

胸部影像学

CT 双能量成像参数对肺结节病变性质的鉴别价值研究

张东升, 盛茂, 何家伟, 陶磊

(合肥市第二人民医院影像中心, 安徽 合肥 230000)

[摘要] 目的: 研究 CT 双能量成像参数对肺结节病变性质的鉴别价值。方法: 2021 年 12 月—2023 年 1 月合肥市第二人民医院收治的 102 例恶性肺结节患者作为恶性组, 同期收治的 106 例良性肺结节患者作为良性组, 所有患者均经病理学检查确诊, 比较两组患者影像学特征及 CT 双能量成像参数, 进行肺结节病变性质的 CT 双能量成像征象、参数多因素分析, 采用受试者工作特征(ROC)曲线分析 CT 双能量成像参数对肺结节病变性质的鉴别价值。结果: 恶性组强化不均匀、淋巴结增大、结节边缘毛刺/分叶、血管受累患者占比高于良性组($P<0.05$)。恶性组动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数均高于良性组($P<0.05$)。多因素 Logistic 回归分析结果显示, 动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数较高是肺结节恶性病变的危险因素($OR=1.451, 1.502, 1.640, P<0.05$)。动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数联合鉴别肺结节病变性质的曲线下面积(AUC)值高于三者单独检测($P<0.05$)。结论: 肺结节良性病变和恶性病变患者之间影像学特征、动脉期及静脉期能谱曲线斜率、容积 CT 剂量指数存在明显差异, 且动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数是肺结节恶性病变的危险因素, 三者联合对肺结节病变性质的鉴别具有较好价值。

[关键词] 肺肿瘤; 体层摄影术, 螺旋计算机**[中图分类号]** R734.2; R814.42**[文献标识码]** A**[文章编号]** 1008-1062(2024)06-0406-05

DOI:10.12117/jccmi.2024.06.006

The clinical value of dual-energy CT imaging parameters in differentiating the pathological properties of pulmonary nodules

ZHANG Dong-sheng, SHENG Mao, HE Jia-wei, TAO Lei

(Department of Imaging Center, the Second People's Hospital of Hefei, Hefei 230000, China)

Abstract: Objective: To investigate the clinical value of dual-energy CT imaging parameters in differentiating the pathological properties of pulmonary nodules. **Methods:** From December 2021 to January 2023, 102 patients with malignant pulmonary nodules in the Second People's Hospital of Hefei were treated as malignant group, and 106 patients with benign pulmonary nodules in the same hospital were treated as benign group. All patients were diagnosed by pathological examination. The morphological characteristics of dual-energy CT imaging of the two groups were analyzed by both *t*-test and multivariate regression analysis. Receiver operating characteristic (ROC) curve was used to analyze the differential value of dual-energy CT imaging parameters for the properties of pulmonary nodules. **Results:** The proportion of patients with uneven enhancement, lymph node enlargement, burr/lobule and vascular involvement in the malignant group was higher than that in the benign group ($P<0.05$). The slope of energy spectrum curve and volume CT dose index of arterial and venous phases in the malignant group were higher than those in the benign group ($P<0.05$). Multivariate Logistic regression analysis showed that the higher slope of energy spectrum curve and volume CT dose index in arterial and venous phases were the risk factors for malignant lesions of pulmonary nodules ($OR=1.451, 1.502, 1.640, P<0.05$). The area under the curve (AUC) value of energy spectrum curve slope and volumetric CT dose index combined with the characteristics of pulmonary nodules in arterial and venous phases was higher than that of the three tests alone ($P<0.05$). **Conclusion:** There were obvious differences in imaging morphological characteristics, arterial phase and venous phase energy spectrum curve slope and volume CT dose index between patients with benign lung nodules and patients with malignant lung nodules, and the arterial phase and venous phase energy spectrum curve slope and volume CT dose index were risk factors for malignant lung nodules, and the combination of the three was of good value in differentiating the nature of lung nodules.

Key words: Lung Neoplasms; Tomography, Spiral Computed

肺结节根据其病变性质可分为良性和恶性, 其中良性结节仅需定期进行门诊随访即可, 而恶性结节是多种肺癌的前期病变, 经确诊后早期进行手术切除可极大降低患者发生肺癌的风险。因此早期诊

[收稿日期] 2024-03-21**[作者简介]** 张东升(1984-), 男, 安徽淮北人, 主治医师。E-mail: zys140920@163.com**[通信作者]** 张东升, 合肥市第二人民医院影像中心, 230000。E-mail: zys140920@163.com**[基金项目]** 合肥市第二人民医院 2022 年度院级科研项目(2022yyb013)。

断肺结节病变性质对于治疗方案的选择和制定具有重要意义^[1-2]。CT 具有图像清晰、扫描速度快的优点,常用于各种疾病的无创诊断^[3]。但对于肺结节患者,需要进行多次扫描以确定患者的病变类型,使得患者多次注射对比剂而增大辐射剂量,因此常规 CT 平扫在肺结节病变性质的诊断方面存在一定限制^[4]。CT 双能量成像是一种利用组织能量特性借助彩色编码技术显示组织中碘分布的情况,反映组织中血管密度,进而对结节病变性质进行评估的一种 CT 扫描方法^[5-6],目前关于 CT 双能量成像在肺结节病变性质评估中的应用价值尚未完全明确。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2021 年 12 月—2023 年 1 月合肥市第二人民医院收治的 102 例恶性肺结节患者作为恶性组(实性结节、磨玻璃结节、部分实性结节患者分别为 77 例、16 例、9 例),同期收治的 106 例良性肺结节患者作为良性组(炎症性结节、炎性肉芽肿、肺部陈旧性改变患者分别为 69 例、22 例、15 例)。

1.2 纳入排除标准

纳入标准:肺结节诊断符合《呼吸内科学》^[7]中的相关标准者;能配合完成相关检查者;病理检查、影像学资料完整者;对本研究知情同意者;心、肝、肾功能正常者。排除标准:对对比剂过敏者;合并其他肿瘤疾病者;合并肺部感染、肺结核等其他肺部疾病者;既往肺部手术史或放化疗史者;影像学图片清晰度不佳,影响观察者;医师判定不适合参与本研究者。

1.3 检查方法

所有患者均进行 CT 检查,采用飞利浦 IQon Spectral CT 机,64 排、128 层两套探测系统,一个球管。患者取仰卧位,抬高双臂置于脑后。扫描参数:准直 64×0.67,螺距 1.0,转速 0.5 s/r,矩阵 512×512,电流 180 mAs,电压 120 kV,层厚 5 mm,层距 5 mm,能谱单能级 40 keV,扫描范围为患者完整肺组织;后进行双能量增强扫描,以 3.0 mL/s 的速率注射碘克沙醇注射液(320 mgI/mL),剂量为 1.5 mg/kg,后常规注射 30 mL 生理盐水。动脉期(触发式兴趣区降主动脉,触发阈值 120 HU)延迟 35 s,静脉期 60 s,延

迟期 180 s。

统计两组患者体质量指数(BMI)、年龄、吸烟情况、性别及胸痛、呼吸困难、咳嗽/咳痰等临床表现。

根据 CT 检查结果,统计两组患者强化不均匀、淋巴结增大、结节边缘毛刺/分叶、病灶钙化情况、血管受累等影像学特征。

将两组图像数据上传至双能量 CT 软件进行分析,测量靠近病变区域的动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数,连续测量 3 次取平均值。

采用受试者工作特征(ROC)曲线分析动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数对肺结节病变性质的鉴别价值。

1.4 统计学方法

使用 SPSS 23.0 软件对数据进行统计分析。计数资料比较采用 χ^2 检验,表示为(n(%))。经 K-S 法检验符合正态分布的计量资料组间比较采用独立样本 *t* 检验,表示为均数±标准差($\bar{x}\pm s$);经 K-S 法检验不符合正态分布的计量资料组间比较采用秩和检验,以中位数(四分位数)(M(P25, P27))表示。采用多因素 Logistic 回归分析进行因素分析。采用 De-long 和 Bootstrap 方法检验各指标 ROC 曲线下面积(AUC)的差异。 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者一般资料比较

恶性组与良性组患者 BMI、年龄、吸烟情况、性别及临床表现比较,差异无统计学意义($P>0.05$)(表 1)。

2.2 两组患者影像学特征比较

恶性组强化不均匀、淋巴结增大、结节边缘毛刺/分叶、血管受累患者占比高于良性组($P<0.05$)(表 2,图 1,2)。

2.3 两组患者 CT 双能量成像参数比较

恶性组患者动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数分别为 1.08 ± 0.52 、 0.86 ± 0.39 、 (35.95 ± 12.73) HU,良性组患者分别为 0.78 ± 0.3 、 0.62 ± 0.28 、 (24.85 ± 10.02) HU,恶性组高于良性组($P<0.05$)。

2.4 肺结节病变性质的 CT 双能量成像征象、参数多因素分析及建模

多因素 Logistic 回归分析结果显示,动脉期、静

表 1 两组患者一般资料比较

组别	n	BMI(kg/m ²)	年龄(岁)	吸烟(n(%))	性别(n(%))		临床表现(n(%))			
					男	女	胸痛	呼吸困难	咳嗽/咳痰	其他
良性组	106	21.85±2.17	62.29±4.04	32(30.19)	29(27.36)	77(72.64)	34(32.08)	19(17.92)	24(22.64)	19(17.92)
恶性组	102	20.94±2.36	61.89±3.79	33(32.35)	33(32.35)	69(67.65)	44(43.14)	27(26.47)	35(34.31)	10(9.8)
<i>t</i> / χ^2		0.736	0.736	0.113		0.620	2.714	2.204	3.485	2.857
<i>P</i>		0.462	0.462	0.736		0.431	0.099	0.138	0.062	0.091

表 2 两组患者影像学特征比较(n(%))

组别	n	强化特点		淋巴结增大	结节边缘			病灶钙化	血管受累
		强化均匀	强化不均匀		光整	不光整	毛刺/分叶		
良性组	106	66(62.26)	40(37.74)	8(7.55)	40(37.74)	50(47.17)	16(15.09)	19(17.92)	8(7.55)
恶性组	102	25(24.51)	77(75.49)	42(41.18)	8(7.84)	35(34.31)	59(57.84)	10(9.80)	37(36.27)
χ^2		30.108		32.194		48.575		2.857	25.302
P		0.000		0.000		0.000		0.091	0.000

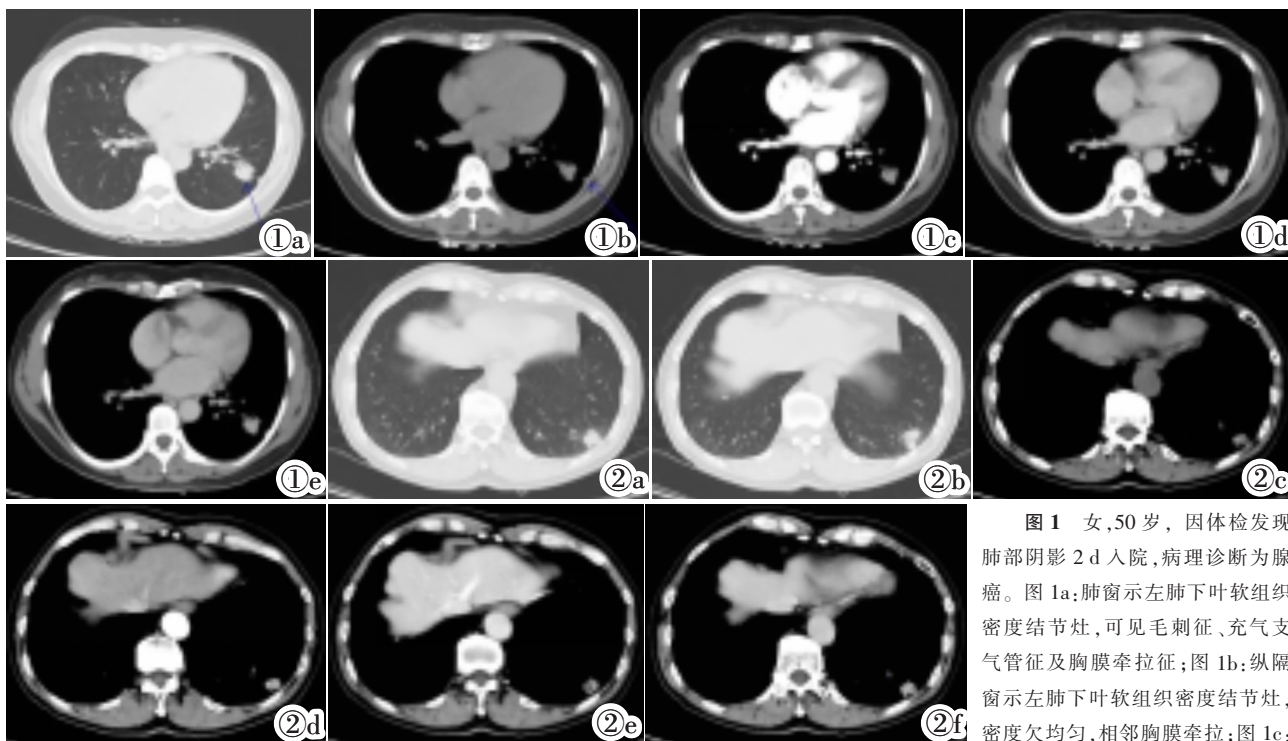


图 1 女,50 岁,因体检发现肺部阴影 2 d 入院,病理诊断为腺癌。图 1a:肺窗示左肺下叶软组织密度结节灶,可见毛刺征、充气支气管征及胸膜牵拉征;图 1b:纵隔窗示左肺下叶软组织密度结节灶,密度欠均匀,相邻胸膜牵拉;图 1c:纵隔窗动脉期病灶不均匀强化,CT 平均值约 56.5 HU;图 1d:纵隔窗静脉期病灶不均匀强化达峰值,CT 平均值约 99.1 HU;图 1e:纵隔窗延迟期病灶不均匀强化有所减退,CT 值约 90.6 HU。

图 2 男,70 岁,体检发现左下肺占位 1 周余入院,病理诊断为肉芽肿性炎。图 2a,2b:肺窗示左肺下叶软组织密度结节灶;图 2c:纵隔窗示左肺下叶软组织密度结节灶,密度不均,CT 值约 41 HU;图 2d:纵隔窗动脉期病灶较均匀明显强化,CT 值约 84 HU;图 2e:纵隔窗静脉期病灶较均匀强化,与动脉期强化相仿,CT 值约 82 HU;图 2f:纵隔窗延迟期病灶较均匀明显强化,较动脉期强化略增加,CT 值约 90 HU。

Figure 1. Female, 50 years old, admitted 2 days after discovering lung shadows during physical examination, pathological showed adenocarcinoma. Figure 1a: The lung window showed a soft tissue density nodule in the lower lobe of the left lung, with visible spicule sign, inflated bronchus sign, and pleural traction sign; Figure 1b: The mediastinal window showed a soft tissue density nodule in the lower lobe of the left lung, with uneven density and adjacent pleural traction; Figure 1c: Uneven enhancement of lesion in the arterial phase of the mediastinal window, with an average CT value of approximately 56.5 HU; Figure 1d: The uneven enhancement venous phase lesion in the mediastinal window reached its peak, with an average CT value of approximately 99.1 HU; Figure 1e: The uneven enhancement of lesion in the delayed phase of the mediastinal window were decreased, with a CT value of approximately 90.6 HU. **Figure 2.** A 70-year-old male was admitted to the hospital because of a mass in the lower left lung for over a week in physical examination; Pathological result: granulomatous inflammation. Figure 2a, 2b: The lung window showed a soft tissue density nodule in the lower lobe of the left lung; Figure 2c: The mediastinal window showed a soft tissue density nodule in the lower lobe of the left lung, with uneven density and a CT value of approximately 41 HU; Figure 2d: The lesions in the arterial phase of the mediastinal window were more evenly and significantly enhanced, with a CT value of approximately 84 HU; Figure 2e: The lesion in the venous phase of the mediastinal window was more uniformly enhanced, similar to those in the arterial phase, with a CT value of approximately 82 HU; Figure 2f: The lesion in the delayed phase of the mediastinal window was more evenly and significantly enhanced, whose enhancement was slightly increased compared to that in the arterial and venous phases. The CT value measured was about 90 HU.

脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数较高是肺结节恶性病变的危险因素 ($OR=1.451、1.502、1.640, P<0.05$)。将上述因素纳入 Logistic 回归分析,回归方程模型: $\text{Logit}(P)=-11.251+\text{动脉期能谱曲线斜率}\times 0.372+$

$\text{静脉期能谱曲线斜率}\times 0.407+\text{容积 CT 剂量指数}\times 0.495$, 对此模型进行评价,似然比卡方=139.02,自由度(df)=11, $P<0.001$;Wald 卡方(Wald chi-square)=126.73, $df=6, P<0.001$;采用 Hosmer-Lemeshow 拟合

优度检验显示模型拟合效果较好, $\text{Chi-square}=6.557$, $df=5$, $P=0.593$ (表 3)。

2.5 CT 双能量成像参数对肺结节病变性质的鉴别价值

动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量

指数联合鉴别肺结节病变性质的 AUC 值均高于三者单独检测($P<0.05$)(表 4)。动脉期能谱曲线斜率、静脉期能谱曲线斜率、容积 CT 剂量指数统计值分别为 -3.908 ($P<0.001$)、 -3.714 ($P<0.001$)、 -2.419 ($P=0.016$)(图 3)。

表 3 肺结节病变性质的 CT 双能量成像征象、参数多因素分析

影响因素	β	SE	Wald χ^2	P	OR	95%CI
强化不均匀	0.673	0.472	2.033	0.154	1.960	0.777~4.944
淋巴结增大	0.517	0.399	1.679	0.195	1.677	0.767~3.666
结节边缘毛刺/分叶	0.604	0.378	2.553	0.110	1.829	0.872~3.838
血管受累	0.427	0.271	2.483	0.115	1.533	0.901~2.607
动脉期能谱曲线斜率较高	0.372	0.126	8.717	0.003	1.451	1.133~1.857
静脉期能谱曲线斜率较高	0.407	0.141	8.332	0.004	1.502	1.140~1.981
容积 CT 剂量指数较高	0.495	0.206	5.774	0.016	1.640	1.096~2.457

表 4 CT 双能量成像参数对肺结节病变性质的鉴别价值

指标	截断值	AUC 值	95%CI	敏感度	特异度
动脉期能谱曲线斜率	1.160	0.674	0.599~0.749	41.18%	93.40%
静脉期能谱曲线斜率	0.985	0.686	0.614~0.759	42.16%	89.62%
容积 CT 剂量指数(HU)	30.375	0.750	0.684~0.817	68.63%	74.53%
联合	0.531	0.853	0.803~0.904	73.53%	81.13%

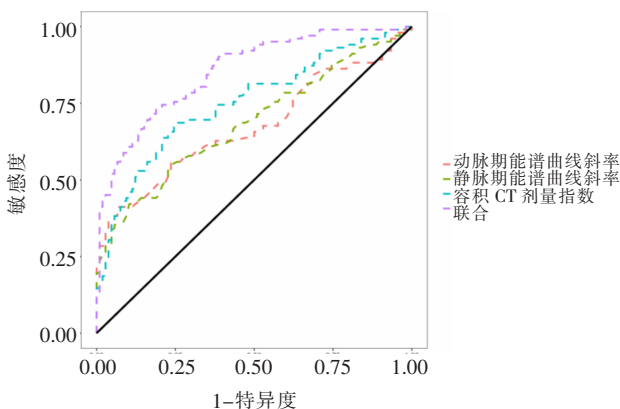


图 3 CT 双能量成像参数鉴别肺结节病变性质的 ROC 曲线。

Figure 3. ROC curve of dual-energy CT imaging parameters in differentiating the properties of pulmonary nodules.

3 讨论

肺结节为肺部主要病变类型之一, 其中恶性病变和良性病变存在较多类似的病变特点及临床症状, 使得其病变性质的临床诊断成为难点^[8-9]。CT 检查具有较高的密度分辨率, 在显示病变内部结构及其对组织侵犯情况等方面具有较大优势, 但肺结节在影像学特征上存在复杂性和多样性, 其良性病变和恶性病变在形态学及强化程度上存在“同病异影”或“同影异病”等不同程度的重叠, 因此使得临床诊断容易漏诊或误诊, 导致患者治疗延迟^[10-11]。而 CT 双能量成像扫描不仅对肺结节不同病变性质的影像学特征进行显示, 还能通过获取组织血流数据而分

析其具体病变性质, 可为肺结节病变性质的诊断提供良好的辅助^[12]。

本研究结果显示, 恶性组强化不均匀、淋巴结增大、结节边缘毛刺/分叶、血管受累患者占比高于良性组, 说明 CT 双能量成像可有效反映肺结节恶性病变和良性病变患者影像学特征。不同病变性质肺结节的影像学特征中, 强化不均匀、结节边缘毛刺/分叶等均是源于良性病变和恶性病变组织细胞分裂速度不同所引起的, 如良性结节细胞分裂速度较慢且基本一致, 组织内部密度及弹性均匀, 因此呈现均匀强化, 边缘不存在毛刺/分叶特征, 而多表现为边缘光整(如错构瘤、炎性假瘤、硬化性血管瘤等)或不光整(如结核及部分炎性结节等), 但部分非小细胞肺癌患者的病灶组织也可表现为边缘不光整形态^[13-14]。淋巴结增大、血管受累情况方面, 本研究结果中不同病变性质肺结节患者间比较存在统计学差异, 但研究发现, 此为肺结节良性、恶性病变共同存在的特征, 发生差异的原因可能与不同病变性质的肺结节细胞对周围组织的侵袭情况不同有关^[15-16]。因此, 肺结节影像学特征对于肺结节病变性质的诊断具有一定价值, 但存在一定重叠, 且相关指标的评估较为主观, 可能会对肺结节病变性质的诊断造成一定影响。

CT 双能量成像扫描一次可提供较多的客观参数信息, 如能谱曲线、碘图、CT 值等, 能客观显示病灶部位的病变情况^[17], 本研究选取动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数作为观察指标, 其

中能谱曲线是物质的 CT 值随 X 线能量变化形成的曲线,其与物质的能量代谢情况密切相关^[18];而容积 CT 剂量指数则与碘在组织中的代谢情况有关。本研究结果显示,恶性组患者动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数均高于良性组^[19],说明三者在肺结节良恶性病变中存在明显差异。与良性病变相比,恶性病变微血管分布更加密集,且血管壁无肌层、渗透性强,细胞代谢速度较快,因此血管中血液流速较快、流量较大,可呈现更高的能量代谢,碘分布特征更加明显,且患者动脉期、静脉期能谱曲线斜率更高^[20-21]。此外,CT 双能量成像具有两套探测系统,其基于物质对 X 线的吸收特性不同,利用双能量对患者肺部进行扫描成像,可对病灶位置、性质及大小等进行准确显示,得到物质构成比,同时可对患者肺部进行区域划分,进行多部位成像,快速、准确地对患者病灶部位的病变性质进行评估^[22-23]。

本研究存在一定的局限性:本研究为单中心研究,相关结果代表性较差,后续将联合其他单位,进一步扩大样本量,分析 CT 双能量成像参数对肺结节病变性质的鉴别价值。

综上,肺结节良性病变和恶性病变患者之间影像学特征、动脉期及静脉期能谱曲线斜率、容积 CT 剂量指数存在明显差异,且动脉期、静脉期能谱曲线斜率及容积 CT 剂量指数是肺结节恶性病变的危险因素,三者联合对肺结节病变性质的鉴别具有较好的价值,值得在临床推广。

【参考文献】

[1]郭曦,吴彦平,漆万银.肺结节人工智能提软件取 CT 纹理征象构建决策树模型:对 I A 期小细胞肺癌的诊断效能研究[J].中国临床医学影像杂志,2022,33(4):249-252.

[2]Jiang N, Zhou J, Zhang W, et al. RNF213 gene mutation in circulating tumor DNA detected by targeted next-generation sequencing in the assisted discrimination of early-stage lung cancer from pulmonary nodules[J]. Thorac Cancer, 2021, 12(2): 181-193.

[3]宁爱东,张林飞,汪国伟. CT 三维重建成像对孤立性肺结节形态特征的显示及良恶性的诊断价值探究[J]. 罕少疾病杂志,2022,29(8):36-38.

[4]葛卫卫,李伟,李荣兴,等. MSCT 与 HRCT 在不同病理类型肺磨玻璃结节中的临床应用[J]. 中华肺部疾病杂志(电子版),2023,16(4):572-574.

[5]Li Q, Tan H, Lv F. Molecular characterization of solitary pulmonary nodules in dual-energy CT nonlinear image fusion technology[J]. J Recept Signal Transduct Res, 2022, 42(1): 95-99.

[6]Zhu B, Zheng S, Jiang T, et al. Evaluation of dual-energy and perfusion CT parameters for diagnosing solitary pulmonary nodules [J]. Thorac Cancer, 2021, 12(20): 2691-2697.

[7]钟南山,王辰.呼吸内科学[J].北京:人民卫生出版社,2008:51-54.

[8]Dunn BK, Blaj M, Stahl J, et al. Evaluation of Electromagnetic

Navigational Bronchoscopy Using Tomosynthesis-Assisted Visualization, Intraprocedural Positional Correction and Continuous Guidance for Evaluation of Peripheral Pulmonary Nodules [J]. J Bronchology Interv Pulmonol, 2023, 30(1): 16-23.

[9]Xu H, Pu XH, Yu TF, et al. Incidence and natural course of CT-detected pulmonary ground-glass nodules in Chinese women with breast cancer: a retrospective, single-center, long-term follow-up study in 4 682 consecutive patients[J]. Acta Radiol, 2020, 61(2): 175-183.

[10]曹冠杰,史志涛,王彩华,等. CT 放射组学联合血清肿瘤标志物对不确定性肺结节恶性风险的预测价值 [J]. 临床肺科杂志, 2023,28(9):1321-1326.

[11]颜林军,郭成伟,孙文超,等. 320 排 CT 低剂量容积体部灌注成像强化峰值时间对孤立性周围肺病变诊断价值 [J]. 中国临床医学影像杂志,2022,33(6):391-395.

[12]赵文云,谢强. 64 排螺旋 CT 动态增强扫描不同病理类型肺癌患者孤立性肺结节特点分析 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志,2023,21(7):56-58.

[13]Fehrmann A, Garcia BJ, Holz J, et al. Metastatic pulmonary calcification: First report of pulmonary calcium suppression using dual-energy CT[J]. Radiol Case Rep, 2020, 15(7): 900-903.

[14]赵波,刘永利,李京京. 血浆外泌体 miR-4306 表达水平联合 CT 征象对单发非实性肺结节良恶性鉴别的价值研究 [J]. 现代检验医学杂志,2023,38(4):46-50.

[15]钟宇,周姝,张立波,等. 人工智能肺结节筛查系统结合能谱 CT 比较不同性质肺结节的检测效能[J]. 中国医科大学学报,2023,52(7):624-627.

[16]Jokerst C, Adler C, Gotway M, et al. Dual Energy Technique Adds Value to Solitary Pulmonary Nodule Analysis with Dynamic Contrast-Enhanced CT: A 100 Nodule Experience [J]. Curr Probl Diagn Radiol, 2023, 52(1): 25-30.

[17]胡婷婷,鲁洪岭,刘倩,等. 双能量 CT 碘图定量参数和血清 KLF5、sTIM-3 与晚期非小细胞肺癌患者预后的关系研究[J]. 实用心脑血管病杂志,2023,31(7):53-57.

[18]Ha T, Kim W, Cha J, et al. Differentiating pulmonary metastasis from benign lung nodules in thyroid cancer patients using dual-energy CT parameters[J]. Eur Radiol, 2022, 32(3): 1902-1911.

[19]王静,刘昆,田秀芳,等. 双能 CT 重建能量图对非小细胞肺癌放疗计划的影响[J]. 中华肿瘤防治杂志,2021,28(18):1398-1404.

[20]He C, Liu J, Hu S, et al. Accuracy of Pulmonary Nodule Volumetry Using Noise-Optimized Virtual Monoenergetic Image and Nonlinear Blending Image Algorithms in Dual-Energy Computed Tomography: A Phantom Study [J]. J Comput Assist Tomogr, 2020, 44(6): 847-851.

[21]石海,赵琳,李兴杰. 西门子双源 CT 双能量扫描对肺癌鉴别诊断及预后评估的价值观察 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志,2022,20(9): 63-64.

[22]Yan G, Li H, Fan X, et al. Multimodality CT imaging contributes to improving the diagnostic accuracy of solitary pulmonary nodules: a multi-institutional and prospective study[J]. Radiol Oncol, 2023, 57(1): 20-34.

[23]钟慧,巩贯忠,王越,等. 基于双能 CT 虚拟单能量技术对非小细胞肺癌影像组学特征变化的研究[J]. 中华肿瘤防治杂志,2023,30(8):469-475.