

基于CT影像及组学特征评估肺磨玻璃结节病理分级的研究进展

孙昌达, 孟 姮

北华大学附属医院急诊一楼CT科, 吉林 吉林

收稿日期: 2026年3月28日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年4月28日

摘 要

肺磨玻璃结节(GGN)是一种肺部常见的非特异性征象, 良恶性GGN的治疗方法及预后不同, 因此准确鉴别GGN具有重要的临床意义。影像组学可以从影像图像中高通量地提取影像特征, 并从中推断出可能包含预后信息的基因蛋白表型或特征。CT影像组学可以鉴别GGN的良恶性, 预测恶性GGN的病理分型并评估其侵袭性, 为肺GGN个体化诊疗方案的选择提供有力的依据。为此本文将综述传统CT形态学特征、影像组学定量参数在GGN病理分级中的应用, 多参数融合预测模型的构建现状, 分析模型泛化能力不足、临床转化困难等当前研究挑战, 并展望标准化扫描方案、多组学联合等未来发展趋势, 旨在为临床实现GGN的个体化精准管理提供理论参考。

关键词

基于CT影像, 组学特征, 肺磨玻璃结节, 病理分级

Research Progress on Pathological Grading of Pulmonary Ground-Glass Nodules Based on CT Imaging and Omics Features

Changda Sun, Heng Meng

CT Department, First Floor of Emergency Room, Affiliated Hospital of Beihua University, Jilin Jilin

Received: March 28, 2026; accepted: April 22, 2026; published: April 28, 2026

Abstract

Pulmonary ground-glass nodules (GGNs) are a common nonspecific pulmonary finding. The treatment

and prognosis of benign and malignant GGNs differ, making accurate differentiation clinically significant. Imaging omics can extract high-throughput imaging features from images and infer gene/protein phenotypes or characteristics potentially containing prognostic information. CT imaging omics can distinguish benign from malignant GGNs, predict pathological subtypes of malignant GGNs, and evaluate their invasiveness, providing robust evidence for personalized treatment strategies. This review summarizes the application of traditional CT morphological features and imaging omics quantitative parameters in GGN pathological grading, the current status of multi-parameter fusion prediction models, and analyzes existing research challenges such as limited model generalization and clinical translation difficulties. Future trends include standardized scanning protocols and multi-omics integration, aiming to provide theoretical references for clinical precision management of GGNs.

Keywords

CT-Based Imaging, Omics Features, Pulmonary Ground-Glass Nodules, Pathological Grading

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

在《“健康中国 2030”规划纲要》¹的背景下, 癌症早期筛查与规范化诊疗已经被纳入国家重大公共健康领域, 而肺癌是目前发病率最高的肿瘤之一, 其防控已经上升到一个新的高度。随着低剂量计算机断层扫描(LDCT)的普及, 肺磨玻璃结节(GGN)检出率明显升高, 其精准管理是当前胸外影像领域亟待解决的关键科学问题。GGN 在影像学上表现为肺内模糊的云雾状密度影, 其病理本质对应从腺体前驱病变到浸润性腺癌连续生物学谱系。目前临床对 GGN 的评估仍以放射科医师对 CT 影像形态学特征的主观判读为主, 结果易受个人经验影响, 观察者间一致性难以保证; 同时, 对性质不确定的 GGN 采取的被动定期随访策略, 不仅加剧患者焦虑与医疗负担, 还可能错过最佳治疗时机。自影像组学概念正式提出以来, 利用 CT 图像建立的多层次量化指标能够提供客观量化的诊断标准, 是目前临床上最具挑战性的研究课题。本文结合近年来相关研究成果, 从 GGN 病理分级体系、传统 CT 影像学特征应用、影像组学定量参数价值、多参数融合模型构建等方面, 综述基于 CT 影像及组学特征评估 GGN 病理分级的研究进展, 并对其面临的问题和前景进行初步探讨, 以期为该病的诊断和治疗提供借鉴[1]。

2. 肺磨玻璃结节的病理分级体系与临床诊疗需求

肺癌是一种常见的恶性程度高、预后较差的疾病, 其恶性程度与肿瘤恶性程度呈正相关, 随着疾病进展程度的提高, GGN 对应的肺腺癌病变分为三大类, 形成连续的病理演进谱系, 且不同分级的诊疗策略具有明显差异, 凸显了术前精准病理分级的临床必要性。第一类为腺体前驱病变, 如不典型腺瘤样增生、原位腺癌等, 这一类型是在没有穿透基膜的情况下, 此类病变属于肺癌浸润前阶段, 肿瘤细胞未突破基底膜, 无侵袭性。不典型腺瘤样增生为轻度至中度的肺泡上皮不典型增生, 是肺腺癌发生的一个重要标志。原位腺癌是指在肺泡壁上出现鳞状化生的增生, 同时伴有间质、血管或胸膜的侵犯[2]。二者均为惰性病变, 生长缓慢, 临床仅需行局部切除手术, 五年生存率几乎 100%。第二类为微浸润腺癌(MIA), 指肿瘤浸润灶最大径 ≤ 5 mm 的肺腺癌, 仅限于间质区, 无血管和胸膜侵犯, 无淋巴结转移。MIA 是一

¹<https://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/c100132/201610/cef9821abcf4544bb27e2bc533bd7cf.shtml>

种高度恶性的肿瘤, 经手术切除 5 年存活率超过 95%, 且术后无需辅助治疗, 其诊治方式类似于腺癌, 但需要进行常规的随访, 防止疾病进一步发展。第三类为侵袭性腺癌(IAC), 是一种恶性程度较高的腺癌, 主要表现为侵袭性病变, 侵袭至肺间质、血管或胸膜, 并伴有淋巴结转移。IAC 恶性程度显著升高, 其恶性程度较高, 需要进行常规全叶手术加全身淋巴结清扫, 部分中晚期患者还需接受术后化疗、靶向治疗等辅助治疗, 其预后与侵袭转移关系密切, 侵袭范围大则预后不良。在实际工作中, 如果忽视将其与癌前或癌旁组织进行鉴别诊断, 不仅会造成不恰当的诊治, 还会使患者术后复发和转移的风险增大; 如果将不典型腺瘤样增生、原位腺癌或 MIA 与 IAC 相混淆, 可能会加重患者病情, 影响患者呼吸功能, 降低患者的生存质量。准确鉴别病变级别, 是临床实施个性化诊治的重要前提, 对降低肺癌死亡率和提高患者生活质量具有重要意义[3]。

3. 传统 CT 影像学特征在 GGN 病理分级中的应用

常规 CT 检查是诊断肺部结节的基本手段, 主要通过影像学检查明确病变的类型, CT 影像特征主要有分叶征、毛刺征、胸膜凹陷征、血管束征、支气管充气征、空泡征等, 这些特征与病变程度相关, 可为早期诊断提供参考。分叶征以不规则的分裂叶边界为特征, 其发生与肿瘤生长不均匀、周围肺组织和支气管阻塞密切相关, 是其侵袭转移的主要特征。食管腺癌患者中分叶征的比例较腺癌前病变和 MIA 均较高, 并随分化程度的增加而加重; 表皮毛刺可分为短毛刺和长毛刺, 短毛刺是由于癌细胞侵入肺部而导致, 在气管上皮癌中发病率高, 而长毛刺多为炎性反应所致, 与病变程度无关。肋窝征是指因受到肿瘤压迫而导致的一种凹状病变, 多见于 MIA 及 IAC, 而在不典型腺瘤样增生和原位腺癌中极少出现。支气管充气征表现为结节内的支气管呈充气状态, 无狭窄或闭塞, 在 GGN 中多为肿瘤细胞沿支气管壁鳞屑样生长所致, 在原位腺癌和 MIA 中发生率较高, 且肺动脉钙化与肺动脉病变关系密切, 容易导致肺动脉狭窄、阻塞。空泡征象主要是由于病灶内部的气泡不能被充分填满而形成, 在原位腺癌及 MIA 中多见, 可用于鉴别侵袭性病变和非侵袭性病变[4]。临床中多由两名及以上经验丰富的放射科医师采用双盲法独立评估 GGN 的 CT 形态学特征, 以提高评估的准确性, 但其评估方法仍然具有一定的缺陷, 所有特征均为定性描述, 缺乏统一的量化标准, 会造成不同程度个体差别, 部分特征在不同病理分级的 GGN 中存在重叠, 传统 CT 多采用二维径线评估结节大小, 这些局限性导致传统 CT 影像学难以满足临床对 GGN 病理分级精准评估的需求[5]。

4. GGN 影像组学定量参数的类型与临床价值

形态学参数是描述 GGN 几何形态的指标, 包括体积、质量、3D 长径、表面积、最大截面面积、球形度、紧凑度等, 与传统二维径线相比, 三维形态学参数能更准确反映 GGN 的真实大小及生长方式。研究表明, GGN 的体积、3D 长径与病理分级呈正相关, 即腺体前驱病变的体积最小, 其次是 MIA, 最后是 IAC; 球形度反映结节的接近球形程度, 致密度反映了节块的规整性, 而前列腺癌灶的球状度较低, 致密度较低, 预示着肿瘤进展较快; 腺癌灶的球状度更高, 结构更紧凑, 更有规律。纹理特征参数是描述 GGN 内部像素灰度分布及空间关系的指标, 涵盖峰度、偏度、能量、熵等核心维度, 可精准量化肿瘤内部异质性, 与 GGN 病理分化、侵袭模式高度关联[6]。熵反映结节内部像素灰度的混乱程度, 熵值越高代表瘤内病理成分越复杂、细胞排布越无序, 侵袭性腺癌(IAC)因存在贴壁、腺泡样、乳头样等多种生长模式, 瘤内异质性远高于腺体前驱病变与微浸润腺癌(MIA), 因此熵值显著升高, 是预判 GGN 侵袭性的核心纹理指标。峰度是衡量图像各像素的灰度变化的陡度, 而偏度则是衡量各像素点的灰度分布是否均匀, 这两个参数都可以用来指示癌细胞的生长和侵袭情况。能量反映节点内像元的灰度一致性, 能量值越低代表肿瘤组织病理异质性越强、细胞排列越紊乱, 与 GGN 侵袭程度呈负相关, 腺体前驱病变细胞结

构均一, 能量值较高, IAC 因多病理成分混杂, 能量值大幅降低。这些纹理特征参数从微观角度反映了 GGN 的生物学特征, 为病理分级的精准评估提供了补充依据[7]。

5. 多参数融合预测模型的构建与验证

5.1. 多参数融合的必要性的必要性

单一 CT 形态学特征或影像组学定量参数对 GGN 病理分级的预测能力有限, 原因在于部分参数在不同病理分级的 GGN 中存在重叠, 如部分 MIA 的体积与早期 IAC 相近, 难以单独区分[8]。另一方面, GGN 的病理分级受多种因素影响, 包括患者临床资料(年龄、性别、吸烟史、肿瘤家族史等)、CT 形态学特征、影像组学定量参数等, 单一参数无法全面反映 GGN 的生物学特征, 临床、形态学及影像组学特征在预测 GGN 病理分级中的相对权重尚不明确, 因此, 通过多因素分析筛选与病理分级显著相关的特征指标, 构建融合临床资料、CT 影像学特征、影像组学定量参数的多参数预测模型, 成为提升 GGN 病理分级预测准确性的关键方向[9]。

5.2. 多参数预测模型的构建方法与验证

近年来, 多项研究证实多参数融合预测模型的预测效能显著优于单一特征模型。相关学者通过整合临床基础信息、常规 CT 征象及图像组学量化指标, 建立了一个整合的肿瘤侵袭度预测模型对 GGN 浸润性的预测 AUC 达 0.89, 比单纯 CT 诊断模式(AUC=0.72)及单一成像组(AUC=0.81)更好。另有学者利用 AI 技术获取的图像组信息, 融合患者年龄、吸烟史等数据, 建立了一种新的 IAC 诊断方法, AUC 为 0.92, 敏感性 88.5%, 特异度 85.2%。另有学者开展的多中心研究构建的基于实性占比、癌、分叶征的简易预测模型, 其 AUC 可达到 0.87, 便于临床推广。在此基础上, 通过构建针对不同病理分级的亚组预测模型, 如区分腺体前驱病变与 MIA、MIA 与 IAC 的模型, 可提高精准程度, 能为个体化治疗策略的制订提供更加精准的证据[10]。

6. 当前研究面临的核心挑战与瓶颈

虽然 CT 图像组学已显示出明显的临床特点, 但目前尚有许多关键问题有待解决, 如缺乏模型泛化能力、存在临床转化难度等, 这两个问题都有更深层次的临床原因。图像的批量效应和图像的异构性是导致模型推广能力较差的主要原因。由于不同医院 CT 设备型号、扫描层厚、重构核函数、管电压/管电流等扫描参数尚无一致规范, 导致不同仪器、不同参数下获取的多组学特性差异较大, 且具有较强的稳定性。另一方面, 已有的研究大多基于单一中心, 样本量小, 人群地理和基本属性受限, 且病理学黄金标准的评判尺度不一, 导致所建的模型只能适用于局部样本, 而不适用于外部验证组, 难以实现跨中心、跨设备的稳健普及。另外, 一些研究未去除图像伪影、肺部炎症等影响, 导致模型的普适性降低。在实际应用中存在诸多困难, 包括技术层面、流程层面和信任层面。缺乏对模型的解释性, 成像多采用黑匣子模式, 医生缺乏对特征提取、权重分配、预测结果的追踪能力, 对其分类结果的认同程度不高, 导致其临床可采纳程度较差。缺乏匹配的手段, 已有的多个组学分析软件均针对特定科学研究, 导致特征抽取和预测繁琐耗时, 难以适应门诊和急诊高效诊疗的要求。

7. 结束语

综上所述, 肺磨玻璃结节作为肺癌的早期表现, 其病变程度的高低将影响到其诊治方案和患者预后, 对其进行准确的诊断和治疗, 对于提高其早期诊断和治疗水平具有重要意义。传统 CT 影像学特征是 GGN 评估的基础, 但由于患者主观判断, 很难达到精确的分级要求; 影像组学通过从 CT 影像中提取形态学、

密度和纹理等量化指标,可以客观定量地评估骨结节的病变程度,以补充常规CT的缺陷。相信随着技术的不断发展,基于CT影像及组学特征的GGN病理分级评估方法将更加精准、简便、实用,为肺磨玻璃结节的个性化精准管理提供重要依据。

参考文献

- [1] 楼俭茹,黎公科,吕佳洋,等.4种增强能谱CT影像组学模型鉴别肺磨玻璃结节良恶性的预测价值比较[J].新疆医科大学学报,2026,49(2):260-266.
- [2] 贾波,高洁.高分辨率CT对肺部磨玻璃结节良恶性的鉴别诊断价值[J].影像研究与医学应用,2026,10(3):179-181.
- [3] 洪勇,徐婉君,彭剑峰,等.肺腺癌磨玻璃结节病灶CT表现特征预测脏层胸膜侵犯的临床价值[J].中国CT和MRI杂志,2026,24(2):52-55.
- [4] 石宁,王厚革.肺磨玻璃结节诊断中应用肺结节智能辅助诊断系统中的应用价值[J].罕见疾病杂志,2026,33(2):61-63.
- [5] 张金娟.高分辨率CT联合AI定量参数技术对<2cm肺磨玻璃结节的临床诊断价值[J].医学理论与实践,2026,39(2):279-282.
- [6] 周兴宁,李曼,黄永红,等.人工智能联合多层螺旋CT在肺磨玻璃结节定性诊断中的应用[J].中国CT和MRI杂志,2026,24(1):52-55.
- [7] 刘昌建,郑一玲,陈桂柳,等.CT检查中肺磨玻璃结节影像特征对结节良恶性诊断影响研究[J].现代医用影像学,2025,34(12):2210-2213.
- [8] 李国霖.CT引导下微波消融治疗肺磨玻璃结节的临床疗效及安全性分析[J].现代医用影像学,2025,34(12):2230-2232,2237.
- [9] 李艳,李运健.高分辨率CT在表现为纯磨玻璃结节肺腺癌中的诊断价值[J].现代仪器与医疗,2025,31(6):48-52.
- [10] 褚福欣,董思勤,刘加成.基于¹⁸F-FDGPET/CT影像组学的肺磨玻璃结节浸润性研究[J].中国医学影像学杂志,2025,33(12):1346-1351.