. 研究的局限性

大多数现有研究属于单中心、回顾性研究, 样本量有限, 选择偏倚难以避免, 因此未来需要更多的多中心、前瞻性、大样本量研究对模型的性能进行验证, Zhang 等[31]开展的多中心研究结果显示其应用的诺模图在验证集中表现出了良好的预测性能。此外, 标准化问题也是目前影像组学应用于临床的关键因素, 目前从 CT 图像采集到 ROI 分割和特征提取尚缺乏统一标准和规范, 因此目前已有的许多研究结果之间不能直接比较和验证。

7. 总结与展望

CT 影像组学作为一种无创、便捷的技术, 其在预测肺腺癌 EGFR 基因突变方面展现出了巨大的潜力, 随着深度学习模型、多参数融合模型的发展, 模型的预测性能不断地提高, 并且还能识别出对 EGFR-TKI 早期耐药的肺腺癌患者。相信随着未来多中心研究的开展、技术流程的规范化, 影像组学模型将会成为肺腺癌 EGFR 基因突变无创检测的重要工具。

基金项目

吉首大学校级课题资助项目(Jdzd24044)。

参考文献

- [1] Zhang, Y., Luo, G., Etzeberria, J. and Hao, Y. (2021) Global Patterns and Trends in Lung Cancer Incidence: A Population-Based Study. *Journal of Thoracic Oncology*, **16**, 933-944. <https://doi.org/10.1016/j.jtho.2021.01.1626>
- [2] 朱斌, 朱越. EGFR 基因突变对肺腺癌患者 TKI 靶向治疗效果的影响[J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2021, 42(5): 375-379.
- [3] 亓崇东, 徐建平, 朱礼阳, 等. EGFR 基因突变在非小细胞肺癌胸水细胞块中的检测分析[J]. 贵州医药, 2017, 41(1): 3-5.
- [4] Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R.L., Torre, L.A. and Jemal, A. (2018) Global Cancer Statistics 2018: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, **68**, 394-424. <https://doi.org/10.3322/caac.21492>
- [5] 袁世洋, 刘川, 欧阳晓春, 等. 3D 数字 PCR 检测 NSCLC 患者血浆 EGFR T790M 基因突变的临床意义[J]. 检验医学, 2020, 35(8): 806-810.
- [6] 王景亮, 嵇孝丽, 李叶琴, 等. 非小细胞肺癌驱动基因突变的 CT 影像特征研究进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31(8): 897-902.
- [7] 王斌, 韩冬, 于楠, 等. 肿瘤标志物联合 CT 特征对肺腺癌表皮生长因子受体基因突变的预测价值[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2022, 20(2): 158-163.
- [8] 徐春阳, 戴峰, 陈刚, 等. 基于 CT 纹理特征的非小细胞肺癌 EGFR 基因突变预测模型的构建[J]. 新疆医科大学

- 学报, 2020, 43(10): 1357-1362.
- [9] Sacconi, B., Anzidei, M., Leonardi, A., Boni, F., Saba, L., Scipione, R., *et al.* (2017) Analysis of CT Features and Quantitative Texture Analysis in Patients with Lung Adenocarcinoma: A Correlation with EGFR Mutations and Survival Rates. *Clinical Radiology*, **72**, 443-450. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2017.01.015>
 - [10] AlGharras, A., Kovacina, B., Tian, Z., Alexander, J.W., Semionov, A., van Kempen, L.C., *et al.* (2020) Imaging-Based Surrogate Markers of Epidermal Growth Factor Receptor Mutation in Lung Adenocarcinoma: A Local Perspective. *Canadian Association of Radiologists Journal*, **71**, 208-216. <https://doi.org/10.1177/0846537119888387>
 - [11] 张国晋, 孔维芳, 尚兰, 等. 基于术前 CT 影像组学特征预测肺腺癌患者 EGFR 突变状态的研究[J]. 临床放射学杂志, 2023, 42(5): 760-764.
 - [12] 李淑华, 杨昭, 王小雷, 等. 基于 CT 影像组学列线图预测肺腺癌 EGFR 突变的研究[J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(9): 1676-1682.
 - [13] 唐聪聪, 陈艾琪, 杜小萌, 等. 基于 CT 影像组学在非小细胞肺癌表皮生长因子受体突变中的预测价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2023, 21(10): 67-70.
 - [14] 高续, 庞奇, 张宏杰, 等. 基于深度学习自动分割技术的胸部 CT 影像组学模型预测非小细胞肺癌 EGFR 基因突变[J]. 放射学实践, 2025, 40(5): 573-578.
 - [15] 蓝波. 基于 CT 平扫影像组学预测肺腺癌 EGFR 突变状态及 TKI 靶向治疗患者预后研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2025.
 - [16] Yao, Y., Zhang, N., Lu, C., Liu, L., Fu, Y. and Gui, M. (2024) A Predictive Model of Computed Tomography and Clinical Features of EGFR Gene Mutation in Lung Adenocarcinoma. *Science Progress*, **107**. <https://doi.org/10.1177/00368504241293008>
 - [17] 黄栌有, 徐璐, 温林春, 等. CT 影像组学模型及深度学习技术预测肺腺癌 EGFR 突变[J]. 放射学实践, 2022, 37(8): 971-976.
 - [18] Wang, X., Wu, S., Ren, J., Zeng, Y. and Guo, L. (2024) Predicting Gene Comutation of EGFR and TP53 by Radiomics and Deep Learning in Patients with Lung Adenocarcinomas. *Journal of Thoracic Imaging*, **40**, e0817. <https://doi.org/10.1097/rti.0000000000000817>
 - [19] Zhao, S., Li, W., Liu, Z., Pang, T., Yang, Y., Qiang, N., *et al.* (2024) End-to-End Prediction of EGFR Mutation Status with Denseformer. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, **28**, 54-65. <https://doi.org/10.1109/jbhi.2023.3307295>
 - [20] 任庆国, 滑炎卿, 李剑颖. CT 能谱成像的基本原理及临床应用[J]. 国际医学放射学杂志, 2011, 34(6): 559-563.
 - [21] 于蕾, 陈望, 孙乾, 等. 双能量 CT 定量参数联合 CT 征象预测中晚期肺腺癌表皮生长因子受体基因突变[J]. 分子影像学杂志, 2024, 47(8): 811-819.
 - [22] 冯丽萍, 王祥发, 宋芹霞, 等. 双能量 CT 联合脑转移瘤表观扩散系数值预测肺腺癌表皮生长因子受体突变[J]. 实用放射学杂志, 2025, 41(8): 1294-1298.
 - [23] Yang, S., Schultheis, A.M., Yu, H., Mandelker, D., Ladanyi, M. and Büttner, R. (2022) Precision Medicine in Non-Small Cell Lung Cancer: Current Applications and Future Directions. *Seminars in Cancer Biology*, **84**, 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2020.07.009>
 - [24] 王艳, 赵淑钊, 李文钰, 等. CT 影像组学对晚期肺腺癌吉非替尼近期疗效的预测价值[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(11): 1118-1122, 1133.
 - [25] 贺安晶. 基于 CT 影像组学预测晚期肺腺癌靶向治疗短期疗效[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2024.
 - [26] Hong, D., Zhang, L., Xu, K., Wan, X. and Guo, Y. (2021) Prognostic Value of Pre-Treatment CT Radiomics and Clinical Factors for the Overall Survival of Advanced (IIIB-IV) Lung Adenocarcinoma Patients. *Frontiers in Oncology*, **11**, Article 628982. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.628982>
 - [27] 邹佳军, 毛海佳, 夏阳, 等. CT 纹理特征评价埃克替尼治疗肺腺癌疗效的价值[J]. 中国临床医学影像杂志, 2021, 32(7): 476-480.
 - [28] Yang, F., Zhang, J., Zhou, L., Xia, W., Zhang, R., Wei, H., *et al.* (2021) CT-Based Radiomics Signatures Can Predict the Tumor Response of Non-Small Cell Lung Cancer Patients Treated with First-Line Chemotherapy and Targeted Therapy. *European Radiology*, **32**, 1538-1547. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08277-y>
 - [29] Li, X., Zhang, C., Li, T., Lin, X., Wu, D., Yang, G., *et al.* (2023) Early Acquired Resistance to EGFR-TKIs in Lung Adenocarcinomas before Radiographic Advanced Identified by CT Radiomic Delta Model Based on Two Central Studies. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 15586. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42916-2>
 - [30] 李嘉威, 陈雪琴, 朱鲁程, 等. CT 影像组学模型预测安罗替尼治疗晚期非小细胞肺癌疗效的研究[J]. 浙江医学,

2025, 47(20): 2164-2169, 2175.

- [31] Zhang, G., Deng, L., Zhang, J., Cao, Y., Li, S., Ren, J., *et al.* (2022) Development of a Nomogram Based on 3D CT Radiomics Signature to Predict the Mutation Status of EGFR Molecular Subtypes in Lung Adenocarcinoma: A Multi-center Study. *Frontiers in Oncology*, **12**, Article 889293. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.889293>