

论 著

基于AI辅助诊断系统的CT定量参数对肺磨玻璃结节浸润程度的评估价值*

郭 慧¹ 尚圣云¹ 张艳琦²
解丙坤³ 刘晓钰^{2,*}

1.山东大学齐鲁医院德州医院

呼吸与危重症医学科

2.山东大学齐鲁医院德州医院肿瘤科

3.山东大学齐鲁医院德州医院影像科

(山东 德州 253009)

【摘要】目的 探讨基于人工智能(AI)辅助诊断系统的CT定量参数对肺磨玻璃结节(GGN)浸润程度评估价值。**方法** 回顾性分析2023年1月至2025年1月我院收治的113例GGN患者临床资料,根据GGN病理类型分为非浸润性腺癌(AIS)组、微浸润性腺癌(MIA)组和浸润性腺癌(IAC)组,比较3组间AI辅助诊断系统的CT定量参数差异, Spearman相关分析评估上述指标与GGN病理浸润程度的相关性, ROC曲线分析上述指标对GGN浸润程度的预测价值, Logistic回归分析浸润性GGN的影响因素。**结果** 113例GGN患者中AIS患者31例, MIS患者37例, IAC患者45例, IAC组CT平均值、熵、长径、体积均高于MIS组和AIS组, CT最小值低于MIS组和AIS组, CT最大值高于AIS组, 差异有统计学意义($P<0.05$); 基于AI辅助诊断系统的CT最大值、CT平均值、熵、长径、体积均与GGN浸润程度呈正相关($P<0.05$), CT最小值与GGN浸润程度呈负相关($P<0.05$); CT最大值、CT最小值、CT平均值、熵、长径、体积诊断浸润性GGN(MIS+IAC)的AUC范围在0.636~0.896范围之间($P<0.05$), 诊断IAC的AUC范围在0.644~0.921之间($P<0.05$), 长径的AUC最高; CT最大值、CT最小值、CT平均值、熵、长径、体积均为浸润性GGN的独立影响因素($P<0.05$)。**结论** 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数可用于评估GGN的病理浸润程度, 其中长径对浸润性GGN(MIS+IAC)的诊断效能最高, 具有较高的临床应用潜力。

【关键词】 肺磨玻璃结节; X线计算机断层扫描; 人工智能; 诊断影像; 肿瘤浸润性

【中图分类号】 R563

【文献标识码】 A

【基金项目】 山东省医药卫生科技发展计划项目(202209011090)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.12.014

Evaluation Value of CT Quantitative Parameters Based on AI-assisted Diagnostic System on Invasion Degree of Pulmonary Ground Glass Nodules*

GUO Hui¹, SHANG Sheng-yun¹, ZHANG Yan-qi², XIE Bing-kun³, LIU Xiao-yu^{2,*}.

1.Department of Respiratory and Critical Care Medicine, Qilu Hospital of Shandong University Dezhou Hospital, Dezhou 253009, Shandong Province, China

2.Department of Oncology, Qilu Hospital of Shandong University Dezhou Hospital, Dezhou 253009, Shandong Province, China

3.Department of Imaging, Qilu Hospital of Shandong University Dezhou Hospital, Dezhou 253009, Shandong Province, China

ABSTRACT

Objective To explore the evaluation value of CT quantitative parameters based on artificial intelligence (AI)-assisted diagnostic system on invasion degree of pulmonary ground glass nodules (GGN).

Methods The clinical data of 113 patients with GGN in the hospital from January 2023 to January 2025 were retrospectively analyzed. According to the pathological types of GGN, they were divided into adenocarcinoma in situ (AIS) group, minimally invasive adenocarcinoma (MIA) group and invasive adenocarcinoma (IAC) group. The differences in CT quantitative parameters of AI-assisted diagnostic system were compared among the three groups. Spearman correlation analysis was used to evaluate the correlation between the above indexes and pathological invasion degree of GGN. ROC curve was applied to analyze the predictive value of the above indexes on the invasion degree of GGN. Logistic regression analysis was used to analyze the influencing factors of invasive GGN. **Results** Among the 113 GGN patients, there were 31 AIS patients, 37 MIS patients, and 45 IAC patients. The average CT value, entropy, long diameter and volume in IAC group were higher than those in MIS group and AIS group, and the minimum CT value was lower than that in MIS group and AIS group, and the maximum CT value was higher than that in AIS group ($P<0.05$). The maximum CT value, average CT value, entropy, long diameter and volume based on AI-assisted diagnostic system were positively correlated with the invasion degree of GGN ($P<0.05$), and the minimum CT value was negatively correlated with the invasion degree of GGN ($P<0.05$). The AUC range of maximum CT value, minimum CT value, average CT value, entropy, long diameter and volume in the diagnosis of invasive GGN (MIS+IAC) was between 0.636 and 0.896 ($P<0.05$), and the AUC range in the diagnosis of IAC was between 0.644 and 0.921 ($P<0.05$), and the AUC of long diameter was the highest. Maximum CT value, minimum CT value, average CT value, entropy, long diameter and volume were all independent influencing factors of invasive GGN ($P<0.05$). **Conclusion** The CT quantitative parameters based on AI-assisted diagnostic system can be used to evaluate the pathological invasion degree of GGN, among which the long diameter has the highest diagnostic efficiency on invasive GGN (MIS+IAC) and has high clinical application potential.

Keywords: Pulmonary Ground Glass Nodules; X-ray Computed Tomography; Artificial Intelligence; Diagnostic Imaging; Tumor Invasion

肺磨玻璃结节(ground glass nodule, GGN)是肺癌前病变或早期肺癌的表现,部分亚实性结节(纯GGN、混合GGN)的病理评估结果为肺腺癌,根据浸润程度可分为原位腺癌(adenocarcinoma in situ, AIS)、微浸润性腺癌(minimally invasive adenocarcinoma, MIA)、浸润性腺癌(invasive adenocarcinoma, IAC),因此评估GGN浸润程度对早期肺癌的诊断及治疗决策至关重要^[1-2]。CT可观察结节大小、形态、密度及生长趋势,但CT评估结果受影像学医师经验影响,存在一定的主观性。有研究认为,部分亚实性结节的影像组学特征与肿瘤的侵袭性密切相关^[3]。因此,寻找一种客观、准确且可重复的定量分析方法对提高肺GGN的评估准确性具有重要临床意义。人工智能(artificial intelligence, AI)技术近年来在医学影像分析领域取得了显著进展, AI辅助诊断系统通过自动提取CT定量参数,如结节体积、平均密度、最大密度、边缘特征、纹理分析等,从而对GGN进行更精确的评估,减少人工阅片的主观偏差,提高诊断一致性,且能进行大规模数据分析,有助于建立更可靠的浸润性评估模型^[4-5]。基于此,本文探索了基于AI辅助诊断系统的CT定量参数在评估肺GGN浸润程度中的应用价值,为推动AI技术在肺部影像学诊断中的应用,并为肺癌早期筛查及治疗提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析2023年1月至2025年1月我院收治的113例GGN患者临床资料。

纳入标准: (1)CT检出GGN,经AI辅助诊断系统分析,定量参数完整; (2)GGN最长直径 <3 cm; (3)有完整病理结果。排除标准: (1)患者入组前已有GGN相关治疗史; (2)合并肺炎、肺结核等肺部疾病; (3)合并其他恶性肿瘤; (4)临床资料不全。113例GGN患

【第一作者】 郭 慧, 女, 副主任医师, 主要研究方向: 呼吸与危重症医学。E-mail: xxxr10032025@163.com

【通讯作者】 刘晓钰, 女, 副主任医师, 主要研究方向: 肿瘤内科学。E-mail: 13969238850@139.com

者中男68例，女45例，年龄38~79(58.28±9.52)岁。

1.2 方法 患者入组后进行CT扫描。患者仰卧位，双臂上举过头，吸气屏气后开始扫描，扫描范围为肺尖至肺底。扫描参数：管电压120 kV，自动管电流，层厚5 mm，层间距5 mm，准直器宽度40~80 mm，螺距1.375，矩阵512×512，重建层厚1 mm，重建层间距1 mm，肺窗宽1500 HU，窗位-600 HU。扫描后，将数据传输至工作站，通过AI辅助诊断系统自动勾画GGN，自动生成CT密度直方图并分析，并获取定量参数，包括长径、体积、CT值(最大值、最小值、平均值、中位数、峰度、偏度、熵)。由2位高年资影像学专家共同对AI勾画的GGN进行筛选、检查，记录定量参数。

所有患者均在CT扫描后2 w内进行手术。以术后病理结果进行分组，将患者分为AIS组、MIA组和IAC组。

1.3 统计学方法 数据分析采用SPSS 26.0软件，计量资料用($\bar{x} \pm s$)表示，多组间比较采用单因素方差分析，两两比较

用LSD-t检验，计数资料用n(%)表示，组间比较用 χ^2 检验，Spearman相关分析基于AI辅助诊断系统的CT定量参数与GGN浸润程度的相关性，ROC曲线用于上述参数对GGN浸润程度的诊断价值，Logistic二元回归方程用于分析浸润性GGN的影响因素， $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 3组一般资料比较 113例GGN患者中AIS患者31例，MIS患者37例，IAC患者45例。3组一般资料差异无统计学意义($P>0.05$)，见表1。

2.2 3组基于AI辅助诊断系统的CT定量参数比较 IAC组CT平均值、熵、长径、体积均高于MIS组和AIS组，CT最小值低于MIS组和AIS组，CT最大值高于AIS组，差异有统计学意义($P<0.05$)，见表2、图1。

表1 3组一般资料比较

组别	n	性别(男/女)	年龄	BMI	高血压病	糖尿病	高脂血症	吸烟史
AIS组	31	19/12	56.45±8.76	23.36±0.97	8(25.81)	6(19.35)	10(32.26)	18(58.06)
MIS组	37	21/16	59.19±9.33	22.95±1.13	11(29.73)	9(24.32)	11(29.73)	19(51.35)
IAC组	45	28/17	58.80±10.18	23.11±1.24	13(28.89)	11(24.44)	8(17.78)	23(51.11)
F值		0.275	0.762	1.107	0.140	0.332	2.494	0.424
P值		0.871	0.469	0.334	0.932	0.851	0.287	0.809

表2 3组基于AI辅助诊断系统的CT定量参数比较

组别	n	CT最大值(HU)	CT最小值(HU)	CT平均值(HU)	CT中位数(HU)	CT标准差
AIS组	31	-146.53±157.98	-794.77±133.52	-551.34±93.57	-515.98±78.64	138.09±37.89
MIS组	37	-105.95±114.42	-817.66±134.59	-535.16±114.49	-512.86±116.73	134.18±38.00
IAC组	45	-46.79±108.40*	-939.36±170.72*#	-460.84±101.73*#	-547.18±108.69	135.74±41.09
F值		5.212	10.728	8.572	1.355	0.084
P值		0.007	<0.001	<0.001	0.262	0.919

续表2

	峰度	偏度	熵	长径(mm)	体积(mm ³)
AIS组	3.27±1.11	0.43±0.28	4.19±1.60	7.27±1.81	405.07±321.16
MIS组	3.17±1.21	0.57±0.30	6.12±1.22*	9.64±2.06*	723.79±510.78
IAC组	3.68±1.02	0.47±0.29	7.13±1.44*#	13.34±2.32*#	1974.08±1215.69*#
F值	2.466	2.010	39.767	80.515	38.639
P值	0.090	0.139	<0.001	<0.001	<0.001

注：与AIS组比较，* $P<0.05$ ；与MIS组比较，# $P<0.05$ 。

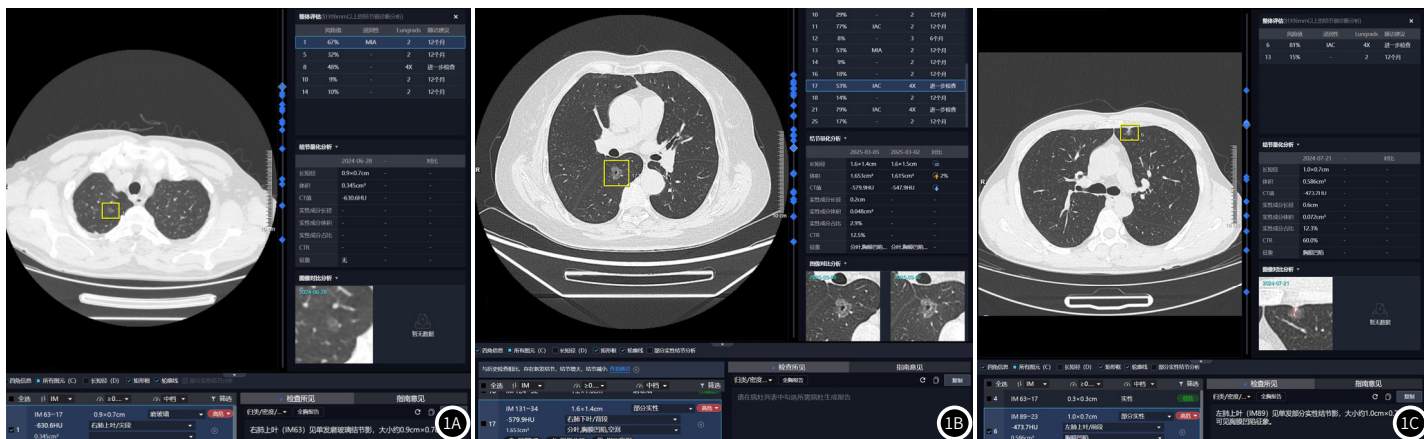


图1 典型病例CT图。1A: AIS组、1B: MIS组、1C: IAC组CT图。

2.3 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数与GGN浸润程度的相关性分析 基于AI辅助诊断系统的CT最大值、CT平均值、熵、长径、体积均与GGN浸润程度呈正相关($P<0.05$), CT最小值与GGN浸润程度呈负相关($P<0.05$), 见表3。

2.4 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数对GGN浸润程度的诊断价值分析 ROC曲线显示, CT最大值、CT最小值、CT平均值、熵、长径、体积诊断浸润性GGN(MIS+IAC)的AUC范围在0.636~0.896范围之间($P<0.05$), 诊断IAC的AUC范围在

0.644~0.921之间($P<0.05$), 长径的AUC最高, 见表4~5、图2。

2.5 Logistic回归分析浸润性GGN的影响因素 将浸润性GGN(MIS+IAC)作为因变量(赋值方法: MIS、IAC=1, AIS=0), CT最大值、CT最小值、CT平均值、熵、长径、体积作为自变量(均为连续变量, 直接输入数值), 采用Logistic二元回归方程分析浸润性GGN的影响因素, 结果显示, CT最大值、CT最小值、CT平均值、熵、长径、体积均为浸润性GGN的独立影响因素($P<0.05$), 见表6。

表3 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数与GGN浸润程度的相关性分析

项目	r	P
CT最大值	0.293	0.002
CT最小值	-0.378	<0.001
CT平均值	0.346	<0.001
熵	0.637	<0.001
长径	0.765	<0.001
体积	0.610	<0.001

表4 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数对浸润性GGN的诊断价值分析

项目	AUC	cut-off值	敏感度(%)	特异度(%)	95% CI	P值
CT最大值	0.636	-177.33 HU	82.93	51.61	0.540~0.724	0.029
CT最小值	0.661	-845.24 HU	60.98	67.74	0.566~0.748	0.003
CT平均值	0.649	-510.70 HU	60.98	64.52	0.553~0.736	0.007
熵	0.870	5.80	70.73	93.55	0.793~0.926	<0.001
长径	0.896	9.86 mm	73.17	96.77	0.825~0.946	<0.001
体积	0.812	910.18 mm ³	60.87	87.10	0.727~0.879	<0.001

表5 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数对IAC的诊断价值分析

项目	AUC	cut-off值	敏感度(%)	特异度(%)	95% CI	P值
CT最大值	0.644	-165.70 HU	86.67	42.65	0.549~0.732	0.005
CT最小值	0.731	-933.36 HU	60.00	80.88	0.639~0.810	<0.001
CT平均值	0.697	-520.26 HU	73.33	52.94	0.603~0.780	<0.001
熵	0.792	6.12	75.56	73.53	0.706~0.863	<0.001
长径	0.921	11.39 mm	80.00	88.24	0.854~0.963	<0.001
体积	0.872	1377.68 mm ³	71.11	92.65	0.796~0.927	<0.001

表6 Logistic回归分析浸润性GGN的影响因素

因素	β	SE	Wald χ^2	P	OR	95%CI
CT最大值	0.016	0.006	7.111	0.008	1.016	1.004~1.028
CT最小值	-0.002	0.002	6.250	0.013	0.995	0.991~0.999
CT平均值	0.019	0.005	14.440	<0.001	1.019	1.009~1.029
熵	1.088	0.326	11.105	0.001	2.967	1.565~5.625
长径	2.000	0.582	11.824	0.001	7.387	2.363~23.092
体积	1.514	0.735	4.243	0.040	4.545	1.076~19.194

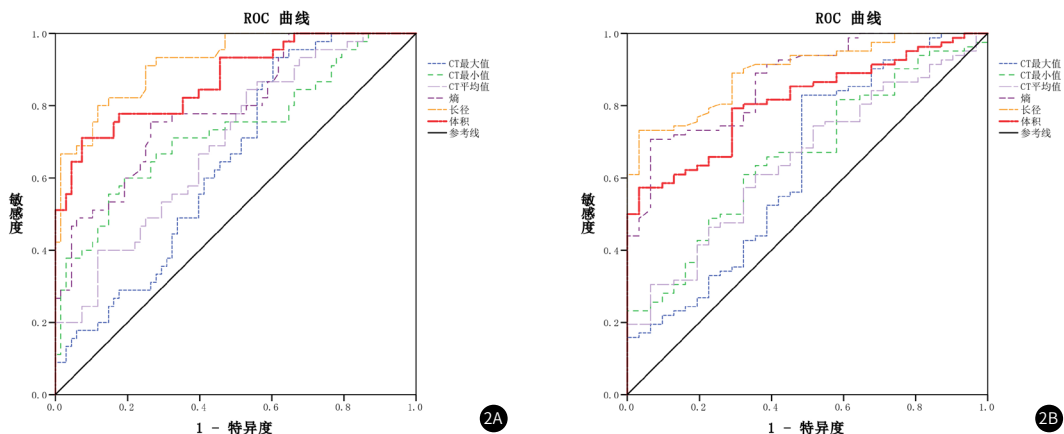


图2 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数诊断GGN浸润程度的ROC曲线图。2A: 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数诊断浸润性GGN (MIS+IAC) 的ROC曲线图, 2B: 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数诊断IAC的曲线图。

3 讨论

在以往, GGN的CT评估依赖于影像学医师的经验判断, 且在GGN微小浸润的识别方面存在一定局限性。近年来, AI技术在医学影像分析领域取得了显著进展, 可以自动提取大量高通量影像特征, 实现对GGN更精确的定量分析^[6]。已有研究表明, AI辅助诊断系统在肺结节检测、分类和浸润性评估方面均具有较高的准确性^[7]。

本研究发现, IAC组患者的CT平均值、熵、长径、体积显著高于MIS组和AIS组, 而CT最小值低于MIS组和AIS组, CT最大值高于AIS组, 与既往研究结果相近^[8-9], 提示这些CT定量参数与GGN的浸润程度密切相关。分析认为, CT定量参数反映了GGN的影像学特征, 其变化可能与肿瘤生物学行为密切相关。通过大数据训练, AI可以对GGN的识别效能更为准确, 有助于早期区分AIS、MIS和IAC, 提高早期肺癌的诊断率, 辅助医生进行个体化诊疗决策, 为手术干预、随访监测等提供客观依据^[10-11]。CT值反映了结节内高密度, 在浸润性腺癌中CT最大值升高可能与实性成分的增加有关, 随着病变进展至MIA或IAC, 纤维瘢痕、异形组织细胞、胶原沉积等实性成分增多, CT最大值随之升高^[12-13]。CT最小值降低可能反映了GGN内部密度的均匀性降低, 部分区域仍保留低密度磨玻璃成分, 而部分区域实性化, 导致CT最小值下降。随着病变的进展, CT平均值逐步升高, 表明实性成分的增加与肿瘤细胞增殖密切相关^[14]。随着肿瘤浸润程度的增加, 肿瘤体积、密度也随之增加, 伴随着更复杂的影像纹理特征。熵作为一种纹理分析参数, 可反映影像的不均匀性, 既往研究发现在其水平IAC与MIA+AIS中存在显著差异, 这可能是由于IAC通常伴随更多的新生血管, 组织异质性增加, 且随着浸润性增加, 部分肺泡塌陷, 进一步增强病灶密度, 导致影像灰度分布更复杂, 表现为熵值升高^[15-16]。本研究中, 相关性分析结果显示, CT最大值、CT平均值、熵、长径和体积均与GGN的病理浸润程度呈正相关, 而CT最小值呈负相关, ROC曲线分析显示, 这些参数在预测浸润性GGN(MIS+IAC)和IAC方面具有较高的诊断效能, 特别是长径的AUC最高, 与临床实践中将直径 ≥ 10 mm的纯GGN作为MIA的CT特征得出观点相一致, 提示其在判断GGN浸润程度方面具有重要的临床应用价值。Logistic回归分析结果显示, CCT最大值、CT最小值、CT平均值、熵、长径、体积均为浸润性GGN的独立影响因素, 也证实了基于AI辅助诊断系统的CT定量参数与浸润性GGN相关。Meng等^[17]采用了基于AI辅助诊断系统的CT定量数据、影像学特征及临床特征构建了浸润性GGN的预测模型, 其准确率和阳性预测率均较高, 也从侧面证实了基于AI辅助诊断系统的CT定量数据对GGN评估的临床价值。虽然本研究认为, 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数具有评估GGN的浸润程度的价值。但AI模型的训练质量和学习能力仍需进一步提高, 使其更好地适应不同影像设备和扫描参数下的数据仍是未来研究的重点。

综上所述, 基于AI辅助诊断系统的CT定量参数可用于评估GGN的病理浸润程度, 其中长径对浸润性GGN(MIS+IAC)的诊断效能最高, 具有较高的临床应用潜力。本研究为单中心回顾性研究, 样本量相对较小, 未来可扩大样本量, 结合PET-CT、MRI等多模态影像学 and 临床特征, 深度学习优化AI辅助诊断系统, 构建更精准的GGN风险评估模型, 实现其更广泛的临床应用。

参考文献

- [1] Liu B, Ye X, Fan W, et al. Expert consensus on the multidisciplinary diagnosis and treatment of multiple ground glass nodule-like lung cancer (2024 Edition) [J]. *J Cancer Res Ther*, 2024, 20(4): 1109-1123.
- [2] Liu J, Yang X, Li Y, et al. Predicting the invasiveness of pulmonary adenocarcinomas in pure ground-glass nodules using the nodule diameter: a systematic review, meta-analysis, and validation in an independent cohort [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2024, 14(2): 147.
- [3] 徐富阳, 刘杰克, 王璐, 等. 联合平扫及增强CT影像学特征预测亚实性肺结节浸润性的应用价值 [J]. *肿瘤预防与治疗*, 2023, 36(10): 836-847.
- [4] de Margerie-Mellon C, Chassagnon G. Artificial intelligence: a critical review of applications for lung nodule and lung cancer [J]. *Diagn Interv Imaging*, 2023, 104(1): 11-17.
- [5] 宋丹丹, 齐星亮, 刘佳林, 等. 人工智能技术在胸部CT恶性及非钙化结节检出中的价值 [J]. *医学影像学杂志*, 2023, 33(1): 154-157.
- [6] 章友婷, 王旭, 南燕, 等. 基于能谱CT联合AI定量参数的列线图模型预测磨玻璃结节型肺腺癌的浸润性 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(11): 53-56.
- [7] Zhang H, Wang D, Li W, et al. Artificial intelligence system-based histogram analysis of computed tomography features to predict tumor invasiveness of ground-glass nodules [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(9): 5783-5795.
- [8] 王蓉, 张娜, 王倩, 等. 基于CT影像特征及人工智能定量参数预测肺腺癌磨玻璃结节生长的危险因素 [J]. *中国中西医结合影像学杂志*, 2025, 23(1): 59-64.
- [9] 邓琦, 徐志锋, 周涛, 等. 基于人工智能CT定量分析对长径 ≤ 10 mm肺磨玻璃结节浸润程度的预测价值 [J]. *实用放射学杂志*, 2023, 39(7): 1088-1092.
- [10] 梁冬云, 周建军, 曾蒙苏, 等. 基于AI的CT定量分析对20mm以下非典型磨玻璃结节肺腺癌浸润性的预测价值 [J]. *临床放射学杂志*, 2024, 43(1): 57-62.
- [11] Pan Z, Hu G, Zhu Z, et al. Predicting Invasiveness of lung adenocarcinoma at chest ct with deep learning ternary classification models [J]. *Radiology*, 2024, 311(1): e232057.
- [12] Lyu X, Dong L, Fan Z, et al. Artificial intelligence-based graded training of pulmonary nodules for junior radiology residents and medical imaging students [J]. *BMC Med Educ*, 2024, 24(1): 740.
- [13] 黄炜晴, 吴辉, 谭理连, 等. 人工智能在肺腺癌精准诊断的应用价值 [J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21(11): 37-39.
- [14] 高洁, 欧阳雪晖, 吴伟, 等. 人工智能CT定量参数与磨玻璃结节样肺腺癌PARP9表达水平的关系及预测患者预后的价值分析 [J]. *新疆医科大学学报*, 2023, 46(10): 1301-1306.
- [15] Jiang L, Zhou Y, Miao W, et al. Artificial intelligence-assisted quantitative CT parameters in predicting the degree of risk of solitary pulmonary nodules [J]. *Ann Med*, 2024, 56(1): 2405075.
- [16] Koike H, Ashizawa K, Tsutsui S, et al. Differentiation between heterogeneous GGN and part-solid nodule using 2 D grayscale histogram analysis of thin-section CT image [J]. *Clin Lung Cancer*, 2023, 24(6): 541-550.
- [17] Meng Q, Zheng C, Guo L, et al. Construction and validation of a risk score system for diagnosing invasive adenocarcinoma presenting as pulmonary pure ground-glass nodules: a multi-center cohort study in China [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2024, 14(7): 4864-4877.

(收稿日期: 2025-04-14)

(校对编辑: 韩敏求)