

CT 影像组学在急性肺栓塞诊疗中的应用

陈蓉, 宋建霞, 王敏, 于雅茜, 杨越, 芦洋, 杨飞

【摘要】 目前急性肺栓塞(APE)的诊断和治疗取得了重大进展,但其 30 d 总体死亡率仍较高,及时诊断、治疗并评估 APE 患者预后状况至关重要。基于 CT 图像的影像组学能够无创性定量分析 APE 血栓特征,在评估肺实质血流灌注及预测 APE 病情及预后等方面具有重要作用。现就基于 CT 图像的影像组学在 APE 中的应用进展予以综述。

【关键词】 肺栓塞;体层摄影术,X 线计算机;肺动脉;影像组学

【中图分类号】 R563.5;R814.4;R322.121 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2026)02-0228-04

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



目前急性肺栓塞(acute pulmonary embolism, APE)的诊断和治疗取得了重大进展,但其 30 d 总体死亡率仍约为 4%~6%^[1]。研究表明尽管 APE 的院内死亡率已降至<9%,但那些表现出心脏骤停和明显血流动力学不稳定等高风险特征的患者 30 d 全因死亡率超过 40%,主要原因为右心室衰竭^[2-3]。因此,及时诊断、治疗并评估 APE 患者预后状况至关重要。

CT 肺动脉成像(computed tomography pulmonary angiography,CTPA)是目前临床上 APE 患者的一线检查方法,对 APE 的诊断具有很高的敏感度和特异度,对明确栓塞病变部位、阻塞程度以及预后不良评估等有较高价值^[4-5]。影像组学能够从医学图像中提取广泛的特征,利用统计学和机器学习(machine learning,ML)等方法来揭示临床疾病最重要的成像特征。CT 图像中每个像素或体素具有不同的灰度值,借助影像组学分析能够表征病灶组织征象,计算病灶的形状、密度和纹理等信息,可以实现疾病无创性诊断和鉴别、严重程度评估及预测预后等,目前在肿瘤学领域应用广泛^[6-8],在血栓性疾病中的应用逐步引起学者们的关注。影像组学能够在更深层次上对 APE 疾病的 CTPA 图像进行定性、定量分析,根据血栓感兴趣区(regions of interest,ROI)提取和筛选大量组学特征,评估血栓影像组学特征的变化,可以提供肉眼无法识别的疾病信息,并可以通过对肺实质血流灌注的评价对常规 CTPA 无法检出的小栓子提供新的诊断思

路^[9]。本文就近年基于 CT 图像的影像组学在 APE 患者的诊断价值、风险分层、病情严重程度及预后方面的应用进展进行综述。

影像组学新技术在 APE 诊断中的应用与验证

影像组学新技术在 APE 诊断中的应用和验证不断优化,能通过多模态融合等识别微小血栓导致的肺纹理异质性,辅助临床对 APE 进行快速诊断。最新研究表明,基于 CT 图像的影像组学特征预测模型可为诊断 APE 提供有效依据,阮小伟等^[10]利用 Logistic 回归分析方法对建立影像组学预测模型,结果显示验证集受试者工作特征曲线下面积(area under the receiver operating characteristic curve, AUC)为 0.742,其鉴别诊断病例组与对照组的敏感度、特异度及准确率分别为 0.938、0.375、0.656,这对于影像组学在 APE 诊断中应用的可行性给予了客观评价,有望对 APE 的准确诊断,尤其对缺乏直接征象的可疑 APE 提供新的诊断方法和量化依据。Li 等^[11]创新性开发基于非对比增强 CT 的 ML 定量纹理分析,聚焦局部肺灌注(lung perfusion,Q)相关的纹理特征,合成 Q 替代物以辅助 APE 诊断,结果显示模型能够有效区分灌注功能较高或较低的肺区域,该研究还囊括了从 LoG 和小波变换图像中提取的高维特征,通过特征选择和模型优化解决了图像质量限制,有助于精准定位灌注缺损区域,从而提高 APE 疾病和其他与灌注状况相关的肺部疾病的诊断和管理效率,有望作为一种评估肺灌注的替代方法减少侵入性或放射性的检查需求。

此外,Marschner 等^[12]前瞻性构建影像组学模型以区分健康犬和患 APE 犬,经过 CTPA 分割、灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM)分析和多变量分类分析,结果显示模型能够出色地区分健

作者单位:075000 张家口,河北北方学院研究生学院(陈蓉、宋建霞、王敏、于雅茜、杨越、芦洋);075000 张家口,河北北方学院附属第一医院医学影像部(杨飞)

作者简介:陈蓉(2000—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事心胸血管疾病影像学研究。

通讯作者:杨飞, E-mail:hiyangfei@126.com

基金项目:2024 年政府资助临床医学卓越培训项目(ZF2024229);2024 年河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2024127)

康犬和患病犬,且与健康犬的肺实质纹理相比,患APE犬的肺实质纹理发生变化,这可能是由于局部嵌入的微小血栓或血管上端阻塞导致了肺实质缺氧,这也证明了基于CTPA图像影像组学分析是区分肺实质灌注状态的有效工具,能够辅助诊断APE。然而该研究并未纳入组织病理学来评估和验证模型准确性。

根据这些研究我们可以得知通过影像组学提取APE的大量高维度特征,能够捕捉APE形成过程中的细微变化,对于APE诊断来说可能有助于更准确地判断血栓成分和形成时间,从而提高APE诊断的敏感性^[13]。不同的检查技术提供了不同的影像信息,例如APE造成肺动脉堵塞时,CTPA可以清晰显示肺动脉解剖结构和血栓分布状况,双能量CT能够观察碘在肺实质内分布情况,碘对比剂减少或分布不均,都可以表现为灌注状态的减少或缺失,这也为APE的诊断提供有效指导^[14],结合影像组学分析,有助于临床医生更全面的了解APE的发生发展。

评估APE病情严重程度与风险分层

影像组学在评估APE病情严重程度和风险分层方面发挥重要作用,依托现有成像技术,能够高效辅助临床决策,实现APE患者管理优化,同时节省诊疗时间和临床资源^[15]。Gotta等^[16]基于双能CT图像和ML分类器,探讨影像组学用于APE患者风险分层的潜力,结果显示APE临床风险分层和影像组学模型之间具有较强的一致性(Kappa=0.984)。该研究证明了基于CT成像的影像组学可以实现准确的APE风险评估(准确率高达90%),尤其是在识别高危APE患者方面性能更强,能够帮助临床及时干预和优化治疗策略,最大限度减少并发症的发生和改善患者临床结果,同时也节省了时间和资源,降低对临床评分系统的依赖性,优化APE患者风险评估和管理^[17]。

目前,越来越多的研究将定量的生物标志物纳入APE临床决策过程和模型开发中^[18]。有学者认为实验室指标与血栓物理性质之间存在相关性,能够辅助临床评估APE疾病的严重程度。Gotta等^[19]在另一项研究中纳入136名APE患者并提取出107个DECT影像组学特征,使用变量重要性和相关性分析方法确定最相关的特征用于建立模型,结果显示模型在训练集和测试集中识别具有复杂病程的APE患者方面具有61%和55%的准确性,受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under curve, AUC)分别为0.63和0.58。该研究表明由CT影像衍生的影像组学特征在识别复杂病程的APE患者方面显示出良好前景,同时该研究发现血栓体积可以预测APE患者并发症和不良结局,能够

有效评估APE严重程度。但在使用这些标志物的同时,也要认识到当前诊断工具的局限性,例如该研究结果中D-二聚体的升高并不一定与血栓相关,恶性肿瘤、感染、手术、外伤等也可引起D-二聚体水平升高^[20],必须通过结合临床和影像数据的前瞻性研究,进一步评估各种标志物的预测价值和临床意义。

影像组学可以充分发挥其优势,将影像数据与患者的临床症状、实验室检查结果等多源信息融合,构建个性化的风险预测模型,实现对APE患者高危人群的精准识别和风险分级,在临床中能够快速锁定高危患者,及时采取治疗措施,同时也能改善APE患者的预后质量。

预测APE患者预后

应用影像组学量化评估APE血栓异质性,准确有效的预测APE患者预后,可以表现在组织结构和新生血管等方面^[21-22]。纹理分析能够从常规CT图像中提取人眼无法识别的高维特征,定量转化为成像生物标志物,已有多数研究显示纹理特征在肿瘤疾病预后方面具有较高的预测价值^[23-25],在APE领域应用前景广阔,可通过表征血栓成分和微观结构,为APE预后预测提供新思路。Leonhardi等^[26]使用纹理分析预测APE患者预后,结果显示插管需求、重症监护室入住率和死亡率均与纹理特征相关,同时发现位于肺动脉干和肺主动脉中的栓子中的纹理特征存在显著统计学差异。Surov等^[27]则聚焦于心脏外膜脂肪组织(epicardial adipose tissue, EAT)影像组学分析,纳入了508名APE患者,通过半自动分割EAT和特征筛选,最终确定了7种不同特征类型的13个特征,Logistic模型结果显示在验证集中预测死亡率的总体正确率分别为88%(30d死亡率)和79%(7d死亡率),AUC分别为0.776和0.724,经外部验证得出AUC分别为0.721和0.750。目前该类研究主要集中于EAT与冠状动脉、房颤及心脏衰竭等疾病的相关性^[28-30],未来可以将测量的EAT与APE参数(如右心室直径/左心室直径比值、血栓体积、肺血管阻塞指数或影像特征等)结合,可能改善临床对APE预后的整体评估。

研究表明肌肉减少症与APE患者30天预后不良相关,尽管已确定的影响效力较低(HR=1.06,95%CI:1.03~1.09,P<0.001)^[31]。Shahzadi等^[32]基于此结论进一步研究了骨骼肌(Skeletal muscle, SM)和肌肉内脂肪组织(intermuscular adipose tissue, IMAT)的影像组学特征对APE患者7d和30d全因死亡率的预测效能,结果显示基于IMAT和SM+IMAT的影像特征在预测APE30d死亡率方面表现出中等效能(IMAT:AUC=0.68,灵敏度=0.57,特异度=0.73;

AM+IMAT; AUC = 0.70, 灵敏度 = 0.74, 特异度 = 0.54), 而用于预测 7 d 死亡率的影像特征总体预测性能较低; 在生存期少于 30 d 的 APE 患者中, CT 特征 stat_skew 在肌内脂肪中浓度较高, morph_pca_elongation 特征值较低, 可能与肌肉流失和虚弱有关, 且肌内脂肪堆积形成较多相似灰度的小区域, 这也是预测 APE 患者生存期的重要指标。

目前人体组织成分及其影像组学与疾病预后之间的研究仍处于起步阶段, 现有的研究结果表明, 除血栓外, 其他身体组织也对 APE 预后存在预测作用, 这与 APE 生存率之间可能存在复杂的因果关系, 其背后的生物学机制尚待明确。现阶段的研究结果为进一步探索 APE 预后提供了有价值的参考方向, 但仍需要临床大样本量和前瞻性研究进行验证和完善。

小结与展望

综上所述, 基于 CT 影像的影像组学在 APE 疾病中的应用仍处于发展阶段, 在 APE 疾病诊断、预后及严重程度评估中虽有一定的可行性但其准确率受到多种因素影响, 例如: ①缺乏大量的标准化临床数据, 不同的扫描设备、扫描参数和重建方法会引起结果偏差; ②精准勾画 ROI 仍然受限, APE 栓子易受边缘模糊或周围组织伪影的影响不能精准确定, 常需要研究者手动修改或勾画, 导致工作量大、耗费时间、增加负担和主观偏差等, 未来可以完善、提高 APE 自动化识别流程和能力, 研发、创新分割工具, 实现研究对象标准化; ③总体来看影像组学在 APE 疾病方面的研究仍较为缺乏, 未来研究可以将影像组学与其他人工智能技术结合, 减少人工提取特征的步骤, 提高诊断和鉴别 APE 的能力; ④与临床紧密连接开展多中心、前瞻性和大样本量的研究, 将影像组学研究成果转化为临床实践。在未来需要跨学科合作, 包括医学、统计学和计算机科学等领域的专家共同努力, 提升影像组学在 APE 疾病领域的临床应用价值。

参考文献:

- [1] Osho AA, Dudzinski DM. Interventional therapies for acute pulmonary embolism[J]. Surg Clin N Am, 2022, 102(3): 429-447.
- [2] Goldberg JB, Giri J, Kobayashi T, et al. Surgical management and mechanical circulatory support in high-risk pulmonary embolisms: historical context, current status, and future directions: a scientific statement from the American Heart Association[J]. Circulation, 2023, 147(9): e628-e647.
- [3] Tehrani BN, Batchelor WB, Spinosa D. High-risk acute pulmonary embolism: where do we go from here? [J]. J Am Coll Cardiol, 2024, 83(1): 44-46.
- [4] 孙森, 张金玲. CT 肺动脉成像对急性肺栓塞早期风险分层及预后的研究进展[J]. 放射学实践, 2024, 39(9): 1250-1253.
- [5] 张会阳, 李翔, 杨欣, 等. 基于 CT 肺血管成像肺栓塞人工智能检测效能的临床研究[J]. 放射学实践, 2024, 39(9): 1166-1171.
- [6] Berbis MA, Godino FP, Rodriguez-Comas J, et al. Radiomics in CT and MR imaging of the liver and pancreas: tools with potential for clinical application[J]. Abdom Radiol (NY), 2024, 49(1): 322-340.
- [7] Warkentin MT, Al-Sawaihey H, Lam S, et al. Radiomics analysis to predict pulmonary nodule malignancy using machine learning approaches[J]. Thorax, 2024, 79(4): 307-315.
- [8] van Griethuysen JJM, Fedorov A, Parmar C, et al. Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype[J]. Cancer Res, 2017, 77(21): e104-e107.
- [9] 阮小伟. 基于 CT 图像的影像组学在肺栓塞诊断中的应用研究[D]. 宁夏医科大学, 2020. DOI: 10.27258/d.cnki.gnxy.2020.000234.
- [10] 阮小伟, 杨彦兵, 吴林桦, 等. CT 图像影像组学模型在肺栓塞诊断中的应用价值[J]. 宁夏医学杂志, 2025, 47(2): 115-118. DOI: 10.13621/j.1001-5949.2025.02.0115.
- [11] Li Z, Zhao M, Li Z, et al. Quantitative texture analysis using machine learning for predicting interpretable pulmonary perfusion from non-contrast computed tomography in pulmonary embolism patients[J]. Respir Res, 2024, 25(1): 389.
- [12] Marschner CB, Kokla M, Amigo JM, et al. Texture analysis of pulmonary parenchymateous changes related to pulmonary thromboembolism in dogs—a novel approach using quantitative methods[J]. BMC Vet Res, 2017, 13(1): 219.
- [13] Jolugbo P, Ariens RAS. Thrombus composition and efficacy of thrombolysis and thrombectomy in acute ischemic stroke[J]. Stroke, 2021, 52(3): 1131-1142.
- [14] 锁咏梅, 宋贤亮, 章辉庆, 等. 双能量 CT 肺灌注成像的定量参数诊断肺栓塞的临床应用价值[J]. 医学影像学杂志, 2021, 31(2): 247-250.
- [15] 巩立鑫, 董迪, 田捷. 基于 AI 和医疗大数据的影像组学研究及其临床应用[J]. 中华医学信息导报, 2019, 34(22): 22.
- [16] Gotta J, Koch V, Geyer T, et al. Imaging-based risk stratification of patients with pulmonary embolism based on dual-energy CT-derived radiomics[J]. Eur J Clin Invest, 2024, 54(4): e14139.
- [17] 刘再毅. 影像组学的临床价值及面临的挑战[J]. 协和医学杂志, 2018, 9(4): 295-297.
- [18] 张慧芳, 郭奋凯, 陈娟霞, 等. sPESI 联合 RDW、NLR、MLR 对非高危急性肺栓塞患者早期风险的预测价值[J]. 宁夏医科大学学报, 2024, 46(8): 814-818.
- [19] Gotta J, Gruenewald LD, Geyer T, et al. Indicators for hospitalization in acute pulmonary embolism: uncover the association between D-dimer levels, thrombus volume and radiomics[J]. Acad Radiol, 2024, 31(6): 2610-2619.
- [20] 张建泉, 沈智勇, 龚海鹏, 等. 肺动脉 CTA 与 D-二聚体对肿瘤患者肺栓塞诊断的一致性研究[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(1): 72-74.
- [21] Liu Z, Zhang S, Wang Y, et al. Posterior circulation ischemic stroke: radiomics-based machine learning approach to identify onset time from magnetic resonance imaging[J]. Neuroradiology, 2024, 66(7): 1141-1152.
- [22] Wei L, Pan X, Deng W, et al. Predicting long-term outcomes for acute ischemic stroke using multi-model MRI radiomics and clinical variables[J]. Front Med (Lausanne), 2024, 11: 1328073.

- [23] Mayerhoefer ME, Materka A, Langs G, et al. Introduction to radiomics[J]. J Nucl Med, 2020, 61(4): 488-495.
- [24] Kocak B, Baessler B, Cuocolo R, et al. Trends and statistics of artificial intelligence and radiomics research in Radiology, Nuclear Medicine, and Medical Imaging: bibliometric analysis[J]. Eur Radiol, 2023, 33(11): 7542-7555.
- [25] 邱云飞, 王月洋. 结合多分支纹理特征提取和注意力机制的肝脏肿瘤自动分割方法[J]. 信息与控制, 2024, 53(5): 673-688.
- [26] Leonhardt J, Bailis N, Lerche M, et al. Computed tomography embolus texture analysis as a prognostic marker of acute pulmonary embolism[J]. Angiology, 2023, 74(5): 461-471.
- [27] Surov A, Zimmermann S, Hinnerichs M, et al. Radiomics parameters of epicardial adipose tissue predict mortality in acute pulmonary embolism[J]. Respir Res, 2024, 25(1): 356.
- [28] 朱庆烨, 文娣娣, 郑敏文. 射血分数降低的心力衰竭患者心外膜脂肪组织与左心室重构和心肌纤维化的相关性分析[J]. 中国循环杂志, 2025, 40(3): 227-233.
- [29] Berman DS, Lin A. Artificial intelligence for assessment of epicardial adipose tissue on coronary CT angiography[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2023, 16(6): 817-819.
- [30] 陈杨, 吕滨. 基于冠状动脉 CTA 影像组学识别高危斑块的研究进展[J]. 放射学实践, 2024, 39(12): 1679-1682.
- [31] Meyer HJ, Wienke A, Surov A. Computed tomography-defined body composition as prognostic markers for unfavourable outcomes and in-hospital mortality in coronavirus disease 2019[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2022, 13(1): 159-168.
- [32] Shahzadi I, Zwanenburg A, Frohwein LJ, et al. Short-term mortality prediction in acute pulmonary embolism: radiomics values of skeletal muscle and intramuscular adipose tissue[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 2024, 15(4): 1430-1440.

(收稿日期: 2024-12-23 修回日期: 2025-06-05)

· 综述 ·

基于 fMRI 的前庭性偏头痛功能脑网络的研究方法

倪政欣, 花孙雨, 余蓝, 王奕超

【摘要】 前庭性偏头痛 (VM) 是一种临床常见的偏头痛类型, 无症状期时诊断困难。随着静息态功能磁共振成像 (rs-fMRI) 的广泛运用, 人们发现了与前庭通路、疼痛通路等相关的重要脑区及结构, 为揭示 VM 的病理生理机制提供了重要依据。本综述通过归纳总结目前相关研究, 探讨其研究方法及其 VM 脑网络特征机制, 旨在体现脑网络分析技术的发展与研究对 VM 早期诊断、疾病进展预测、评估疗效有着重要的作用, 能为 VM 的诊断和治疗提供更精准的线索, 为进一步揭示 VM 及其神经机制提供重要线索。

【关键词】 磁共振成像; 偏头痛; 前庭; 神经网络

【中图分类号】 R445.2; R255.93; R322.8 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2026)02-0231-06

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.017

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



前庭性偏头痛 (vestibular migraine, VM) 是一种临床常见的偏头痛类型, 常发生于女性, 发病年龄在 30~40 岁之间, 但也可以影响其他年龄段。据估计, VM 患病率为 1%~2.7%^[1-2]。临床表现以前庭症状为主, 眩晕可能发生在偏头痛发作之前、期间、之后, 甚至独立发生, 可能持续数秒至数小时或数天。VM 患者除眩晕症状外, 还伴随着头痛、对声音过敏、对光敏感等常见症状, 同时还可能出现耳鸣、耳胀等听觉症状, 急性发作期间还可能会出现自发性或姿势性眼球震颤。在 VM 患者处于无症状发作的间隔期, 通过前

庭测试对疾病诊断的帮助有限。目前 VM 的治疗方法通常借鉴了偏头痛的治疗方法, 包括避免诱发因素、缓解压力, 以及通过药物治疗急性期发作或预防发作等^[3-5]。目前临床诊断是基于国际头痛疾病分类 (the third edition of the international classification of headache disorders, ICHD-3) 的标准确定^[6]。

VM 的发病可能涉及神经元兴奋性异常、血管异常、化学介质失调、基因遗传因素以及大脑网络连接的异常等, 这些因素可能相互作用导致 VM 患者独特的临床表现, 同时这些机制与无先兆偏头痛所表现出的认知功能受损有一定相似性^[7-9]。近年来, 功能脑网络的研究逐渐成为认知神经科学和神经影像学的重要方向。所谓功能脑网络指的是在静息或任务状态下, 空间上分布但在时间上协同活动的一组脑区集合。通过

作者单位: 215009 江苏, 南京中医药大学附属苏州市中医医院放射科

作者简介: 倪政欣 (1986-), 男, 福建建宁人, 硕士, 副主任医师, 主要从事神经影像诊断工作。

通讯作者: 王奕超, E-mail: 113208376@qq.com